

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

**С. В. Машков, И. В. Юдаев,
А. А. Гашенко, П. В. Крючин**

СВЕТОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Практикум

Кинель 2017

УДК 621.3
ББК 31.29
М38

Рецензенты:

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и электропривод» факультета энергетики ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ им. И.Т. Трубилина Оськин С.В.

.....

Машков, С. В.

М38 Светотехника и электротехнология : практикум / С. В. Машков, И. В. Юдаев, А. А. Гашенко, П. В. Крючин. – Кинель : РИО Самарской ГСХА, 2017. – 118 с.
ISBN 978-5-88575-

В практикуме представлены материалы, необходимые для выполнения лабораторных работ при изучении дисциплины «Светотехника и электротехнология».

Учебное издание предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Агроинженерия». Издание может быть полезно инженерно-техническим работникам различных отраслей энергетики.

УДК 621.3
ББК 31.29

ISBN 978-5-88575-

© Машков С. В., Юдаев И. В.,
Гашенко А. А., Крючин П. В., 2017
© ФГБОУ ВО Самарская ГСХА, 2017

ПРЕДИСЛОВИЕ

Применение в сельском хозяйстве оптических технологий и электротехнологий имеет очень большое значение для повышения урожайности возделываемых культур, снижения падежа молодняка животных и птицы, улучшения качества и сохранности полуфабрикатов и продуктов и т.п.

В сельскохозяйственном производстве объектами электро- и оптической обработки являются не только выращиваемая продукция таких отраслей как растениеводство и животноводство, но и сами животные и растения, почва, воздушные среды в животноводческих помещениях и хранилищах и т.п.

При использовании современных систем освещения и облучения, а также применения разнообразных электротехнологий увеличивается производительность труда и снижается травматизм, появляется возможность внедрения повсеместной автоматизации технологических процессов и операций, повышается сохранность поголовья молодняка, увеличивается продуктивность животных и птицы, а также урожайность выращиваемых культур.

Цель практикума – ознакомить обучающихся с устройством и принципом работы, правилами эксплуатации и спецификой применения современных осветительных и облучательных установок, электронагревательного и специального электротехнологического оборудования сельскохозяйственного назначения.

Практикум предусматривает более глубокое усвоение студентами теоретического материала за счет его проверки на экспериментальных и лабораторных установках. В теоретической части для каждой лабораторной работы сформулированы основные понятия, необходимые для успешного выполнения экспериментальных исследований. В пособии также приводится подробное описание методики выполнения лабораторных исследований, а в конце каждой работы предлагаются контрольные вопросы, способствующие качественному усвоению изученной информации.

Практикум позволит сформировать у обучающихся профессиональные компетенции, необходимые для решения задач, связанных с использованием оптического излучения и применением электрической энергии в технологических процессах сельскохозяйственного производства.

ОБЩИЕ ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ «СВЕТОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ»

Выполнение лабораторных работ по курсу «Светотехника и электротехнология» начинается с изучения правил техники безопасности в электротехнических лабораториях и назначения электротехнического оборудования лабораторных стендов и макетов.

Приступать к сборке электрических схем на лабораторных стендах можно только с разрешения преподавателя или учебного мастера!

Перед сборкой электрических схем необходимо установить на лицевой панели стендов все тумблеры в крайнее нижнее положение «Выключено». Собирать схемы, используя несколько функциональных элементов одновременно, недопустимо из-за возможности применения одних и тех же элементов в разных схемах. Монтаж схем, представленных на лабораторных стендах, необходимо осуществлять с помощью соединительных проводников, и только после проверки схемы преподавателем можно подавать на стенд напряжение питания.

После получения разрешения необходимо включить тумблер питания изучаемой схемы, произвести необходимые исследования и измерения в зависимости от методики выполняемой работы.

Отключение стенда необходимо производить в обратной последовательности.

После проведения работы, необходимо разобрать схему и привести в порядок рабочее место.

Правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ

Лицам, работающим с разнообразным электрооборудованием, следует помнить, что при малейшем отступлении от требований техники безопасности могут возникнуть такие ситуации, когда работающий может быть поражен электрическим током с теми или иными последствиями.

Поэтому все работающие в электротехнических лабораториях должны неукоснительно и точно выполнять все общие и специальные требования техники безопасности, а также соблюдать установленные правила нахождения и проведения работ в данной лаборатории.

1) К работе в лаборатории «Светотехника и электротехнология» допускаются только лица, прослушавшие вводную беседу и инструктаж по технике безопасности.

2) Допущенные к лабораторным занятиям лица должны расписаться в журнале по технике безопасности.

3) Сборку схем и изменения в построении схем следует проводить при отключенном напряжении питания.

4) Включение питания стенда и выполнение работ производить только после разрешения преподавателя.

5) Если в схеме требуется сделать какие-либо пересоединения, то схему необходимо обязательно отключить от источника электроэнергии. Всякое изменение в схеме должно быть проверено преподавателем, и только после этого на схему можно вновь подать напряжение.

6) После окончания работ и внесения данных по результатам измерения в рабочую тетрадь, полученные результаты следует показать преподавателю и, получив разрешение, приступить к разборке исследуемой схемы, обязательно отключив ее от питающего напряжения.

7) Разобрав схему, соединительные провода следует аккуратно сложить без скручивания, а приборы установить на место их первоначального размещения.

Часть 1. Светотехника

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ИСКУССТВЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Цель работы: изучить конструкцию основных типов искусственных источников оптического излучения.

Искусственный источник оптического излучения – это устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии в излучение требуемого диапазона волн и заданного спектра. В искусственных источниках оптического излучения электрическая энергия преобразуется в основном двумя способами: с помощью высокотемпературного нагрева тела электрическим током – *лампы накаливания*, и с помощью электрического разряда в газах и парах металлов – *газоразрядные лампы*. Наиболее массовым искусственным источником оптического излучения являются лампы накаливания, применяемые для освещения жилых и производственных помещений, и т.д.

Лампы накаливания бывают в вакуумном и газополном исполнении. У вакуумных ламп из колбы откачан воздух до разряжения $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па. Такие лампы выпускают мощностью до 40 Вт.

У газополных ламп колбу после откачки воздуха наполняют инертным газом – смесью аргона, ксенона или криптона (86%) с азотом (14%) до давления, близкого к атмосферному. Такое решение позволяет при уменьшении расплескивания вольфрама повысить температуру тела накала до $2600-2700^{\circ}\text{C}$ и увеличить, в сравнении с вакуумными лампами, световую отдачу в 1,5 раза.

К преимуществам ламп накаливания относится: их низкая стоимость, удобство в обращении, простота в обслуживании, малые начальные затраты при оборудовании осветительных установок, разнообразие конструкции, напряжений и мощностей.

Главными недостатками ламп накаливания является: сравнительно низкая светоотдача (6,7-19,1 лм/Вт), невысокая средняя продолжительность горения – 1000 ч и не всегда приемлемая

цветопередача, а также недостаточная механическая прочность ряда ламп специального назначения.

Галогенные лампы накаливания, по сравнению с обычными лампами накаливания, имеют более стабильный по времени световой поток, за счет применения галогенной добавки (йода), вызывающий регенеративный цикл.

Регенеративный цикл протекает следующим образом:

- 1) образования йодида вольфрама у поверхности колбы;
- 2) возвращение вольфрама в виде йодида к спирали;
- 3) разложение йодида вблизи спирали с осаждением на ней вольфрама и освобождением йода.

Основные достоинства галогенных ламп следующие:

- высокая удельная плотность излучения и световая отдача (8,8-26 лм/Вт);
- стабильность потока излучения в течение срока службы (2000 ч);
- относительно малые габаритные размеры;
- способность выдерживать длительные и большие перегрузки;
- возможность плавного регулирования потока излучения в широких пределах путем изменения подводимого напряжения.

Основные недостатки галогенных ламп:

- возможность работы только в горизонтальном положении, во избежание деформаций тела накала под действием собственного веса, а также нарушение регенеративного цикла;
- более высокая стоимость в связи с необходимостью использовать кварцевое стекло и особо чистый вольфрам.

Особенности газоразрядных ламп и область применения определяются тем, что газоразрядные лампы имеют высокую световую отдачу и большой срок службы, по сравнению с лампами накаливания, а также могут иметь разнообразные спектры оптического излучения и широкий диапазон значения мощности, яркости и других параметров.

В зависимости от рода излучателя, обеспечивающего основную часть энергии излучения газоразрядного источника, различают:

- люминесцентные лампы, в которых основным источником оптического излучения является люминофоры, возбуждаемые излучением электрического разряда в газе;

- газосветные лампы, в которых используется излучение газа или паров металла в процессе электрического разряда;
- электродосветные лампы, в которых используется излучение раскаляющихся в процессе разряда электродов.

Наиболее широкое распространение среди газоразрядных источников оптического излучения получили лампы, в которых используется электрический разряд в парах ртути. В зависимости от давления внутри колбы лампы бывают низкого давления (до 0,01 МПа), высокого (0,01-1 МПа), сверхвысокого (более 1 МПа).

Люминесцентные лампы относятся к лампам низкого давления. Давление ртутных паров в люминесцентной лампе зависит от температуры стенок лампы и составляет при нормальной рабочей температуре 40°С примерно 0,13-1,3 Н/м² (10⁻²...10⁻³ мм рт. ст.). Такое низкое давление обеспечивает интенсивное излучение разряда в ультрафиолетовой области спектра.

Достоинства люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания:

- более благоприятный спектральный состав излучения;
- высокая (в 4-6 раз для ламп одинаковой мощности) световая отдача;
- низкая яркость и температура поверхности лампы;
- большой срок службы (10000-12000 ч).

Недостатками люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания являются:

- более сложная схема включения в сеть, требующая дополнительной пускорегулирующей аппаратуры;
- зависимость показателей работы от условий окружающей среды;
- пульсация светового потока;
- сравнительно малая единичная мощность;
- большие размеры.

Газоразрядные ртутные лампы высокого давления являются самой распространенной и многочисленной группой среди газоразрядных ламп высокого давления. Дуговой разряд в парах ртути при давлении до 0,3 МПа позволяет получить высокую световую отдачу и существенный срок службы, до 15000 ч. Номинальная мощность таких источников может быть от нескольких десятков

ватт до единиц киловатт. Такие источники компактны, надежно зажигаются и работают в сетях с напряжением 380/220 В.

В тоже время при несомненных достоинствах они имеют существенный недостаток – в чисто ртутном разряде отсутствуют излучения оранжево-красной части спектра, что приводит к искажению правильной цветопередачи и ограничивает возможности использования их для целей освещения.

Для устранения указанного недостатка ультрафиолетовую часть излучения дугового разряда в парах ртути при помощи люминофоров преобразуют в видимое излучение красной части спектра, что частично восполняет существующий недостаток, или вводят добавки в разрядный промежуток, дающие видимое излучение требуемых частей спектра, что значительно повышает КПД ламп высокого давления.

Металлогалогенные лампы высокого давления помимо ртути имеют добавки йодидов или бромидов, позволяющие широко изменять спектральный состав видимого излучения.

Натриевые лампы высокого давления содержат в трубке ртуть в количестве 5-10%. Поэтому основа излучения – дуговой электрический разряд в парах натрия, который создает особый оранжево-красный спектр излучения.

У ксеноновых ламп излучение осуществляется за счет электрического разряда в инертном газе (ксеноне). Излучение характеризуется спектром, близким к естественному в видимой области, и присутствием в нем значительной инфракрасной составляющей.

Порядок выполнения работы. Изучить конструкцию и определить типы исследуемых ламп, пользуясь наглядным материалом и литературой [1, 2]. Используя маркировку ламп выписать значения рабочего напряжения и мощности. Используя наглядные материалы и плакаты в лаборатории, определить срок службы и тип цоколя исследуемых ламп. Все параметры занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

Результаты исследования основных типов искусственных источников оптического излучения

№п/п	Тип лампы	Напряжение на лампе, В	Мощность, Вт	Срок службы, ч	Тип цоколя
1					
2					

Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое искусственный источник света?
2. Какие искусственные источники света бывают?
3. Как происходит регенеративный цикл в галогенной лампе?
4. Перечислите достоинства и недостатки галогенных ламп.
5. Как классифицируются газоразрядные источники? Приведите пример каждой группы.
6. Перечислите достоинства и недостатки газоразрядных люминесцентных ламп низкого давления.
7. Что обозначает цифра в типе цоколя лампы?
8. Для чего в лампу накаливания вводят инертный газ?
9. Перечислите достоинства и недостатки газоразрядных ламп высокого давления.
10. Где применяются галогенные лампы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Цель работы: изучить конструкцию, схему включения и принцип работы ламп накаливания; исследовать их световые и электрические характеристики.

Для искусственного освещения промышленных предприятий и коммунально-бытового сектора в настоящее время в основном применяются лампы накаливания (ЛН) и газоразрядные лампы (ЛЛ).

Лампы всех групп и типов должны удовлетворять требованиям ГОСТ 19190-84 «Лампы электрические. Общие технические условия».

Экономичность используемого источника света характеризуется световой отдачей η_v , т. е. отношением светового потока, излучаемого лампой, к ее электрической мощности:

$$\eta_v = \Phi/P. \quad (2.1)$$

Относительно невысокая световая отдача ЛН (8-20 лм/Вт для ламп общего назначения) объясняется их физической природой. Световой КПД вакуумных ламп равен 1,5, а газополных – 2-4%.

Основные достоинства ламп накаливания:

- широкий сортамент выпускаемых ЛН, на разные мощности и напряжения;
- разнообразие конструкций и приспособленности к определенным условиям применения;
- непосредственное включение в сеть без дополнительных аппаратов;
- работоспособность (хотя и с резко изменяющимися характеристиками) даже при значительных отклонениях напряжения сети от номинального;
- почти полная независимость от условий окружающей среды, в том числе от ее температуры.

Недостатками ЛН являются их низкая световая отдача, преобладание в спектре излучений желто-красной части, ограниченный срок службы (не более 2000 ч).

Основными характеристиками ламп накаливания являются номинальные значения напряжения, мощности, светового потока,

срока службы, а также их габаритные размеры.

Лампы общего назначения – вакуумные (В), биспиральные аргоновые (Б), биспиральные криптоновые (БК), газополные моноспиральные (Г) (ГОСТ 2239-79) – предназначены для освещения помещений и открытых пространств, рассчитаны на напряжения 127 и 220 В. Срок службы ламп в среднем равен 1000 ч. Учитывая нестабильность напряжения в сетях, ГОСТ 2239-79 предусматривает выпуск ЛН на расчетные напряжения 130, 220, 225, 235 и 240 В (на лампе указывают диапазон напряжений: 125-135; 215-225; 220-230; 230-240 и 235-245 В).

При эксплуатации ЛН должны соблюдаться следующие условия:

- использование ламп должно осуществляться в соответствии с их назначением, т. е. в тех светильниках, для которых они предназначены, поэтому на каждом светильнике или в паспорте на него указываются максимально допустимая мощность лампы, ее тип и другие эксплуатационные данные;

- обеспечение соответствия рабочего напряжения, указанного на лампе, напряжению сети;

- соответствие климатических факторов предусмотренным техническими условиями на лампы, например ЛН нормального исполнения рассчитаны для работы при относительной влажности не более 98% в интервале от –60 до +50°С и при внешнем давлении 680-1010 гПа (550-760 мм рт. ст.).

Наиболее распространенная конструкция лампы накаливания показана на рисунке 2.1. Главной частью любой лампы накаливания является тело накала *1* (вольфрам), нагревание которого происходит проходящим через него электрическим током и приводит к излучению света. Оно изображено на рисунке в виде условно заштрихованного прямоугольника. Для того чтобы тело накала в процессе работы сохраняло исходную форму, его фиксируют в пространстве с помощью внутренних звеньев электродов – вводов *2* и держателей *3*. В зависимости от типа ламп электроды могут быть одно-, двух- и трехзвенными. На рисунке 2.1 показаны трехзвенные электроды, состоящие из ввода *2*, изготовляемого из никеля, ферроникеля, меди и платинита в зависимости от типа ламп, среднего звена – платинитового ввода *4* и внешнего звена – вывода *5*, обычно медного или платинитового.

Электроды и держатели являются частью так называемой ножки. Это стеклянный конструктивный узел лампы, который кроме электродов и держателей включает в себя стеклянный цельный или пустотелый штабик 6 с линзой 7, стеклянный пустотелый штенгель 8 и стеклянную трубку-тарелку 9, развернутую в нижней части (развертка) 10. Эти детали соединены между собой путем сплавления стеклянных элементов в зоне лопатки 11. Ножка служит опорой для тела накала и вместе с колбой 12 обеспечивает герметизацию лампы. Горло колбы 13 герметично спаивают с разверткой тарелки; через штенгель и откачное отверстие 14 из колбы откачивают воздух, и в газополную лампу после этого вводят инертный газ; запаивают штенгель, герметично закрывая тем самым внутреннее пространство лампы.

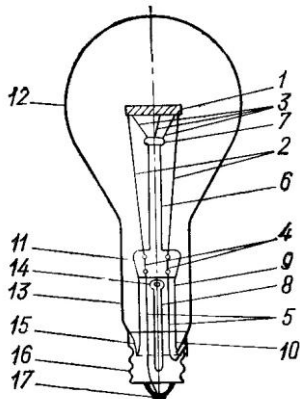


Рис. 2.1. Конструкция лампы накаливания общего назначения

Для удобства эксплуатации на горловине лампы 15 с помощью цоколевочной мастики укрепляют корпус, к цоколю которого 16 и контактной пластине 17 припаивают или приваривают выводы электродов.

Классификация ламп накаливания производится по двум признакам: назначению и конструкции. В основе классификации ламп по назначению заложены следующие отличительные признаки: лампы общего назначения, лампы местного освещения, транспортные лампы, лампы для сигнализации и индикации, лампы для оптических систем и приборов, метрологические лампы, лампы для технологических целей, лампы для специальных светотехнических систем и установок.

Классификация ламп накаливания по конструкционным особенностям представлена в таблице 2.1.

Лампы накаливания также могут классифицироваться и по другим признакам, например по напряжению, мощности, по характеру среды, окружающей тело накала (вакуумные, газополные, т.е. аргоновые, криптоновые, ксеноновые с разным содержанием азота, галогенные – с добавкой к наполняющему газу определенной доли галогенов).

Таблица 2.1

*Классификация ламп накаливания
по конструктивно-технологическим признакам*

Наименование класса ламп	Диаметр колбы, мм	Длина колбы, мм	Форма колбы и особенности конструкции
Крупногабаритные	>80	>175	Шар-конус
Среднегабаритные	40-80	73-175	Шар-конус, грибообразная
Малобагабаритные	25-40	30-75	Шар-конус, шарообразная
Миниатюрные	5-20	10-30	Шарообразная, цилиндрическая
Сверхминиатюрные	<5	<10	Безножечковая конструкция
Цилиндрические	15-30	<80	Цилиндрическая
Лампы-фары	100-200	-	Специальные формы, сваренные из штамповочных стеклянных деталей
Лампы-светильники	100-200	-	Специальные формы, выдувные
Галогенные	5-15	15-500	Трубчатые колбы

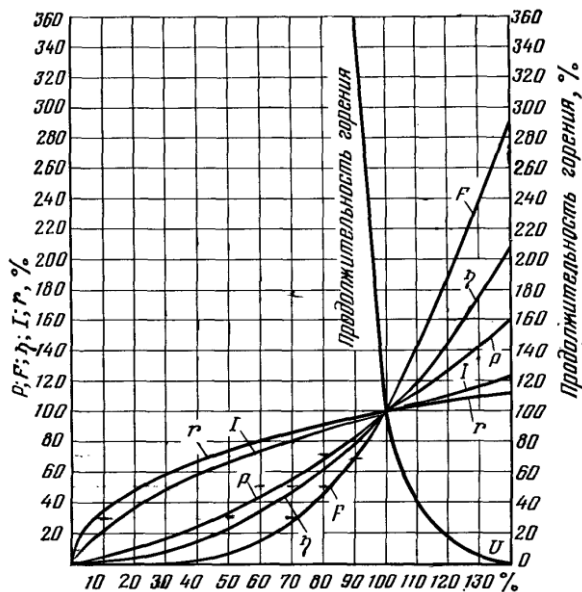


Рис. 2.2. Зависимость световых и энергетических характеристик ламп накаливания от подводимого напряжения

Отклонение напряжения влияет на световые и электрические характеристики ламп накаливания следующим образом. При изменении напряжения в питающей сети, к которой присоединена лампа накаливания, изменяются ток, протекающий по нити накала, температура нагрева, сопротивление и мощность, рассеиваемая нитью в окружающее пространство. Следствием этого будет наблюдаться изменение яркости нити накала, светового потока, световой отдачи и срока службы лампы. Влияние подводимого напряжения на основные характеристики лампы накаливания представлено на рисунке 2.2.

Порядок выполнения работы. Изучить конструкцию и принцип работы ламп накаливания. Составить эскиз конструкции лампы накаливания и электрической схемы лабораторной установки, предназначенной для исследования световых и электрических характеристик ламп накаливания.

Используя рисунок 2.3 собрать электрическую схему для исследования световых и электрических характеристик ламп накаливания.

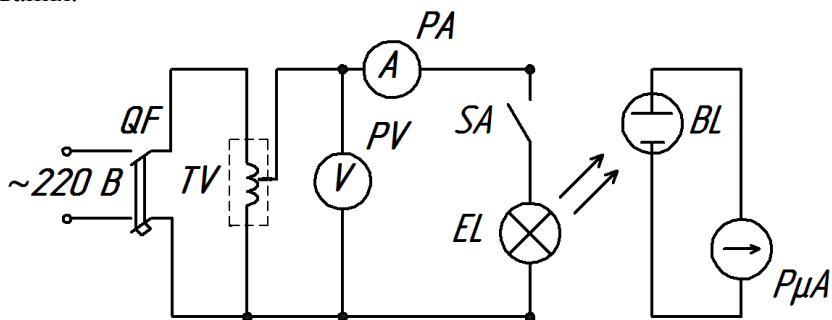


Рис. 2.3. Электрическая схема лабораторной установки для исследования световых и электрических характеристик ламп накаливания:

QF – рубильник; TV – автотрансформатор; PA – амперметр; PV – вольтметр; SA – выключатель; EL – лампа накаливания; $BL, P\mu A$ – люксметр

Измерить с помощью мультиметра сопротивление r_0 тела накала, при температуре окружающей среды, т.е. до включения лампы в сеть.

Изменяя напряжение на зажимах лампы при помощи автотрансформатора, по показаниям контрольно-измерительных приборов снять зависимости тока и освещенности от питающего напряжения. Интервалы изменения напряжения выбрать равными 20 В, диапазон измерения напряжения принять от 140 до 240 В. Результаты измерений занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

*Результаты исследования световых
и электрических характеристик ламп накаливания*

№ п/п	Опытные данные						Расчетные данные										
	r_0	U_{EL}		I_{EL}		E	P_{EL}		r_{EL}		T		Φ_{EL}		η_V		
	Ом	В	%	А	%	лк	Вт	%	Ом	%	К	%	лм	%	лм/Вт	%	
1		140															
2		160															
3		180															
4		200															
5		220	100		100			100		100		100		100			100
6		240															

По полученным опытными данным определить следующие величины:

– сопротивление, Ом, лампы при работе:

$$r_{EL} = \frac{U_{EL}}{I_{EL}}; \quad (2.3)$$

– температуру, К, тела накала:

$$T = \frac{r_{EL} - r_0}{\alpha_1 r_0} + 273; \quad (2.4)$$

где α_1 – температурный коэффициент сопротивления (для вольфрама $\alpha_1 = 0,0052 \text{ град}^{-1}$);

– световой поток, лм:

$$\Phi_{EL} \cong 3,4\pi^2 E; \quad (2.5)$$

где l – расстояние от тела накала до фотоэлемента, м;

– световую отдачу, лм/Вт:

$$\eta_V = \frac{\Phi_{EL}}{P_{EL}}. \quad (2.6)$$

Для удобства проведения анализа результатов работы, измеренные и вычисленные значения величин необходимо представить в процентах от их номинальных значений. Результаты расчета занести в таблицу 2.2. По данным таблицы 2.2 построить графики зависимости тока, мощности, сопротивления, светового потока и светоотдачи от напряжения на лампе, выраженной в процентах. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое светоотдача источника света?

2. От чего может зависеть светоотдача источника света?
3. Поясните конструкцию лампы накаливания.
4. Классификация ламп накаливания.
5. Влияние факторов на основные световые и электрические характеристики ламп накаливания.
6. Почему к концу срока службы лампы накаливания ее световой поток снижается?
7. Почему с увеличением напряжения питания срок службы ламп сокращается?
8. Почему световая отдача ламп накаливания зависит от номинальных мощности и напряжения?
9. Каким образом можно уменьшить распыление нити накала?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучить конструкцию, схему включения и принцип работы люминесцентных ламп низкого давления; исследовать их световые и электрические характеристики.

Газоразрядные лампы – лампы, в которых свет возникает в результате электрического разряда в газе, парах металлов или в смеси газа с парами. К ним относятся лампы люминесцентные, дуговые ртутные (ДРЛ), дуговые ртутные с йодидами металлов (ДРИ), ксеноновые и др.

Люминесцентные лампы (ЛЛ) представляют собой разрядные источники света низкого давления, в которых УФ излучение ртутного разряда преобразуется люминофором в более длинноволновое излучение.

Производство и широкое применение ЛЛ объясняется, во-первых, рядом их достоинств: 1) высокой световой отдачей и большим сроком службы; 2) малой себестоимостью изготовления в связи с высокой степенью механизации, простотой конструкции и доступностью сырья и материалов; 3) благоприятным спектром излучения, обеспечивающим высокое качество цветопередачи; 4) низкими яркостью и температурой поверхности лампы. Во-вторых, характеристики ламп непрерывно улучшались: продолжительность горения увеличилась до 15-18 тыс. ч, световая отдача возросла с 50 до 85 лм/Вт, а спад световой отдачи к концу средней продолжительности горения при этом уменьшился с 40 до 20%.

В то же время ЛЛ малоприспособны для наружного освещения и освещения помещений с высокими потолками, что обусловлено их малой мощностью (в пределах от 4 до 150 Вт), большими размерами ЛЛ, трудностью перераспределения и концентрации их светового потока в пространстве, а также ненадежной работой при низких температурах окружающей среды.

Маркировка ЛЛ в странах СНГ основана на буквенном обозначении их конструктивных признаков. Первая буква – Л – люминесцентная, следующие буквы обозначают цвет излучения: Б – белый, ТБ – тепло-белый, ХБ – холодно-белый, Д – дневной, Е –

естественно белый, УФ – ультрафиолетовый, К, С, З, Г – красный, синий, зеленый, голубой. Одна или две буквы Ц после обозначения цвета означают высокое или еще более высокое качество цветопередачи. Последующие буквенные обозначения отмечают особенности конструкции лампы: Р – рефлекторная, У – U-образная, К – кольцевая, Б – быстрого пуска, А – амальгамная. Цифры, стоящие после букв, обозначают электрическую мощность лампы в ваттах.

Люминесцентная лампа низкого давления конструктивно (рис. 3.1) представляет собой цилиндрическую колбу 5, герметично закрытую с вваренными в ее торцы стеклянными ножками 3. На этих ножках смонтированы вольфрамовые биспирали 4, покрытые слоем оксида (окислов щелочноземельных металлов), обеспечивающего хорошую эмиссию электронов. По концам цилиндра лампа имеет короткие цоколи 2 с полыми штырьками 1, служащими для включения ее в электрическую сеть и к которым припаяны выводы электродов.

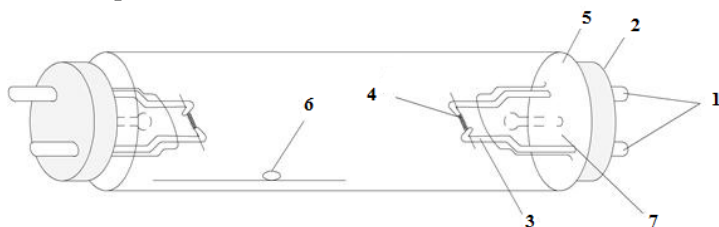


Рис. 3.1. Конструкция люминесцентной лампы низкого давления: 1 – выводные штырьки; 2 – цоколь или концевая панелька; 3 – штампованная стеклянная ножка с электропроводами; 4 – вольфрамовая биспираль (катод с эмиттерным покрытием); 5 – цилиндрическая колба; 6 – ртуть; 7 – трубка для откачки (при изготовлении)

Внутренняя поверхность колбы покрыта тонким слоем люминофора. Наиболее распространенным люминофором является галлофосфат кальция, активированный сурьмой и марганцем. Внутреннее пространство лампы заполнено разряженными парами ртути и инертным газом (аргоном). Назначение аргона состоит в уменьшении распыления покрытия электродов и облегчении зажигания разряда между ними.

Преобразование электрической энергии в видимое излучение происходит в два этапа:

1) преобразование электрической энергии в процессе электрического разряда в парах ртути в энергию ультрафиолетового излучения;

2) преобразование в слое люминофора ультрафиолетового излучения в видимое.

Классификация люминесцентных ламп по характеру разряда в них позволяет выделить лампы дугового разряда с горячими катодами и лампы тлеющего разряда с холодными катодами. В зависимости от способа зажигания люминесцентные лампы могут быть стартерного, безстартерного и мгновенного зажигания. Осветительные люминесцентные лампы бывают общего и специального назначения.

Световые и электрические характеристики люминесцентных ламп меньше зависят от отклонений напряжения питающей сети, чем лампы накаливания (рис. 3.2).

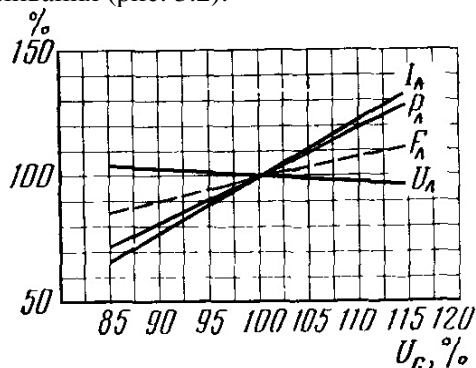


Рис. 3.2. Зависимость световых и электрических характеристик ламп низкого давления от подводимого напряжения

Отклонения напряжения сети в значительных пределах отрицательно сказываются на надежности работы ламп. Так, снижение напряжение более чем на 10% приводит к отказу зажигания, а снижение более чем на 20% — к погасанию горящих ламп.

На работу люминесцентных ламп существенное влияние оказывают факторы окружающей среды. Оптимальным интервалом рабочих температур считается температура воздуха равная 18-25°C. Отклонение ее от указанного диапазона значений приводит к снижению потока излучения и уменьшению эффективной отдачи ламп, а также ухудшаются условия их зажигания. При низких положительных значениях температуры воздуха напряжение зажига-

ния ламп повышается на 20-25%. Увеличение относительной влажности воздуха до 70-90% сопровождается повышением напряжения зажигания ламп.

Порядок выполнения работы. Изучить конструкцию и принцип работы люминесцентной лампы низкого давления. Составить эскиз конструкции люминесцентной лампы и вычертить электрическую схему лабораторной установки для исследования световых и электрических характеристик люминесцентных ламп низкого давления.

В соответствии с рисунком 3.3 собрать электрическую схему для исследования световых и электрических характеристик люминесцентной лампы низкого давления.

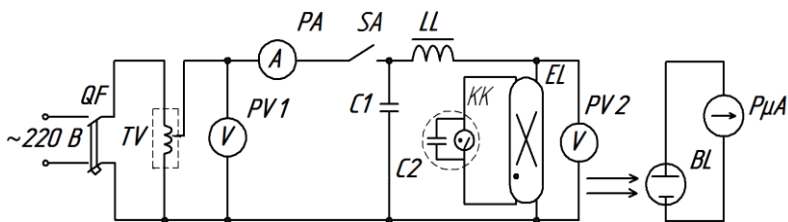


Рис. 3.3. Электрическая схема лабораторной установки для исследования световых и электрических характеристик люминесцентных ламп низкого давления:

QF – рубильник; TV – автотрансформатор; PA – амперметр; $PV1$, $PV2$ – вольтметр; SA – выключатель; EL – люминесцентная лампа низкого давления; BL , $P\mu A$ – люксметр; $C1$ – конденсатор; LL – индуктивное балластное сопротивление (дрозсель); KK – стартер с конденсатором $C2$

Включить люминесцентную лампу низкого давления в сеть и дать ей разгореться в течении 5 минут.

Зависимость тока на лампе и создаваемую ею освещенности от напряжения питания схемы получают, изменяя это напряжение при помощи автотрансформатора. Интервалы изменения напряжения следует принять равными 20 В. Диапазон измерения напряжения выбрать от 160 до 240 В. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Результаты исследования световых и электрических характеристик люминесцентной лампы низкого давления

№ п/п	Опытные данные							Расчетные данные					
	U_{CX}		U_{EL}		I_{EL}		E	P_{EL}		Φ_{EL}		η_V	
	В	%	В	%	А	%	лк	Вт	%	лм	%	лм/Вт	%
1	160												
2	180												
3	200												
4	220	100		100		100			100		100		100
5	240												

По полученным опытным данным рассчитывают следующие величины:

– мощность, Вт, лампы:

$$P_{EL} = U_{EL} \cdot I_{EL}. \quad (3.1)$$

Световой поток лампы может быть определен из геометрии для измерений освещенности E люксметром в точке A (рис. 3.4);

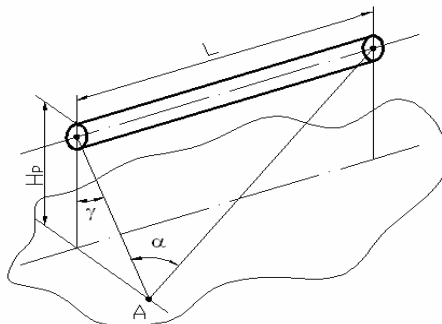


Рис. 3.4. Эскиз для определения освещенности точки A от люминесцентной лампы низкого давления

– световой поток, лм:

$$\Phi_{EL} = \frac{2\pi^2 L H_p E}{[(\alpha + 0,5 \sin 2\alpha) \cos^2 \gamma]}, \quad (3.2)$$

где L – длина люминесцентной лампы, м;

H_p – расстояние от люминесцентной лампы до фотоэлемента, м.

В упрощенных методах расчета значение $\alpha + 0,5 \sin 2\alpha$ определяют графически (рис. 3.5), в зависимости от отношения длины лампы L к расстоянию от лампы до фотоэлемента H_p ;

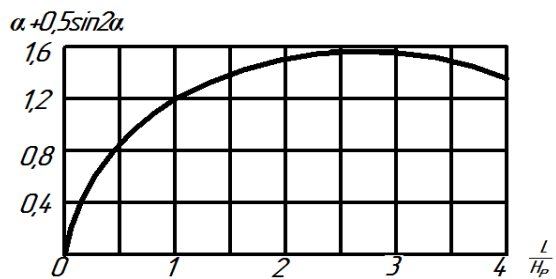


Рис. 3.5. График функции $\alpha + 0,5 \sin 2\alpha$ для расчета освещенности точки от люминесцентной лампы низкого давления

– световую отдачу, лм/Вт:

$$\eta_v = \frac{\Phi_{EL}}{P_{EL}}. \quad (3.3)$$

Для удобства проведения анализа результатов исследований, измеренные и вычисленные значения величин необходимо представить в процентах от их номинальных значений. Результаты расчета занести в таблицу 3.1. По данным таблицы 3.1 построить графики зависимости тока, мощности, напряжения лампы, светового потока и светоотдачи лампы от напряжения схемы, выраженной в процентах. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Расскажите о конструкции люминесцентной лампы, элементов схемы включения и принципе ее работы.
2. Перечислите преимущества и недостатки люминесцентных ламп по сравнению с лампами накаливания.
3. Почему снижается световой поток в конце срока службы люминесцентной лампы?
4. Как происходит преобразование электрической энергии в световой поток в люминесцентных лампах?
5. Как изменяются световые и электрические характеристики люминесцентных ламп низкого давления при изменении напряжения питания?
6. Поясните работу стартера с тлеющим разрядом.
7. Какие внешние условия необходимы для нормальной работы установки с люминесцентными лампами?
8. Для чего предназначены конденсаторы в электрической схеме?
9. Как определить освещенность точки от люминесцентной лампы низкого давления?
10. Дайте физическое объяснение экспериментальным зависимостям, полученным при выполнении работы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПАКТНЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП

Цель работы: изучить конструкцию, схему включения и принцип работы компактных люминесцентных ламп; исследовать их световые и электрические характеристики.

С 80-х годов прошлого столетия светотехническая промышленность начала производство компактных люминесцентных ламп (рис. 4.1) мощностью 5-85 Вт со световой отдачей 30-60 лм/Вт и сроком службы 5-10 тыс. ч.

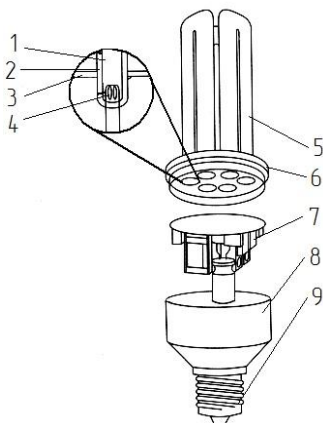


Рис. 4.1. Конструкция компактной люминесцентной лампы:
1 – газ; 2 – стеклянная трубка; 3 – крышка; 4 – термокатод; 5 – трубка;
6 – крышка; 7 – балласт; 8 – корпус; 9 – цоколь

К тому времени были разработаны активированные редкоземельными элементами люминофоры, способные работать при более высоких поверхностных плотностях ультрафиолетового излучения, чем люминофоры стандартных люминесцентных ламп. Это свойство позволило существенно уменьшить как диаметр колбы лампы с 30-40 до 8-13 мм, так и длину колбы. В дополнение к этому цилиндрическую колбу удалось свернуть в спираль или W-образную конструкцию и смонтировать на цилиндрический резьбовой цоколь. В цоколе смонтировали и электронную пускорегулирующую аппаратуру (балласт) лампы.

В большинстве таких ламп используют цоколи E27. Лампы малой мощности выпускают с цоколем E14, а большой – E40.

По сравнению с лампами накаливания КЛЛ теоретически имеют больший срок службы. Однако из-за повышенных требований к качеству изготовления и условиям эксплуатации срок службы КЛЛ на практике может быть соизмерим или даже оказаться меньше срока службы ламп накаливания. Основными причинами, снижающими срок службы лампы, являются нестабильность напряжения в сети, частые включения-выключения лампы, эксплуатация при повышенной или пониженной температуре окружающей среды.

По энергоэффективности (коэффициенту полезного действия) КЛЛ примерно в 5 раз превосходят лампы накаливания. Однако в отличие от ламп накаливания большинство КЛЛ имеют низкое качество энергопотребления, которое характеризуется коэффициентом мощности, равным около 0,5. Низкий коэффициент мощности приводит к искажению формы напряжения в сети, дополнительным нагрузкам и потерям при передаче электроэнергии. Для устранения указанного недостатка электронные пускорегулирующие аппараты (ЭПРА) некоторых ламп снабжаются корректорами коэффициента мощности.

Новые разработки позволили использовать энергосберегающую лампу совместно с устройствами снижения/увеличения освещения (диммерами). Для диммирования компактных люминесцентных ламп светорегуляторы, разработанные для ламп накаливания не подходят – в этом случае следует использовать КЛЛ только со специальными ЭПРА с возможностью управления.

Электронная пускорегулирующая аппаратура преобразует напряжение сети 50 Гц в напряжение высокой частоты 30-100 кГц. Она имеет малые геометрические размеры, позволяет регулировать световой поток, обеспечивает снижение вредного влияния на человека пульсации светового потока, надежное и быстрое зажигание ламп, а также экономичность осветительной установки.

Благодаря применению ЭПРА КЛЛ имеют улучшенные характеристики по сравнению с традиционными люминесцентными лампами – более быстрое включение, отсутствие мерцания и жужжания. Также существуют лампы с системой плавного запуска. Система плавного запуска «прогревает» электроды лампы при включении в течение 1-2 с: это значительно продлевает срок

службы лампы, но все же не позволяет избежать эффекта «временной световой слепоты».

В то же время компактные люминесцентные лампы по габаритам, энергоэффективности и сроку службы проигрывают светодиодным лампам; по световой отдаче значительно уступают металлогалогенным лампам. Индуктивные КЛЛ имеют ещё больший срок службы (15000-18000 ч), слабо зависят от переходных процессов при включении и имеют более широкий температурный диапазон.

К достоинствам компактных люминесцентных ламп относят: высокую светоотдачу; длительный срок службы в непрерывном цикле эксплуатации; возможность создания ламп с различными значениями цветовой температуры, а также ламп различных цветов и мягкого ультрафиолета с высоким КПД; компактность; не создает стробоскопический эффект.

В качестве недостатков отмечают, что они не рассчитаны на частые включения; использование широко распространённых выключателей с подсветкой приводит к периодическому, раз в несколько секунд, кратковременному зажиганию ламп; компактные люминесцентные лампы несовместимы с диммерами обычных типов.

Порядок выполнения работы. Изучить конструкцию и принцип работы компактной люминесцентной лампы. Составить эскиз конструкции лампы и вычертить электрическую схему лабораторной установки, для исследования световых и электрических характеристик компактных люминесцентных ламп.

Используя рисунок 4.2 собрать электрическую схему для исследования световых и электрических характеристик компактных люминесцентных ламп.

Включить компактную люминесцентную лампу в сеть и дать ей разгореться в течении 5 минут.

Изменяя напряжение на зажимах лампы при помощи автотрансформатора, по показаниям приборов снять зависимости тока и освещенности от напряжения. Интервалы изменения напряжения следует принять равными 20 В. Диапазон измерения напряжения выбрать от 160 до 240 В. Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

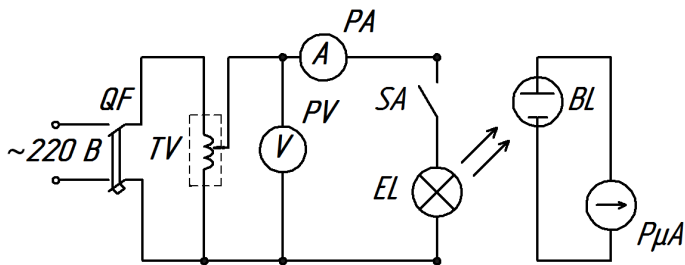


Рис. 4.2. Электрическая схема лабораторной установки для исследования световых и электрических характеристик компактных люминесцентных ламп:

QF – рубильник; TV – автотрансформатор; PA – амперметр; PV – вольтметр; SA – выключатель; EL – компактная люминесцентная лампа; $BL, P\mu A$ – люксметр

Таблица 4.1

Результаты исследования световых и электрических характеристик компактной энергосберегающей люминесцентной лампы

№ п/п	Опытные данные					Расчетные данные					
	U_{CX}		I_{EL}		E	P_{EL}		Φ_{EL}		η_V	
	В	%	А	%	лк	Вт	%	лм	%	лм/Вт	%
1	160										
2	180										
3	200										
4	220	100		100			100		100		100
5	240										

По полученным опытным данным рассчитывают следующие величины:

– мощность, Вт, лампы:

$$P_{EL} = U_{CX} \cdot I_{EL}; \quad (4.1)$$

– световой поток, лм:

$$\Phi_{EL} = \frac{E \cdot \Phi_{ELH}}{E_H}, \quad (4.2)$$

где E_H – освещенность при номинальном напряжении, лк;

Φ_{ELH} – световой поток лампы при номинальном напряжении, лм;

– световую отдачу, лм/Вт:

$$\eta_V = \frac{\Phi_{EL}}{P_{EL}}. \quad (4.3)$$

Для удобства проведения анализа результатов работы, измеренные и вычисленные величины необходимо представить в процентах от номинальных значений. Результаты расчета занести в таблицу 4.1. По данным таблицы 4.1 построить графики зависимости тока, мощности, светового потока и светоотдачи от напряжения на лампе, выраженной в процентах. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Поясните конструкцию компактной люминесцентной лампы.
2. Поясните принцип работы компактной люминесцентной лампы.
3. Сравните вольтамперные характеристики ламп накаливания, люминесцентной трубчатой и компактной люминесцентной лампы.
4. Объясните снижение световой отдачи компактной люминесцентной лампы при увеличении напряжения питания.
5. Перечислите достоинства и недостатки компактных люминесцентных ламп.
6. Объясните для чего необходимо увеличение частоты тока.
7. Как определяют световой поток компактной люминесцентной лампы?
8. Какой срок службы компактных люминесцентных ламп?
9. Какие внешние условия необходимы для нормальной работы компактных люминесцентных ламп?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ИЗУЧЕНИЕ СВЕТОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДУГОВОЙ РТУТНОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: изучить конструкцию дуговой ртутной люминесцентной лампы высокого давления типа ДРЛ, электрическую схему и пускорегулирующую аппаратуру для включения ее в сеть; исследовать процессы зажигания и принцип работы лампы.

Дуговая ртутная лампа ДРЛ предназначена для наружного освещения, закрытых помещений и объектов, где не требуется высокого качества цветопередачи.

Лампы типа ДРЛ. Условное обозначение ламп: Д – дуговая, Р – ртутная, Л – люминесцентная. Цифры после букв соответствуют мощности лампы в ваттах, далее в скобках – «красное отношение» (отношение светового потока в красной области спектра (600-780 нм) к общему световому потоку лампы), цифра через дефис – номер разработки.

Принцип действия основан на преобразовании УФ излучения ртутного разряда высокого давления, составляющего около 40% всего потока излучения, при помощи люминофора в недостающее излучение в красной части спектра.

Лампы типа ДРЛ по сравнению с лампами накаливания обладают рядом существенных преимуществ, основным из которых является высокая световая отдача. В связи с плохой цветопередачей лампы ДРЛ рекомендуется применять для наружного освещения и в высоких (от 12 до 18 м) производственных помещениях, в которых выполняемая работа не связана с различением цветов, например, в машиностроительной, металлургической промышленности, в судостроении и т.п. Лампы ДРЛ можно с успехом использовать для освещения горячих цехов, для цехов, где выполняются работы, требующие общего наблюдения за ходом технологического процесса, при грубых работах, а также при работах средней точности, не требующих большого напряжения зрения.

Конструкция лампы ДРЛ представлена на рисунке 5.1. Лампа содержит горелку 1 в виде трубки из кварцевого стекла с основными 2 и дополнительными 4 вольфрамовыми электродами в торцах. Дополнительные электроды подключены через токоограничи-

вающие резисторы 3 к основным электродам на противоположном конце горелки. В полости горелки содержатся аргон и дозированное количество ртути. Внешняя колба 5 выполнена из термостойкого стекла и изнутри покрыта слоем люминофора 6. Форма колбы обеспечивает во время горения лампы температуру, необходимую для эффективной работы люминофора, и равномерное распределение ее по поверхности. Полость колбы заполнена углекислым газом для стабилизации свойств люминофора.

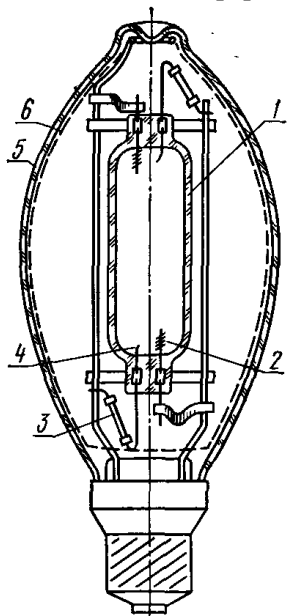


Рис. 5.1. Конструкция лампы ДРЛ

При подаче напряжения на лампу между близко расположенными основными и дополнительными электродами возникает разряд, который ионизирует находящийся в горелке газ, обеспечивая зажигание разряда между основными электродами. После разжигания лампы разряд между основными и вспомогательными электродами прекращается. Пускорегулирующий аппарат представляет собой индуктивное балластное сопротивление (дрозсель), который ограничивает ток разряда и стабилизирует его при отклонениях напряжения сети в допустимых пределах.

В момент зажигания ток лампы в 2-2,6 раза превышает номинальный, но по мере разогрева горелки он постепенно уменьшает-

ся, а напряжение на лампе возрастает с 65 до 130 В, при этом мощность лампы и ее поток излучения возрастают. Разгорание лампы длится 5-10 мин. В рабочем режиме температура внешней колбы может превышать 200°С. Повторное зажигание лампы ДРЛ возможно только спустя 10-15 мин после погасания.

Влияние отклонений напряжения от номинального значения на режим работы лампы показано на рисунке 5.2.

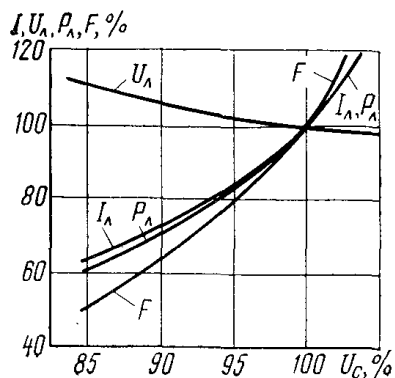


Рис. 5.2. Зависимость световых и электрических характеристик лампы ДРЛ от значения подводимого напряжения

Благодаря тому, что горелка лампы находится в газонаполненном пространстве внешней колбы и имеет во время работы весьма высокую температуру, условия окружающей среды не оказывают существенного влияния на надежность зажигания и световые характеристики лампы. Лампа ДРЛ нормально работает при температурах окружающего воздуха от $-40 \dots +80^\circ\text{C}$.

Порядок выполнения работы. Изучить конструкцию и принцип работы лампы ДРЛ. Составить эскиз конструкции лампы и электрической схемы лабораторной установки для исследования световых и электрических характеристик дуговой ртутной люминесцентной лампы высокого давления.

Используя рисунок 5.3 собрать электрическую схему для исследования световых и электрических характеристик дуговой ртутной люминесцентной лампы высокого давления.

Включить схему на номинальное напряжение сети, лампа начнет разгораться. Через каждые 60 с, вплоть до установившегося режима, характеризующегося неизменяющимися значениями,

прежде всего тока и напряжения на лампе, необходимо измерять ток лампы E_{EL} , напряжение на лампе U_{EL} и освещенность E . Освещенность измеряют люксметром в точке, лежащей на перпендикуляре к оси лампы, проведенном через ее центр. Освещенность определяют как разность показаний люксметра при выключенной и включенной лампе. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

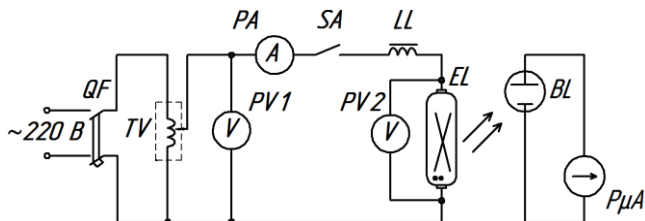


Рис. 5.3. Электрическая схема лабораторной установки для исследования световых и электрических характеристик дуговой ртутной люминесцентной лампы типа ДРЛ:

QF – рубильник; TV – автотрансформатор; PA – амперметр; $PV1, PV2$ – вольтметр; SA – выключатель; EL – люминесцентная лампа высокого давления (ДРЛ); $BL, P\mu A$ – люксметр; LL – индуктивное балластное сопротивление (дроссель)

Таблица 5.1
Результаты исследования разгорания лампы ДРЛ

№ п/п	Опытные данные						Расчетные данные				
	t		U_{EL}		I_{EL}		E	P_{EL}		Φ_{EL}	
	с	%	В	%	А	%	лк	Вт	%	лм	%
1	60										
2	120										
3	180										
4	240										
5	300										
6	360	100		100		100			100		100

По полученным опытным данным рассчитывают следующие величины:

– мощность, Вт, лампы:

$$P_{EL} = U_{EL} \cdot I_{EL}; \quad (5.1)$$

– световой поток, лм, лампы:

$$\Phi_{EL} = \frac{E \cdot \Phi_{vH}}{E_H}, \quad (5.2)$$

где E_H – освещенность при номинальном напряжении, лк;

$\Phi_{\text{вн}}$ – световой поток лампы при номинальном напряжении, лм.

По данным таблицы 5.1 построить в процентах зависимости U_{EL} , I_{EL} , P_{EL} , Φ_{EL} лампы за время ее разгорания.

После разгорания лампы, снижая последовательно напряжение питания схемы от 240 В до 190 В ступенчато по 10 В, снять зависимости световых и электрических характеристик лампы от напряжения питания. Результаты измерений и вычислений записать в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

*Результаты исследования световых
и электрических характеристик лампы ДРЛ*

№ п/п	Опытные данные							Расчетные данные					
	U_{CX}		U_{EL}		I_{EL}		E	P_{EL}		Φ_{EL}		η_V	
	В	%	В	%	А	%	лк	Вт	%	лм	%	лм/Вт	%
1	190												
2	200												
3	210												
4	220	100		100		100			100		100		100
5	230												
6	240												

По данным таблицы 5.2 построить графики зависимости напряжения, тока, мощности, светового потока и светоотдачи лампы от напряжения схемы, выраженной в процентах. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Поясните конструкцию лампы ДРЛ.
2. Назначения дополнительных электродов в горелке ламп ДРЛ.
3. Назовите область применения ламп ДРЛ.
4. Перечислите достоинства и недостатки ламп ДРЛ в сравнении с другими источниками оптического излучения.
5. Объясните характер изменения параметров ламп ДРЛ при разгорании.
6. Дайте физическое объяснение расчетным и экспериментальным зависимостям, полученным при выполнении работы.
7. Почему при зажигании лампы разряд между основными и дополнительными электродами прекращается?
8. Как влияют условия окружающей среды на световые и электрические характеристики ламп высокого давления?
9. Перечислите достоинства и недостатки ламп ДРЛ.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ИЗУЧЕНИЕ БАЛЛАСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ЛАМП

Цель работы: изучить конструкцию, схемы включения и принцип работы балластных сопротивлений; исследовать их электрические характеристики.

Газоразрядные лампы используются в качестве источников света и источников ультрафиолетовых лучей области B . Они представляют собой лампы низкого давления с самонакаливающимися оксидными катодами и рассчитаны на работу в сети переменного тока. Газоразрядные лампы имеют вид прямых трубок, изготовленных из обычного или увиолевого стекла. Внутренняя поверхность трубок покрыта специальным составом – люминофором. На концах трубки расположены электроды лампы. Газоразрядные лампы включаются в сеть только последовательно с токоограничивающим индуктивным сопротивлением L (дресселем) или активным сопротивлением R (реостатом).

Зажигание лампы осуществляется с помощью стартера, представляющего собой специальную неоновую лампочку тлеющего разряда. Стартер состоит из стеклянной колбочки, заполненной неоном. Внутри колбочки расположены два электрода: один из которых выполнен в виде биметаллической пластинки. Для уменьшения искрения и снижения радиопомех параллельно с электродами стартера включен конденсатор ёмкостью $0,05$ мкФ.

Зажигание лампы осуществляется следующим образом: в момент включения цепи стартер оказывается под полным напряжением сети. В нем возникает тлеющий, а затем дуговой разряд, разогревающий электроды. Биметаллический электрод от нагревания изгибается и соприкасается с другим электродом. Стартер при этом закорачивается и включает ток, разогревавший катоды люминесцентной лампы. После прекращения разряда в стартере его электроды охлаждаются и снова размыкаются. В момент размыкания цепи на дросселе возникает импульс напряжения, который легко пробивает промежуток между раскаленными электродами лампы и зажигает её. Эксплуатировать лампы необходимо при температуре окружающей среды $18-25^{\circ}\text{C}$. При температуре ниже 5°C зажигание может не произойти. Для нормальной работы

требуется стабильное напряжение. Колебание напряжения сети сокращает срок службы лампы. Отдача излучений уменьшается приблизительно пропорционально понижению напряжения; при понижении напряжения на 10 % лампа может не зажечься.

Из-за падающей вольтамперной характеристики электрического разряда, для стабилизации режима работы газоразрядных ламп, в разрядную цепь лампы необходимо включать токоограничивающее балластное сопротивление, которое может быть активным, индуктивным (большинство ламп), емкостным или их комбинацией, а также электронным.

Стабилизация разряда на переменном токе при помощи активного сопротивления, несмотря на простоту и дешевизну, имеет ряд принципиальных недостатков.

На рисунке 6.1, *a* приведены кривые мгновенных значений напряжений и тока лампы при включении ее с активным балластным сопротивлением в цепь переменного тока промышленной частоты. Разряд в лампе возникает по достижении напряжением мгновенного значения, равного U_3 . В процессе разряда напряжение на лампе значительно снижается до значения U_r , требующегося для поддержания разряда, и остается неизменным до момента, когда мгновенное значение напряжения сети уменьшится до значения U_H . После этого разряд гаснет, ток в цепи прекращается. В следующий полупериод процесс зажигания и погасания разряда повторяется. Перезажигание разряда в каждый полупериод сопровождается паузами тока: начальной φ_H и конечной φ_K . Общая продолжительность паузы $\varphi_H + \varphi_K$ может достигать 1/3 периода. Паузы разрядного тока значительно ухудшают показатели работы источника излучения и являются причиной возникновения пульсаций потока излучения и стробоскопического эффекта. Кривая мгновенных значений тока утрачивает форму синусоиды – искажается. Если при этом увеличивается коэффициент амплитуды, то срок службы электродов уменьшается вследствие ускоренного распыления оксидного слоя и потери эмиссионных свойств. Другим значительным недостатком является большой расход электрической энергии в активном балластном сопротивлении.

Стабилизация разряда посредством индуктивного сопротивления имеет ряд преимуществ, перед стабилизацией при активном сопротивлении, и из-за этого ее более широко применяют. На ри-

показаны кривые мгновенных значений тех же величин, но при индуктивном балластном сопротивлении.

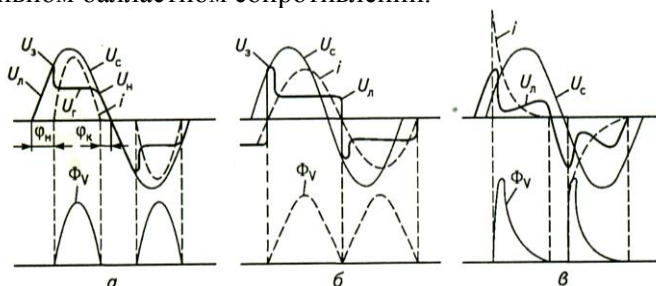


Рис. 6.1. Осциллограммы мгновенных значений напряжений, тока и светового потока газоразрядной лампы:

а – при активном балластном сопротивлении; б – при индуктивном балластном сопротивлении; в – при емкостном балластном сопротивлении

Благодаря сдвигу по фазе между напряжением сети и на зажимах лампы значительно облегчается процесс перезажигания разряда в каждый полупериод, так как в момент перехода тока через нулевое значение к зажимам лампы оказывается приложенным значительное мгновенное напряжение сети. Поэтому перезажигание разряда происходит без заметной паузы. Форма кривой тока приближается к синусоиде, и режим работы электродов облегчается. Потери мощности в индуктивном балластном сопротивлении, обычно значительно ниже, чем в активном, и составляют значение 10 - 35% от мощности источника излучения. Наряду с отмеченными преимуществами индуктивного балластного сопротивления имеются и недостатки, основные из которых: большой расход металла, низкий коэффициент мощности, высокая стоимость.

Стабилизацию разряда при помощи емкости применяют редко. Соответствующие этому случаю кривые показаны на рисунке 6.1, в. Кривая тока приобретает чрезвычайно искаженную форму. Срок службы электродов резко снижается. Большие паузы и всплески тока приводят к значительному снижению светотехнических показателей работы лампы.

В отличие от индуктивного балласта для работы электронного балласта обычно не требуется отдельный специальный стартер, так как такой балласт в общем случае способен сформировать необходимые последовательности напряжений сам. Существуют

различные способы запуска люминесцентных ламп. Чаще всего электронный балласт подогревает катоды ламп и прикладывает к катодам напряжение, достаточное для зажигания лампы, обычно – переменное и более высокой частоты, чем сетевое (что заодно устраняет мерцание лампы, характерное для электромагнитных балластов). В зависимости от конструкции балласта и временных параметров последовательности запуска лампы такие балласты могут обеспечивать, например, плавный запуск лампы, с постепенным нарастанием яркости до полной, за несколько секунд или же ее мгновенное включение. Часто встречаются комбинированные методы запуска, когда лампа запускается не только за счет факта подогрева катодов лампы, но и за счет того, что цепь, в которую включена лампа, является колебательным контуром. Параметры колебательного контура подбираются так, что при отсутствии разряда в лампе в контуре возникает явление электрического резонанса, ведущее к значительному повышению напряжения между катодами лампы. Как правило, это ведет и к росту тока подогрева катодов, поскольку при такой схеме запуска спирали накала катодов нередко соединены последовательно через конденсатор, являясь частью колебательного контура. В результате за счет подогрева катодов и относительно высокого напряжения между катодами лампа легко зажигается. После зажигания лампы параметры колебательного контура изменяются, резонанс прекращается, и напряжение в контуре значительно падает, сокращая ток накала катодов. Существуют вариации данной технологии. Например, в предельном случае балласт может вообще не подогревать катоды, вместо этого приложив достаточно высокое напряжение к катодам, что неизбежно приведет к почти мгновенному зажиганию лампы за счет пробоя газа между катодами. По сути, этот метод аналогичен технологиям, применяемым для запуска ламп с холодным катодом.

Выписка из ГОСТ 16809-71 определяет следующие положения:

1) Балластные устройства по ГОСТ (16809-71) применяются совместно со стартерами для обеспечения режима пуска и стабилизации разряда люминесцентных ламп при включении их в сеть переменного тока частотой 50 Гц и с номинальным напряжением 127, 220, 380 В.

2) Устройства балластные (УБ) изготавливаются следующих типов: УБИ – устройства балластные индуктивные, изменяющие низкий коэффициент мощности и потребляющие из сети ток, отстающий по фазе от напряжения; УБК – устройства балластные компенсированные, имеющие коэффициент мощности, близкий к 1, УБЕ – устройства балластные емкостные, имеющие низкий коэффициент мощности и потребляющие из сети ток, опережающий по фазе напряжение.

3) По наличию сдвига фаз между токами ламп устройства балластные разделяются на не имеющие сдвига фаз *A* и имеющие его.

4) По конструктивному исполнению встроенные (открытые) *B* и независимые (закрытые) *H*.

5) По уровню шума и радиопомех балластные устройства разделяются на следующие:

а) устройства с нормальным уровнем шума и радиопомех, предназначенные для эксплуатации только в промышленных помещениях;

б) устройства с пониженным уровнем шума и радиопомех *П*, предназначенные для эксплуатации в административно-служебных и бытовых помещениях.

б) Условное обозначение балластного устройства должно включать в себя:

а) слова «устройство балластное»;

б) цифру, определяющую число ламп, включаемых с устройством;

в) трехбуквенное обозначение типа устройства по сдвигу фаз (УБИ, УБК, УБЕ);

г) дробь, числитель которой – номинальная мощность лампы, знаменатель – напряжение сети;

д) при наличии сдвига фаз между лампами, обеспечивающего снижение стробоскопического эффекта, после дроби добавляется буква *A*;

е) однобуквенное обозначение конструктивного исполнения;

ж) при выполнении УБ с пониженным уровнем шума и радиопомех после однобуквенного обозначения конструктивного исполнения добавляется буква *П*;

з) номер стандарта – ГОСТ 1680Ф-71. Пример условного обозначения двухлампового компенсированного устройства к лампам мощностью 40 Вт для включения в однофазную сеть 220 В со

сдвигом фаз между токами ламп, встроенного исполнения с нормальным уровнем шума, например: *Устройство балластное 2УБК-40/220 АВ ГОСТ 16809-71.*

Порядок выполнения работы. Изучить конструкцию и принцип работы балластных сопротивлений. Вычертить электрические схемы лабораторных установок для исследования электрических характеристик индуктивного и электронного УБ.

Используя рисунок 6.2 собрать электрическую схему для исследования электрических характеристик индуктивного балластного сопротивления.

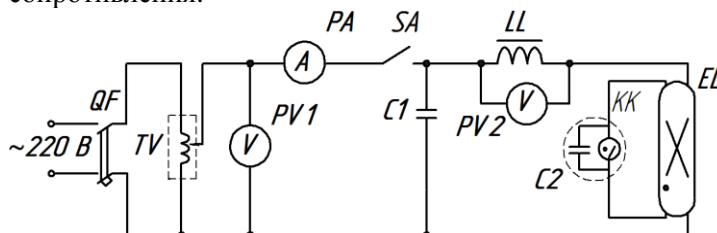


Рис. 6.2. Электрическая схема лабораторной установки для исследования электрических характеристик индуктивного балластного сопротивления:

QF – рубильник; *TV* – автотрансформатор; *PA* – амперметр; *PV1*, *PV2* – вольтметр; *SA* – выключатель; *EL* – люминесцентная лампа низкого давления; *C1* – конденсатор; *LL* – индуктивное балластное сопротивление (дрессель); *KK* – стартер с конденсатором *C2*

Включить люминесцентную лампу в сеть и дать ей разгореться в течении 5 мин. Электрические характеристики индуктивного балластного сопротивления снимают, изменяя при помощи автотрансформатора напряжение на зажимах схемы со 160 и до 240 В, с интервалом 20 В. Показания приборов записывают в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

Результаты исследования электрических характеристик балластных сопротивлений

Вид балластного сопротивления	Опытные данные				Расчетные данные		
	U_{CX}		U_{LL}	I_{CX}	P_{CX}	P_{LL}	ΔP
	В	%	В	А	Вт	Вт	%
Индуктивное	160						
	180						
	200						
	220	100					
	240						

Электронное	160						
	180						
	200						
	220	100					
	240						

По рисунку 6.3 собрать электрическую схему для исследования электрических характеристик электронного балластного сопротивления.

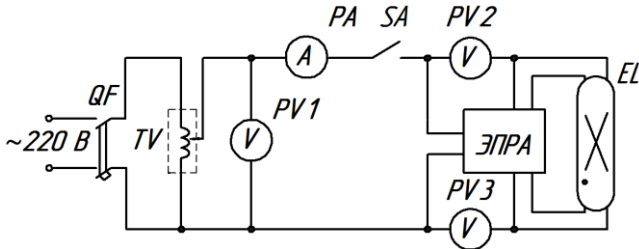


Рис. 6.3. Электрическая схема лабораторной установки для исследования электрических характеристик электронного балластного сопротивления (ЭПРА):

QF – рубильник; TV – автотрансформатор; PA – амперметр; $PV1, PV2, PV3$ – вольтметр; SA – выключатель; EL – люминесцентная лампа низкого давления; ЭПРА – электронное балластное сопротивление (ЭПРА)

Включить люминесцентную лампу в сеть и дать ей 5 минут разгореться.

Изменяя при помощи автотрансформатора напряжение на зажимах схемы со 160 и до 240 В, с интервалом 20 В, снять показания приборов. Результаты опыта записывают в таблицу 6.1.

По полученным опытным данным рассчитывают следующие величины:

– мощность, Вт, схемы:

$$P_{CX} = U_{CX} \cdot I_{CX}, \quad (6.1)$$

где U_{CX} – напряжение на зажимах схемы, В;

I_{CX} – ток в схеме, А;

– мощность, Вт, индуктивного балластного сопротивления:

$$P_{LLi} = U_{LLi} \cdot I_{CX}, \quad (6.2)$$

где U_{LLi} – напряжение на зажимах индуктивного балластного сопротивления, В;

– мощность, Вт, электронного балластного сопротивления:

$$P_{LLe} = U_{LLe} \cdot I_{CX}, \quad (6.3)$$

где U_{LLe} – напряжение на зажимах электронного балластного сопротивления, равное:

$$U_{LLe} = U_{LLe1} + U_{LLe2}, \quad (6.4)$$

где U_{LLe1} – напряжение на зажимах электронного балластного сопротивления, первого электрода, В;

U_{LLe2} – напряжение на зажимах электронного балластного сопротивления, второго электрода, В;

– потери мощности, Вт, «схема – балластное сопротивление»:

$$\Delta P = \frac{P_{CX} - P_{LL}}{P_{CX}} \cdot 100\%. \quad (6.5)$$

По данным таблицы 6.1 построить графики зависимости $\Delta P = f(U_{CX})$ для индуктивного и электронного балластного сопротивления, выраженные в процентах. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Назначение балластного сопротивления.
2. Какие достоинства и недостатки имеет индуктивный балласт?
3. Какие достоинства и недостатки имеет активный балласт?
4. Какие внешние условия необходимы для нормальной работы установки с люминесцентными лампами?
5. Перечислите достоинства и недостатки емкостного балласта.
6. Перечислите достоинства и недостатки электронного балласта.
7. Дайте характеристику полученной зависимости параметра балластов от подводимого напряжения.
8. Перечислите способы запуска люминесцентных ламп.
9. Поясните работу стартера.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

ИЗУЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУЛЬСАЦИИ СВЕТОВОГО ПОТОКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ ВКЛЮЧЕНИЯ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ ЛАМП НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ

Цель работы: провести сравнительный анализ различных схем включения люминесцентных ламп низкого давления, снижающих коэффициент пульсации светового потока.

Правильно спроектированное и выполненное освещение обеспечивает сохранность зрения человека, его центральной нервной системы, а также повысить безопасность на производстве и производительности труда.

Наилучшим для зрения человека является естественное освещение. Однако в темное время суток, при неблагоприятных погодных условиях, а также при совмещении различных систем освещения не обойтись без искусственного, осуществляемого электрическими источниками света.

Глаз человека воспринимает узкую часть оптического диапазона – с длинами электромагнитных волн 380-770 нм. Излучение с длиной волны свыше 770 нм – инфракрасное, с длиной волны менее 380 нм – ультрафиолетовое. Изменение длины волны излучения внутри видимого диапазона, человеческий глаз воспринимает как изменение цвета: от темно-фиолетового на нижней границе диапазона до темно-красного – на верхней. Важно и то, что одинаковая интенсивность видимого света с разными длинами волн может вызвать различный уровень зрительных ощущений. Наиболее чувствительно зрение человека к излучению с длиной волны 555 нм (середина видимого диапазона, желто-зеленый цвет). К границам видимой части спектра восприятие уменьшается до нуля.

Анализ системы светотехнических величин удобнее начать со светового потока. Световой поток Φ – мощность лучистой энергии, излучаемой источником во всех направлениях. Казалось бы, единицей измерения светового потока должна быть системная единица мощности – ватт. Однако световой поток оценивается по зрительному ощущению, которое испытывает глаз человека. Из двух источников, излучающих в пространство одинаковую мощность (в ваттах), но на разных длинах волн, например, в красной (близкой к границе видимого диапазона) и зеленой

(в середине видимого диапазона) частях спектра, большой световой поток создает «зеленый» источник, так как человеческое зрение к нему более восприимчиво. Поэтому световой поток измеряют в специальных единицах – люменах (лм). Следует особо подчеркнуть, что световой поток является параметром источника света, а не характеристикой условий зрительной работы.

Основной характеристикой условий зрительной работы является освещенность E – отношение светового потока $d\Phi$, падающего на малый элемент поверхности, к площади этого элемента dS : $E = d\Phi/dS$. За единицу освещенности принят люкс (лк): $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$. Именно освещенность количественно оценивает бытовые понятия «много света – мало света», а создание достаточной по значению освещенности в первую очередь обеспечивает комфортные зрительные условия.

Основным (количественным) нормируемым показателем для искусственного освещения является минимальная освещенность рабочей поверхности. Согласно СНиП 23-05-95 нормы освещенности E_H зависят от разряда зрительной работы. Для зрительной работы наивысшей точности (разряд I) размер объекта различения менее 0,15 мм, для грубой работы (разряд VI) – свыше 5 мм (к разрядам VII и VIII относятся работа со светящимися объектами и общие наблюдения соответственно).

Кроме освещенности нормируются и качественные характеристики искусственного освещения. Наиболее значимыми из них являются показатель ослепленности и коэффициент пульсации освещенности.

Так как ознакомление с коэффициентом пульсации освещенности является основной задачей настоящей лабораторной работы, остановимся на нем подробнее. Значение протекающего через лампу переменного тока дважды за период становится нулевым. В эти моменты мгновенное значение излучаемого лампой светового потока в той или иной степени уменьшается. Таким образом, световой поток пульсирует с частотой, равной удвоенной частоте питающего напряжения (чаще всего – 100 Гц). Пульсация светового потока порождает пульсацию освещенности. При достаточно большой глубине пульсации видимое человеком изображение объектов (да и всей окружающей обстановки) как бы разбивается на кадры (вспомним, что в кино 24 кадра в секунду, здесь – 100). Поэтому может возникнуть стробоскопический эффект,

проявляющийся в искажении восприятия быстро движущихся или вращающихся объектов. Объект может восприниматься как вращающийся с меньшей скоростью, в обратном направлении или даже казаться неподвижным (как колеса перемещающихся автомобилей в кино). Это явление не только ухудшает условия зрительной работы, но и приводит к увеличению опасности травматизма на производстве. Поэтому величина K_{II} не должна превышать 10% для зрительных работ I и II разрядов, 15% – для разряда III и 20% – в остальных случаях. На экранах мониторов компьютеров (и бытовых телевизоров), как и в кино, имеет место покадровое разбиение изображения (кадровая развертка). Поэтому для устранения негативных зрительных эффектов необходимо снижать пульсацию освещенности экрана от внешних источников в еще большей степени. Уменьшение K_{II} может быть достигнуто:

- правильным выбором источника (типа лампы);
- смещением фазы тока для части ламп с помощью последовательно подключаемых к ним балластных – индуктивных или емкостных (конденсаторов) – сопротивлений (например, для одной из люминесцентных ламп в двухламповом светильнике);
- смещением фазы питающего соседние светильники (еще лучше – разные лампы в одном многоламповом светильнике) напряжения, для чего их включают в две или три разные фазы осветительной сети (трехфазное подключение эффективнее – величина K_{II} снижается в большей степени);
- добавлением к общему освещению, осуществляемому газоразрядными лампами, светильников местного освещения с лампами накаливания, для которых значение K_{II} намного меньше вследствие тепловой инерции;
- увеличением частоты питающего напряжения (при этом проявляется инерционность излучения света и для газоразрядных ламп).

Необходимость в мероприятиях по уменьшению величины K_{II} и выбор соответствующих средств во многом зависит от типа ламп.

В настоящее время основными типами являются лампы накаливания и газоразрядные (разрядные).

Широкое применение ламп накаливания объясняется следующими их преимуществами: просты в изготовлении, компактны и удобны в эксплуатации, включаются в сеть без дополнительных пусковых приспособлений, могут работать при снижении

напряжения в сети, мало зависят от температуры окружающей среды, световой поток к концу срока службы снижается незначительно (приблизительно на 15%), глубина пульсации светового потока невелика (величина K_{II} порядка 7-9%). Последнее обуславливает их широкое применение в качестве источников местного освещения (в частности, на металлорежущих станках).

В газоразрядных лампах световое излучение генерируется электрическим разрядом в атмосфере инертных газов и паров металлов, а также в результате явления люминесценции. Эти лампы делятся на два основных вида: газоразрядные лампы высокого давления (ГЛВД) и люминесцентные (ЛЛ), называемые также газоразрядными лампами низкого давления. ГЛВД применяются в условиях, когда требуется высокая световая отдача при компактности источника света и стойкости к неблагоприятным условиям внешней среды. Их основные разновидности: дуговые ртутные люминесцентные ДРЛ, металлогалогенные ДРИ, натриевые ДНаТ. Ксеноновые лампы ДКсТ из-за высокой мощности (от 5 кВт) внутри зданий не применяются. Общая черта ГЛВД – малые размеры светящегося тела (как и у ламп накаливания), как правило, при высокой мощности, т. е. большая яркость, оказывающая ослепляющее действие (у ламп ДРЛ в несколько меньшей степени, так как свет излучает вся покрытая люминофором колба). Поэтому ГЛВД применяются для больших и высоких помещений.

Люминесцентные лампы, напротив, имеют большие размеры при малой яркости светящейся поверхности. Поэтому ЛЛ, учитывая их малую единичную мощность, применяются для небольших помещений при относительно малой высоте подвеса. В ЛЛ генерируемое электрическим разрядом в парах ртути ультрафиолетовое излучение попадает на покрывающий трубку изнутри слой люминофора, сообщая ему первичную энергию для свечения в видимом диапазоне. Составом люминофора можно изменять спектр излучения. Основные типы ЛЛ (в порядке расширения спектра и приближения его к солнечному): белого света (ЛБ), дневного света (ЛД) и дневного света с улучшенной цветопередачей (ЛДЦ). При необходимости правильного различения цветовых оттенков следует применять лампы ЛДЦ.

Для контроля качественных характеристик искусственного освещения используются комбинированные приборы: люксметры-

яркометры и люксометры-пульсаметры (позволяют помимо освещенности определять величину коэффициента пульсации $K_{П}$).

Порядок выполнения работы. Изучить двухламповую схему включения люминесцентных ламп низкого давления [1, 2]. Вычертить электрическую схему лабораторной установки для исследования коэффициента пульсации.

Используя рисунок 7.1 собрать электрическую схему для изучения коэффициента пульсаций при различных схемах включения люминесцентных ламп низкого давления.

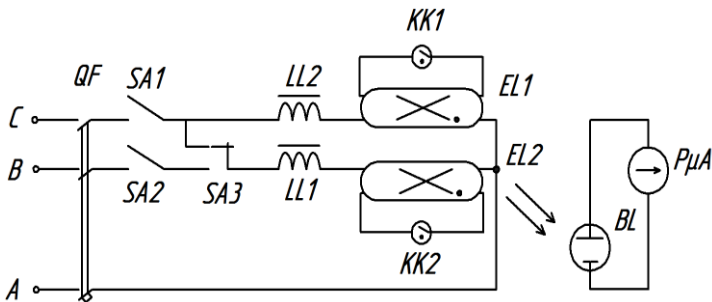


Рис. 7.1. Электрическая схема лабораторной установки для изучения коэффициента пульсаций светового потока при различных схемах включения люминесцентных ламп:

QF – рубильник; *SA1*, *SA2* – выключатель; *SA3* – переключатель;
EL1, *EL2* – люминесцентная лампа низкого давления; *BL*, *PμA* – люксметр;
LL1, *LL2* – индуктивное балластное сопротивление (дроссель);
KK1, *KK2* – стартер

Включить люминесцентные лампы в трехфазную сеть и дать им разгореться в течении 5 минут. Измерить максимальное и минимальное значение освещенности, данные занести в таблицу 7.1.

Включить две люминесцентных лампы в двухфазную сеть. Измерить максимальное и минимальное значение освещенности, данные занести в таблицу 7.1.

Таблица 7.1

Результаты исследования коэффициента пульсации при различных схемах включения люминесцентных ламп

Схема питания	Опытные данные		Расчетные данные
	E_{max} , лк	E_{min} , лк	K_{II} , %
Двухфазная			
Трехфазная			

По полученным опытным данным рассчитать коэффициент пульсации светового потока

$$K_{II} = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \cdot 100\%. \quad (7.1)$$

Провести анализ полученных результатов для двух вариантов схем: двухфазной и трехфазной. Проанализировать полученные результаты и сформулировать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что такое пульсация светового потока?
2. Чем и как оценивают пульсацию светового потока?
3. Поясните работу стартера.
4. Поясните работу индуктивного балластного сопротивления.
5. Поясните, в чем заключается стробоскопический эффект.
6. Назовите методы снижения пульсации светового потока.
7. Поясните, почему вредны пульсации светового потока для человека?
8. Как зависит коэффициент пульсации светового потока от типа люминесцентных ламп?
9. Какие внешние условия необходимы для нормальной работы установки с люминесцентными лампами?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

ИЗУЧЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТИЛЬНИКОВ

Цель работы: изучить конструкцию, световые характеристики и область применения светильников с лампами накаливания.

Светильник (осветительный прибор) представляет собой совокупность устройств, обеспечивающих оптимальное использование источника света (лампы) для достижения требуемой освещенности освещаемой поверхности. В состав светильника входят патроны для присоединения ламп, отражатели для направления светового потока, плафоны и рассеиватели для придания световому потоку заданных свойств и для защиты ламп и патронов от внешних воздействий, пускорегулирующая аппаратура для зажигания ламп, а также различные крепежные и защитные элементы.

Многие источники света обладают большой яркостью, от слепящего действия которой необходима защита. Кроме этого, источники света, как правило, распределяют свой световой поток по всем направлениям, в то время как требуется, чтобы он был направлен на конкретно освещаемые поверхности. Часто приходится защищать источник света от механических повреждений и разрушающего действия окружающей среды.

Эти причины заставляют использовать световые приборы, представляющие собой совокупность источника света и устройства, предназначенного для его крепления, включения в сеть, перераспределения светового потока, ограничения слепящего действия, защиты от механических повреждений и воздействия окружающей среды.

Световой прибор, предназначенный для освещения объектов, находящихся от него на сравнительно небольших расстояниях (менее 20-кратных размеров светового прибора), называется *светильником*, а для более дальнего действия – *прожектором*.

Основными характеристиками каждого светильника являются:

- 1) светораспределение;
- 2) защитный угол;
- 3) коэффициент полезного действия.

Светораспределение светильников общего освещения описывается продольной кривой силы света (рис. 8.1).

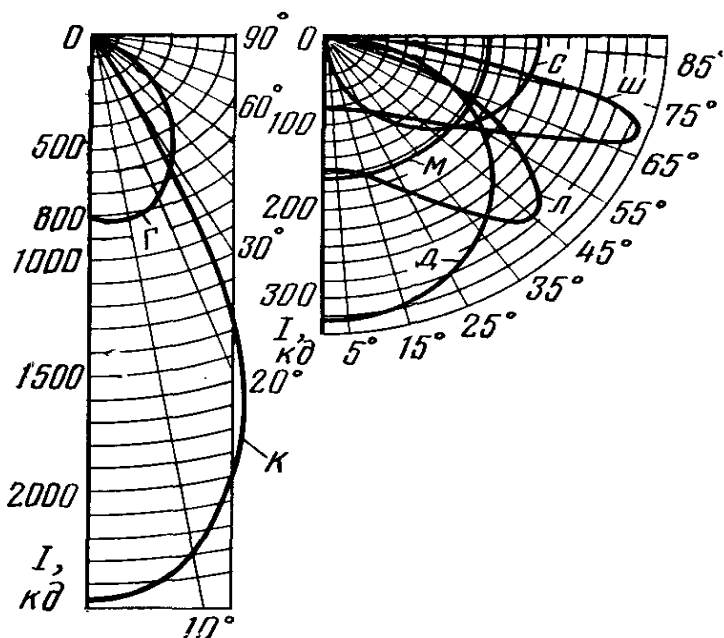


Рис. 8.1. Типы кривых силы света ($\Phi_v=1000$ лм):

K – концентрированная; G – глубокая; D – косинусная; M – равномерная; $Ш$ – широкая; S – синусная; L – полуширокая

Справочные кривые светораспределения различных типов светильников даются для условной лампы со световым потоком 1000 лм в предположении, что при лампах с иным световым потоком сила света может быть определена по той же кривой путем пересчета.

Чтобы было удобно сравнивать светильники между собой, необходимо иметь несколько общепринятых характеристик, основанных на понятиях о видимом свете. К таким характеристикам относятся: световой поток, сила света, световая отдача, освещенность, цветовая температура, индекс цветопередачи, яркость, светимость, коэффициент пульсаций, показатели ослепленности.

Световой поток представляет собой мощность светового излучения, воспринимаемого человеком как видимый свет. Обозначается буквой Φ и измеряется в люменах (лм). Световой поток

обычно указывают в характеристиках ламп. Так для люминесцентной лампы мощностью 18 Вт световой поток может достигать 1350 лм, при мощности лампы 36 Вт – 3350 лм и при мощности лампы 58 Вт – 5200 лм.

Определение светового потока светильников осуществляют с помощью гониофотометров и фотометрических шаров в соответствии с ГОСТ Р 54350-2011. Данный стандарт устанавливает требования к методам испытаний осветительных приборов.

Сила света представляет собой отношение направленного светового потока, распространяющегося внутри телесного угла, к величине этого телесного угла. Обозначается буквой I и имеет размерность кандела (кд).

Световая отдача (энергоэффективность). Определяется как отношение светового потока, исходящего от светильника, к электрической мощности, потребляемой светильником от электросети. Измеряется в люменах на ватт (лм/Вт). Параметр напрямую связан с КПД источника света. Следует иметь в виду, что часто под КПД светильника подразумевают не КПД источника света, а только потери светового потока в плафонах и других конструкциях светильника. У люминесцентных светильников энергоэффективность как правило не менее 30-35 лм/Вт, у светодиодных – не менее 50 лм/Вт.

Освещенность – это величина светового потока, приходящаяся на единицу площади освещаемой поверхности. Обозначается буквой E , имеет размерность люкс (лк): $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$. В отличие от таких характеристик, как световой поток и световая отдача, которые являются характеристиками непосредственно источника света, параметр освещенности показывает, насколько правильно подобраны светильники для данного конкретного помещения, достаточно освещено рабочее место или нет. При проектировании освещения рассчитывается именно освещенность, которая нормируется в зависимости от вида зрительных работ.

Цветовая температура. Любое тело, температура которого выше температуры абсолютного нуля (ноль градусов по Кельвину, или минус 273 градуса по Цельсию) излучает электромагнитные волны, в том числе и видимого глазом диапазона частот. Цветовая температура характеризует спектр излучения исследуемого источника света. Измеряется в градусах Кельвина и показывает, до какой температуры необходимо нагреть абсолютно черное тело, что

бы спектр излучения этого абсолютно черного тела соответствовал спектру излучения источника света. Абсолютно черное тело предполагает такое свойство его поверхности, при котором все падающие на него световые лучи поглощаются им без отражения.

Индекс цветопередачи. Этот индекс характеризует естественность и правильность передачи цветов. Обозначается R_a . Имеет максимальное значение 100 (для разных источников света принимает значение от 0 до 100), при котором мы видим цвета такими, как и при солнечном свете. Он показывает, действительно ли мы зеленое увидим как зеленое, а красное как красное. Попробуйте осветить светлую прозрачную штору экраном телевизора – при изменении картинки на экране цвет штор будет менять оттенки, а для нас важно, что бы мы видели все цвета естественно без искажений.

Хотя в некоторых случаях наоборот важно подчеркнуть некоторые цвета. В таких случаях используют светильники либо с определенной цветовой температурой, либо с цветным излучением.

Яркость. Это отношение силы света в заданном направлении к площади проекции излучающей поверхности на плоскость, перпендикулярную данному направлению. Определяется как отношение кандела на квадратный метр ($\text{кд}/\text{м}^2$).

Яркость измеряют яркомерами в соответствии с ГОСТ 26824-2010 и ГОСТ Р 55707-2013. Различают яркость светящихся поверхностей (светильников) и яркость освещенных поверхностей (дорожного покрытия, стен, фасадов зданий).

Светимость – это отношение светового потока к площади излучающей этот поток поверхности. Другими словами плотность светового потока на излучающей поверхности источника излучения, определяется как люмен на квадратный метр ($\text{лм}/\text{м}^2$).

Коэффициент пульсаций освещенности характеризует изменение освещенности, вызванное изменением мгновенного значения напряжения питающей сети:

$$K_c = 100(E_{\max} - E_{\min}) / 2E_{\text{ср}}$$

где E_{\max} , E_{\min} , $E_{\text{ср}}$ – максимальное, минимальное и среднее значение освещенности. Самый большой коэффициент пульсаций (с частотой питающей сети) у люминесцентных ламп, работающих с электромагнитными ПРА.

Методы измерения коэффициента пульсации освещенности установлены ГОСТ Р 54945-2012.

Показатели *ослепленности* характеризуют слепящее действие, создаваемое светильником. Если сравнить два источника света с одинаковым световым потоком, но с существенно разными площадями излучающих поверхностей, то очевидно, что светильник с меньшей площадью излучающей поверхности будет иметь большее значение яркости и вероятность слепящего действия от него будет выше.

Порядок выполнения работы. При изучении конструкции светильников пользуются наглядными пособиями, имеющимися в лаборатории. В отчет по работе для светильника каждого вида вычертить эскиз конструкции.

Используя рисунок 8.2 собрать электрическую схему для снятия кривой светораспределения светильника.

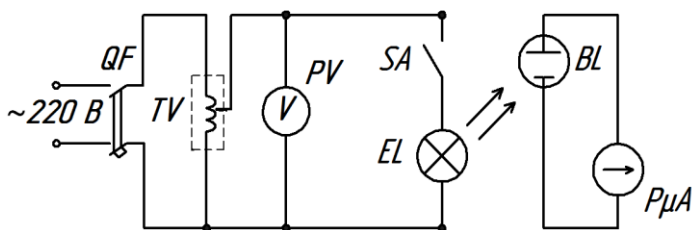


Рис. 8.2. Электрическая схема лабораторной установки для снятия кривой светораспределения светильника:

QF – рубильник; *TV* – автотрансформатор; *PV* – вольтметр; *SA* – выключатель; *EL* – лампа накаливания (светильник); *BL, PμA* – люксметр

При помощи подвижного кронштейна установить фотозлемент на угол от 0° до 80° с шагом 10° и люксметром измерить освещенность. Влияние постороннего излучения при этом учитывают вычитанием показаний люксметра с включенным и выключенным источником света. Данные заносят в таблицу 8.1.

По полученным опытным данным рассчитывают силу света, кд:

$$I_\alpha = \frac{El^2}{\cos \beta}, \quad (8.1)$$

где E – освещенность плоскости, перпендикулярной рассматриваемому направлению, лк;

l – расстояние от источника до места замера, м;

β – угол падения светового потока на фотозлемент люксметра.

Таблица 8.1

Результаты исследования продольной кривой светораспределения
светильника с лампой накаливания

Наименование и тип светиль- ника	Опытные данные			Расчетные данные				
	Номер измерения	α , град	E , лк	I_{α} , кд	I_{cp} , кд	$\Phi_{\alpha-\alpha_j}$, лм	Φ , лм	I_{α}^{1000} , кд
	1	0						
	2	10						
	3	20						
	4	30						
	5	40						
	6	50						
	7	60						
	8	70						
	9	80						

Полный световой поток, создаваемый светильником, определяют методом зональных потоков, для этого рассчитывают:

– среднюю силу света, кд, в зоне пространства:

$$I_{cp} = \frac{(I_i + I_j)}{2}, \quad (8.2)$$

где I_i, I_j – силы света на границах зоны пространства;

– световой поток, лм, заключенный в зоне пространстве:

$$\Phi_{\alpha_i-\alpha_j} = 2\pi(\cos\alpha_i - \cos\alpha_j)I_{cp}, \quad (8.3)$$

где α_i, α_j – углы границ зоны пространства;

– полный световой поток, лм, светильника:

$$\Phi = \sum_{\alpha_j}^{\alpha_i} \Phi_{зон}. \quad (8.4)$$

Полученные данные распределения силы света приводят к источнику с условным световым потоком 1000 лм по формуле

$$I_{\alpha}^{1000} = \frac{1000I_{\alpha}}{\Phi}. \quad (8.5)$$

По полученным данным вычертить в полярных координатах кривую светораспределения для исследуемого светильника, определить, к какому типу кривой относится полученная кривая светораспределения исследуемого светильника. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Контрольные вопросы

1. Что называют световым прибором?
2. Что такое искусственный источник света?
3. Какой прибор называют светильником?
4. Что называют продольной кривой светораспределения светильника?
5. Дайте классификацию светильников по виду кривых светораспределения.
6. Поясните конструкцию лампы накаливания.
7. Что называется прожектором?
8. Перечислите основные характеристики светильника.
9. Почему кривые светораспределения различных типов светильников даются для условной лампы?

Часть 2. Электротехнология

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОНАГРЕВА СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Цель работы: изучить ход изменения температуры тела, скорости нагрева и охлаждения, теплового КПД в процессе нагрева.

Электроконтактный нагрев сопротивлением наиболее простой способ по реализации и аппаратному оформлению, к тому же самый экономичный из электрических методов нагрева.

Основные области применения электроконтактного нагрева:

1) прямой нагрев металлических деталей несложной формы (валов, осей, труб, лент и т.п.) при их термической и механической обработке;

2) контактная сварка;

3) наплавка при восстановлении изношенных металлических деталей;

4) подогрев трубопроводов с целью размораживания, предотвращения замерзания, подогрева циркулирующей жидкости и др.

Принцип нагрева поясняется рисунком 9.1. Деталь, включенная в электрическую цепь, нагревается за счет тепла выделяющегося от протекающего по ней тока и вместе с этим является потребителем электроэнергии. Так как сопротивление детали мало, то согласно закону Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R \tau, \quad (9.1)$$

для нагрева необходим большой ток, который подводится к детали при помощи массивных медных зажимов 4.

Нагрев может происходить под действием постоянного и переменного тока, однако практически во всех случаях применяется только переменный ток, так как необходимые для нагрева токи в сотни и тысячи ампер при напряжении от десятых долей вольта до 12-24 В могут быть наиболее просто получены лишь при помощи понижающих трансформаторов переменного тока.

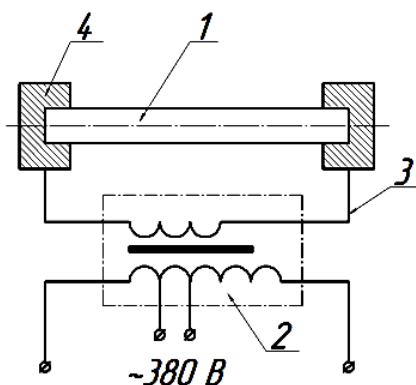


Рис. 9.1. Принципиальная схема электроконтактного нагрева:
 1 – заготовка; 2 – нагревательный трансформатор; 3 – подводящие шины;
 4 – контактные зажимы

Трудность подвода тока к детали является одним из существующих недостатков электроконтактного нагрева. Зажимы 4 должны иметь хороший контакт с деталью. При этом их соприкосновение происходит в нескольких точках и поэтому сопротивление контактного перехода велико. Элементы вторичной цепи (вторичная обмотка трансформатора, подводящие шины, сопротивления в переходных контактах) включается последовательно с заготовкой, и в каждом из них выделяется тепло, пропорциональное сопротивлению соответствующего элемента. Из-за этого сопротивление всех этих элементов следует всячески уменьшать. Для этого трансформатор располагают как можно ближе к заготовке, уменьшают переходные сопротивления в контактах и т.д. Особую трудность представляет обеспечение малых переходных сопротивлений контактных зажимов. Вследствие больших токов во вторичной цепи даже очень малое сопротивление в переходах приводит к значительному выделению тепла в концах заготовок и, следовательно, к неравномерному распределению температуры по ее длине.

Для снижения переходного сопротивления необходимо усилить давление в контактах. В промышленных установках для этого применяют пневматические и гидравлические приводы, а для снижения температуры в контактах их изготавливают с принудительным, например водяным, охлаждением.

Основные преимущества электроконтактного нагрева сопротивлением:

1) этот способ более универсален, чем, например, индукционный, где при нагреве разных деталей каждый раз приходится менять индуктор;

2) большая скорость нагрева ($10-40^{\circ}\text{C}/\text{с}$) позволяет получать более качественную, по сравнению с нагревом в печах, структуру металла;

3) значительно меньшее (в 9-10 раз) окисление и угар металла по сравнению с печами;

4) высокая технологическая культура и санитарные условия работы.

К недостаткам электроконтактного нагрева сопротивлением относят:

1) возможность нагрева только деталей простой формы;

2) необходимость в специальных нагревательных трансформаторах на большие вторичные токи;

3) необходимость каждый раз зажимать детали, что делает его более целесообразным для мелкосерийного производства.

Порядок выполнения работы. Перед тем как приступить к экспериментальному исследованию необходимо, ознакомиться с аппаратурой и приборами, входящими в состав лабораторной установки, записать их технические данные (наименование прибора, его система, пределы измерения и класс точности), а также изучить схему лабораторной установки (рис. 9.2).

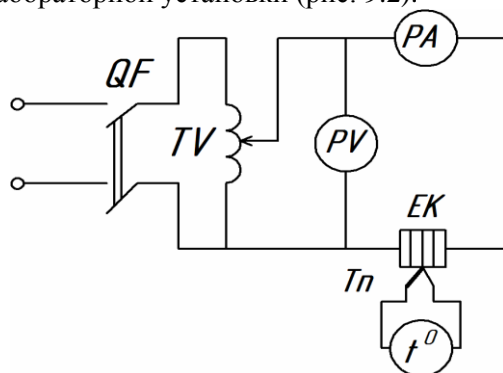


Рис. 9.2. Электрическая схема установки

Лабораторная установка состоит из лабораторного автотрансформатора TV , нагревательного элемента EK , терморпары Tn с измерителем температуры t° , амперметра PA и вольтметра PV .

Для начала проведения экспериментов включите напряжение и начните отсчет времени с этого момента, записывая температуру нагревателя через каждые 60 с. Замеры ведите при постоянном значении тока до установившегося превышения температуры $Q_{уст} = 150^\circ C$.

После этого выключите напряжение и через каждые 60 с замеряйте температуру нагревателя до полного его охлаждения. Результаты опытов зафиксируйте в таблице 9.1.

Таблица 9.1

Результаты испытания электронагрева сопротивлением

I, A	τ , с	Нагрев			Охлаждение	
		$Q_{нагр}$, $^\circ C$	$v_{нагр}$, $^\circ C / c$	η_T	$Q_{охл}$, $^\circ C$	$v_{охл}$, $^\circ C / c$
	0					
	60					
	120					
	...					

Постройте график зависимости $Q = f(\tau)$ для процессов нагрева и охлаждения. Определите постоянную времени T , как отрезок на оси абсцисс, соответствующий значениям температуры: $Q = 0,63Q_{уст}$ – при нагреве; $Q = 0,37Q_{уст}$ – при охлаждении.

Вычислите скорости нагрева и охлаждения, а также значение теплового КПД по следующим формулам:

$$v = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau}, \quad (9.2)$$

$$\eta_T = 1 - \frac{Q_{нагр}}{Q_{уст}}, \quad (9.3)$$

где ΔQ – разность температур между двумя замерами:

$$\Delta Q = Q_{n+1} - Q_n;$$

$\Delta \tau$ – промежуток времени между двумя замерами:

$$\Delta \tau = \tau_{n+1} - \tau_n.$$

Результаты вычислений запишите в таблицу 9.1 и постройте графики зависимостей: $v_{нагр} = f(\tau)$, $v_{охл} = f(\tau)$, $\eta_T = f(Q)$.

Контрольные вопросы

1. В каких областях применяется электроконтактный нагрев сопротивлением?
2. В чем заключается принцип электроконтактного нагрева сопротивлением?
3. Преимущества контактного нагрева.
4. Недостатки электроконтактного нагрева.
5. Как зависит скорость изменения температуры от времени при нагреве и охлаждении?
6. Как найти постоянную времени нагрева?
7. Как влияет изменение напряжения на нагрев металлических деталей?
8. Как восстанавливают металлические детали, применяя прямой нагрев сопротивлением?
9. Что такое прямой нагрев сопротивлением?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

ИЗУЧЕНИЕ НАГРЕВА ПРОВОДНИКОВ ВТОРОГО РОДА

Цель работы: изучить влияние температуры на удельное сопротивление воды.

Электродный способ применяют для нагрева проводников второго рода: воды, молока, соков и т.д. Этот вид нагрева представляет собой наиболее простой и экономичный способ нагрева материалов, не требующий ни понижающих трансформаторов, ни специальных нагревателей из дорогостоящих сплавов. Электроды выполняют лишь функцию подвода тока к нагреваемой среде, практически не нагреваясь самим током. Изготавливают электроды из недефицитных материалов, чаще всего металлов, но они могут быть и неметаллическими (графитовыми, угольными).

Для электродного нагрева во избежание электролиза используют только переменный ток.

Наибольшее распространение в сельском хозяйстве получил электродный нагрев в водогрейных и паровых электрических котлах. Электропроводность большинства сельскохозяйственных продуктов и кормов обуславливается наличием в ней воды и водных растворов.

Вода без примесей практически не проводит электрический ток. Её проводимость при 20°C составляет около $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ (для сравнения – проводимость меди $0,6 \cdot 10^6 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$). Электрическая проводимость «обычной» воды обусловлена наличием растворенных в ней солей, кислот и щелочей, молекулы которых в воде диссоциируют на ионы по воздействию напряженности электрического поля. Содержание 0,5 мг/кг солей повышает проводимость воды на $1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$.

Наиболее химически чистая атмосферная вода. Её солесодержание не превышает 50 мг/кг. Подземные воды содержат от 100 мг/кг до нескольких грамм на килограмм солей.

На удельное электрическое сопротивление воды значительное влияние оказывает ее температура. С возрастанием температуры увеличивается степень диссоциации молекул солей на ионы и их подвижность, вследствие чего проводимость воды возрастает.

Для любой температуры t до начала заметного парообразования удельная проводимость воды определяется уравнением Шмидбауэра:

$$\sigma_t = \sigma_{20} [1 + \alpha(t - 20)], \quad (10.1)$$

где α – коэффициент температурного изменения электропроводности (0,025-0,035);

σ_{20} – удельная электропроводимость при температуре 20°С, Ом.

Величина обратная σ_t представляет собой удельное сопротивление воды:

$$\rho_t = \frac{\rho_{20}}{1 + \alpha(t - 20)}. \quad (10.2)$$

Принимая $\alpha=0,025$, получим:

$$\rho_t = \frac{40\rho_{20}}{t + 20}, \quad (10.3)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление воды при 20°С.

Вследствие резко выраженной зависимости удельного сопротивления воды от температуры мощность в процессе нагрева значительно изменяется, что является одним из существенных недостатков электродного нагрева, приводящим к завышению сечения питающих проводов и усложняющим расчет установок.

Порядок выполнения работы. Перед тем как приступить к экспериментальному исследованию необходимо, ознакомиться с аппаратурой и приборами, входящими в состав лабораторной установки, записать их технические данные (наименование прибора, его система, пределы измерения и класс точности), а также изучить схему лабораторной установки (рис. 10.1).

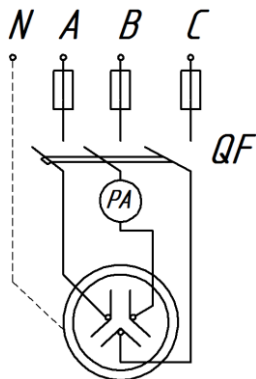


Рис. 10.1. Электрическая схема установки, применяемая для нагрева проводников второго рода

Замерить температуру воды в начале работы. Подать на установку напряжение и начать отсчет времени нагрева, записывая через каждые 10°C значения времени и тока в таблицу 10.1.

Таблица 10.1

Результаты испытания нагрева проводников второго рода

$U_c, \text{В}$	t°, C	$I, \text{А}$	$\tau, \text{с}$	$\rho_{\text{эксн}}, \text{Ом}\cdot\text{см}$	$\rho_{\text{расч}}, \text{Ом}\cdot\text{см}$
220	20				
	30				
	40				
	50				
	60				
	70				

Закончив экспериментальные исследования, рассчитайте значение удельного сопротивления воды для каждого замеренного значения тока по формуле

$$\rho_{\text{эксн}} = \frac{U_c \cdot S}{I \cdot l}. \quad (10.4)$$

Также рассчитайте удельное сопротивление воды при различных температурах по формуле

$$\rho_{\text{расч}} = \frac{40 \cdot \rho_{20}}{t + 20}, \quad (10.5)$$

$$\rho_{20} = \frac{U_c \cdot S}{I_{20} \cdot l}. \quad (10.6)$$

Постройте графики зависимости $\rho_{\text{экс}} = f(t)$ и $\rho_{\text{расч}} = f(t)$. Сравните экспериментальный и расчетный графики.

Контрольные вопросы

1. Чем различаются проводники 1-го и 2-го рода?
2. В чем заключается сущность электродного нагрева? Какую роль выполняют электроды при нагреве?
3. Почему в установках электродного нагрева применяют переменный ток?
4. От чего зависит удельное сопротивление воды?
5. Как экспериментально определяют удельное сопротивление материалов, подлежащих электродному нагреву?
6. Как изменяется удельное сопротивление воды при увеличении температуры?
7. Почему электродный способ нагрева является электроопасным?
8. Какое негативное влияние электрический ток оказывает на проводники второго рода при электродном способе нагрева?
9. Как называют проводники второго рода?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ И КОТЛОВ

Цель работы: изучить устройство и систему управления электродных водонагревателей и котлов.

Электродный способ применяют для нагрева проводников II рода: воды, молока, фруктовых и ягодных соков, сочных кормов, почвы, бетона. Материал помещают в емкость между электродами и нагревают электрическим током, протекающим по материалу от одного электрода к другому (рис. 11.1).

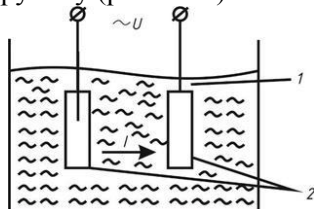


Рис. 11.1. Схема электродного водонагревателя:
1 – нагреваемая среда; 2 – электроды

При электродном нагреве происходит прямой нагрев сопротивлением – материал служит средой, непосредственно в которой электрическая энергия преобразуется в тепловую.

Электродный нагрев – наиболее простой и экономичный способ нагрева материалов, не требует специальных источников питания и нагревателей из дорогостоящих сплавов. Электроды подводят ток к нагреваемой среде и при этом сами током практически не нагреваются, их изготавливают из недефицитных материалов, чаще всего из металлов, но они могут быть и неметаллическими (графитовыми, угольными). Недопустимо выполнять электроды из алюминия или оцинкованной стали. Во избежание электролиза для электродного нагрева используют только переменный ток.

В сельском хозяйстве электродный нагрев широко распространен в электродных водонагревателях, водогрейных и паровых котлах.

Электродные водонагреватели предназначены для нагрева проточной воды в замкнутых системах теплоснабжения с избыточным давлением до 0,6 МПа (табл. 11.1). Они представ-

ляют собой цилиндрическую емкость, внутри которой расположены электроды для подвода тока к воде и диэлектрические вставки для регулирования мощности. Водонагреватели компактны, поверхность теплопотерь невелика и поэтому нетеплоизолирована, имея существенно большую номинальную мощность, чем элементные водонагреватели.

Таблица 11.1

Основные технические данные электродных водонагревателей

Тип	Производительность при нагревании на 25°С, м ³ /ч	Диапазон регулирования мощности, %	Удельное сопротивление воды при 20°С, Ом·м
ЭПЗ-25/И2	0,8	33-100	10-30
ЭПЗ-100/ИЗ	3,4	10-100	10-30
ЭПЗ-250/ИЗ	8,5	33-100	10-50
ЭПЗ-400/ИЗ	13,6	33-100	10-50
КЭВ-63/0,4	2,1	25-100	10-50
КЭВ-100/0,4	3,4	25-100	10-70
КЭВ-160/0,4	5,4	50-100	10-70
КЭВ-250/0,4	8,5	50-100	10-70

Электродный проточный водонагреватель ЭПЗ имеет два варианта исполнения, различающихся приводом механизма регулирования мощности (И2 – ручной привод, ИЗ – электродвигательный привод).

Электродный водогрейный котел КЭВ выпускают в двух вариантах исполнения: с цилиндрическими электродами для воды, имеющей удельное сопротивление при 20°С ниже 10 Ом·м, и с пластинчатыми – для воды, удельное сопротивление которой выше 10 Ом·м.

Основной режим работы электродных водонагревателей – без разбора воды с обязательной циркуляцией ее по замкнутому контуру. Для всех типов водонагревателей температура воды на входе рекомендуется 70°С, на выходе – 90°С при закрытом контуре.

Электродные водонагреватели типов ЭПЗ и КЭВ предназначены для нагрева воды в системах горячего водоснабжения зданий производственного (фермы, кормоприготовительные цеха и т.п.) и коммунально-бытового назначения (коттеджи, клубы и т.п.).

Электродные водонагреватели следует устанавливать в отдельных помещениях. Корпус должен иметь защитное зануление. Помещения особо опасные и с повышенной опасностью, имеющие технологическое оборудование, связанное проводящими электри-

ческий ток элементами с электродным водонагревателем, должны быть оборудованы устройством выравнивания потенциалов.

Водонагреватели следует присоединить к водопроводной сети и разборному трубопроводу только через изолирующие вставки. Длину вставки (мм) определяют по формуле

$$l \geq 0,785 - d^2, \quad (11.1)$$

где d – внутренний диаметр вставки, мм.

Электродный водонагреватель ЭПЗ-100. Электродный водонагреватель ЭПЗ-100 (рис. 11.2) представляет собой цилиндрический стальной корпус 2, покрытый снаружи тепловой изоляцией 4 и металлическим кожухом 3. Для подвода и отвода воды в корпус вварены два патрубка 15 и 20. В днище имеется сливной патрубок 22, в верхней части – винт 14 устройства для выпуска воздуха при заполнении водонагревателя водой.

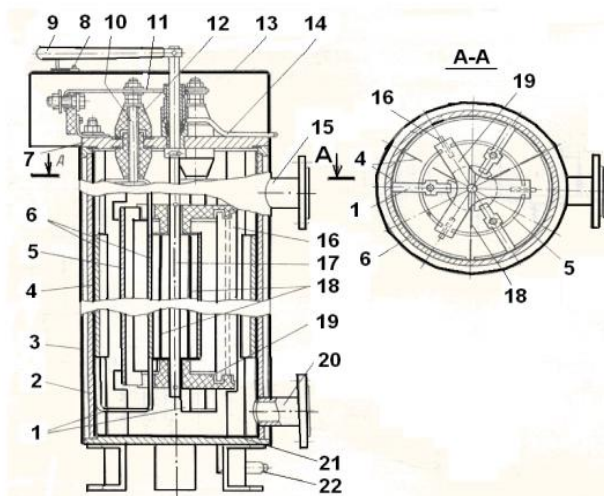


Рис. 11.2. Электрический водонагреватель ЭПЗ-100 И2:

1 – скобы; 2 – корпус; 3 – кожух; 4 – изоляционный экран наружный; 5 – регулирующий электрод; 6 – фазные электроды; 7 – крышка; 8 – шкала; 9 – ручка; 10 – токоввод; 11 – шины; 12 – изолятор; 13 – кожух токовводов; 14, 22 – дренаж; 15 – отвод воды; 16 – изоляционная пластина; 17 – поворотная ось; 18 – изоляционный экран внутренний; 19 – траверса; 20 – подвод воды; 21 – изолятор днища

В корпусе водонагревателя установлена электродная система, состоящая из трех электродных групп. Каждая имеет по три коаксиально расположенных цилиндрических электрода: два из них –

нулевые электроды, один – фазный. В зазоры между электродами вводятся два изоляционных цилиндрических экрана из стеклотекстолита, закрепленных на общей траверсе. При опускании экранов ходовым винтом с помощью маховика 4 активная площадь электродов уменьшается, а при поднятии увеличивается, что приводит к уменьшению или увеличению мощности водонагревателя.

Номинальная мощность – 100 кВт; номинальное удельное электрическое сопротивление воды при 20⁰С – 3000 Ом·см; вместимость водонагревателя – 28 л.

Электродный водонагреватель ЭВН-25/0,4. Электродный водонагреватель ЭВН-25/0,4 номинальной мощностью 25 кВт предназначен для сельскохозяйственных и коммунально-бытовых объектов, в частности для обогрева жилья. В данном водонагревателе сплошные углообразные электроды заменены углообразными рамками (рис. 11.3).

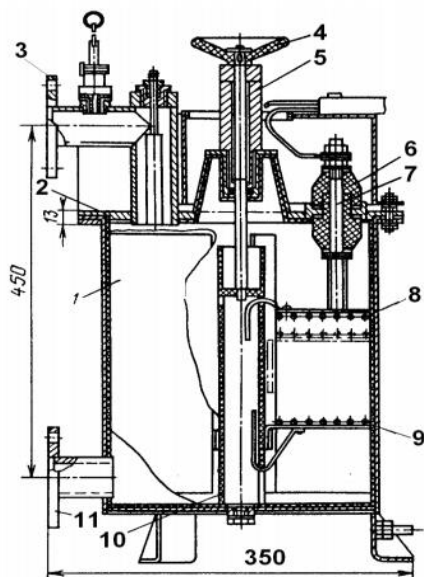


Рис. 11.3. Конструкция электродного водонагревателя ЭВН-25/0,4:
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – выходной патрубок; 4 – маховик; 5 – регулятор мощности; 6 – проходной изолятор; 7 – токоввод; 8, 9 – электроды; 10 – экран; 11 – входной патрубок

Для регулирования мощности нагревателя между электродами 8, 9 установлен комбинированный экран 10 в виде трехлучевой

звезды, верхняя часть которого выполнена из металла, а нижняя – из диэлектрического материала. Высота каждой части равна высоте электродов. Максимальную мощность нагревателя обеспечивают за счет введения в межэлектродное пространство металлической части экрана, а минимальную – диэлектрической.

Эксплуатация указанных нагревателей показала, что применение рамочных электродов для ЭНУ мощностью до 25 кВт позволяет снизить металлоемкость электродной группы с 0,065 кг/кВт у сплошных электродов до 0,05 кг/кВт для электродов в виде рамок. При использовании электродной группы с рамочными электродами в ЭВН обеспечивается хорошая циркуляция воды. Скорость растворения железа в воде снижается за счет уменьшения в 1,5-2 раза площади электродов, подвергающейся коррозии, что приводит к повышению качества нагретой воды. Использование комбинированного экрана в водонагревателе ЭВН-25/0,4 позволяет регулировать его мощность в пределах от 40 до 100%.

Электродные водогрейные котлы типа КЭВ. Электродные водогрейные котлы типа КЭВ-0,4 предназначены для работы в системах отопления и горячего водоснабжения (табл. 11.2).

Таблица 11.2
Технические характеристики котла КЭВ-0,4

Параметр	КЭВ-100/0,4	КЭВ-160/0,4	КЭВ-250/0,4	КЭВ-400/0,4	КЭВ-1000/0,4
Номинальная потребляемая мощность котла, кВт	100	160	250	400	1000
Номинальное напряжение питающей электрической сети, кВ	0,4				
Число фаз	3				
Рабочее давление в котле, кгс/см ²					
- максимальное	6				
- минимальное	1				
Температура воды на входе в котёл, °С	70				
Температура воды на выходе из котла, °С	95				
Расход воды через котёл, м ³ /ч	3,5	5,5	8,6	13,8	34,5
Диапазон регулирования мощности, %	100-25				
Масса, кг	175	175	248	393	690
Габаритные размеры, Д×Ш×В, мм	520	520	585	695	863
	820	620	665	770	970

Котлы имеют два конструктивных варианта исполнения электродной системы: с цилиндрическими электродами – для воды с удельным сопротивлением (при 20°С) ниже 1000 Ом·см и с пластинчатыми электродами, если удельное сопротивление воды выше 1000 Ом·см.

Конструктивная схема котла типа КЭВ-0,4 с пластинчатыми электродами приведена на рисунке 11.4. Котел имеет цилиндрический корпус 2 из стальной трубы без тепловой изоляции. Внутри корпуса на изоляторах 7 закреплена электродная система в виде блока пластинчатых электродов 3. Регулирование мощности в пределах 20-100% от номинального осуществляется путем введения между электродами диэлектрических пластин 4.

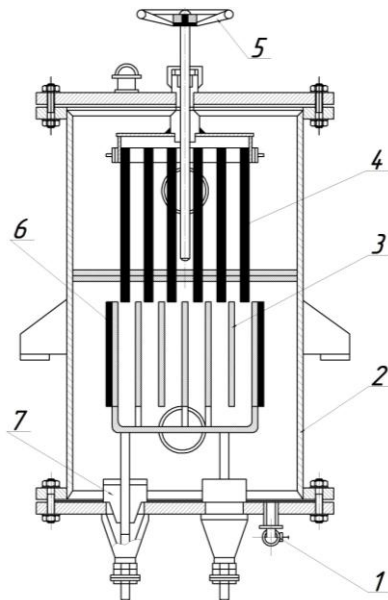


Рис. 11.4. Электродный водогрейный котел КЭВ-0,4 с пластинчатыми электродами:

1 – дренаж; 2 – корпус; 3 – пластинчатые электроды; 4 – регулирующие диэлектрические пластины; 5 – регулирующий механизм; 6 – защитные диэлектрические пластины; 7 – проходные изоляторы

В электродных котлах с цилиндрическими стержнями мощность регулируется следующим образом: между соосными цилин-

дрическими электродами размещаются регулирующие экраны из фторопластовых труб, закрепленных на перемещающейся в вертикальной плоскости траверсе.

Высоковольтные котлы типа КЭВ-6 и КЭВ-10 предназначены для удовлетворения потребности в тепле крупных потребителей. По устройству и принципу работы они мало отличаются от низковольтных котлов, но так как они работают при более высоком давлении и температуре воды, то это требует более строгих организационных и технических мероприятий безопасности эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Конструкция котла типа КЭВ.
2. Сущность электродного нагрева. Для каких материалов он используется?
3. Рабочие и энергетические характеристики электродного водонагревателя.
4. Какие материалы используются в качестве электродов в электродных водонагревателях и почему?
5. Объяснить с физической точки зрения процессы, происходящие в жидкости при электродном нагреве.
6. Из каких условий выбирается длина изолирующей вставки?
7. Конструкция водонагревателя ЭПЗ-100.
8. Конструкция водонагревателя ЭВН-15/0,4.
9. Преимущества и недостатки электродных водонагревателей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

ИЗУЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДНОГО КОТЛА

Цель работы: изучить устройство, работу и основные правила безопасного обслуживания электродного котла.

Электродный нагрев уменьшает бактериальную загрязненность воды, так как переменный ток определенной плотности убивает патогенные (болезнетворные) микроорганизмы. Однако в электродных котлах вода загрязняется продуктами электрохимических реакций, протекающих на металлических электродах и корпусе, а также окислами этих металлов, в результате чего подогретая в них вода для питьевых целей и готовке пищи не годится. Применяя электроды из нержавеющей стали или графита, загрязненность воды можно значительно понизить и использовать такие устройства не только для нагрева воды, но и для тепловой обработки продуктов питания (молока, соков и т.д.).

Электродный котел представляет собой металлический бак с двойными стенками. Между стенками укладывается тепловая изоляция для уменьшения теплоотдачи в окружающую среду. Внутри бака на специальном изоляционном основании крепятся электроды, провода от которых через изоляторы включаются в цепь переменного тока (рис. 11.4).

Электроды, подводящие ток к нагреваемой среде, имеют различную форму: плоскую пластинчатую (рис. 12.1, в); пластинчатую, изогнутую под углом 120° (рис. 12.1, а); пластинчатую дуговую и рамочную; стержневую; стержневую многоэлементную; цилиндрическую (рис. 12.1, б) и др.

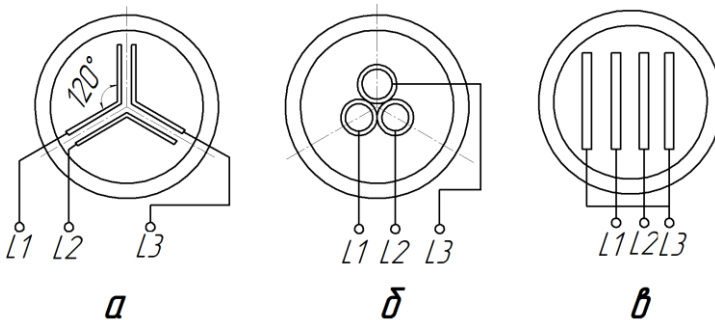


Рис. 12.1. Форма электродов

Котел может быть выполнен однофазным и трехфазным. В трехфазных котлах при любом конструктивном исполнении электродов будут осуществляться их соединения как по схеме «звезда», так и по схеме «треугольник».

Электродный котел может иметь автоматическое управление температурой нагрева и в качестве датчиков температуры в схемах управления используются биметаллические (типа ДТКБ), dilatометрические (ТУДЭ) или ртутные контактные термометры (ТПК).

Электродные котлы при нарушении надлежащих правил устройства и эксплуатации могут представлять серьезную опасность с точки зрения поражения людей и животных электрическим током. Это обусловлено тем, что электродные котлы устанавливают, как правило, в сырых помещениях и обслуживает их неквалифицированный персонал. Кроме того, электродные котлы имеют повышенную опасность, обусловленную принципом их работы. Безопасная эксплуатация котлов обеспечивается строгим соблюдением требований правил технической эксплуатации электроустановок (ПТЭ) и правил техники безопасности при эксплуатации электроустановок (ПТБ).

Основные правила безопасной эксплуатации электродкотлов в сетях с напряжением до 1000 В состоят в следующем:

1) Для эксплуатации разрешается использовать только электродкотлы и водонагреватели, изготовленные в соответствии с требованиями ГОСТ и техническими условиями, утвержденными министерством, в ведении которого находится завод-изготовитель.

2) Электродкотлы необходимо устанавливать в отдельных помещениях (электродкотельных), доступ в которые разрешается лишь проинструктированным лицам.

3) Мощность работающих электродных котлов не должна превышать номинальную. Для этого удельное электросопротивление воды должно находиться в пределах, указанных в паспорте котла.

4) Корпус котлов напряжением до 1000 В и все металлические части, которые в результате повреждения изоляции могут оказаться под напряжением, должны быть присоединены к нулевому проводу. Нулевой провод повторно заземляют на вводе в помещение.

5) В сетях 380 В с глухо заземленной нейтралью, питающих животноводческие фермы, корпуса котлов не присоединяют к нуле-

вому проводу, а для обеспечения безопасности обслуживания котлы помещают в изолированные от них металлические кожухи, которые надежно присоединяют к нулевому проводу. Выводы к трубопроводам холодной и горячей воды присоединяют через изолирующие вставки.

б) Электродкотлы должны быть защищены трехфазными автоматами или другими устройствами, действующими на отключение при перегрузках и коротких замыканиях в цепях котла.

7) Все операции по обслуживанию аппаратов могут выполняться только при отключенном состоянии. Персонал, осуществляющий технический уход и эксплуатацию, должен иметь квалификационную группу по технике безопасности.

8) Каждый котел необходимо снабдить табличкой с основными техническими данными, схемами электрического и тепломеханического оборудования и утвержденными инструкциями по эксплуатации.

Контрольные вопросы

1. Преимущества электродного нагрева перед элементным нагревом.
2. Как называют проводники второго рода?
3. Недостатки электродного нагрева.
4. Устройство электродного котла и его принцип работы.
5. Основные формы электродов.
6. Основные правила безопасной эксплуатации электродкотлов.
7. Какое негативное влияние электрический ток оказывает на проводники второго рода при электродном способе нагрева?
8. Какую роль выполняют электроды при нагреве?
9. Почему электродный способ нагрева является электроопасным?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

ИЗУЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ

Цель работы: изучить зависимость плотности тока на электродах, мощности и КПД электродного водонагревателя от температуры нагрева.

Электродный водонагреватель представляет собой систему электродов, предназначенных для подвода электрического тока к нагреваемому материалу. Если электроды не экранированы и размещены в металлическом корпусе, то его стенки также являются элементами электродной системы. К основным параметрам электродных нагревателей относятся: число фаз, количество электродов, электрическая схема соединения, форма, размеры и материал электродов, расстояние между электродами.

Электродный нагрев уменьшает бактериальную загрязненность воды, так как переменный ток при определенной плотности убивает патогенные (болезнетворные) микроорганизмы. Однако в электродных котлах вода загрязняется продуктами электрохимических реакций, происходящих на металлических электродах и корпусе, а также окислами этих металлов, поэтому подогретая в них вода для питья не годится. В процессе нагрева на электродах происходят сложные электрохимические реакции, сопровождающиеся при определенных условиях образованием вредных веществ и разложением воды на водород и кислород. В получаемой смеси, водород и кислород образуют взрывоопасный гремучий газ. Эти явления возникают, если превышает некоторое допустимое значение плотности тока и неправильно подобран материал электродов.

Применяя электроды из нержавеющей стали или графита, загрязненность воды можно значительно понизить и использовать такие устройства не только для нагрева воды, но и для тепловой обработки продуктов питания (молока, соков и др.). Для изготовления электродов недопустимо применять алюминий или оцинкованную сталь. Лучшими материалами для электродов является титан, нержавеющая сталь и электротехнический графит. При нагреве воды для технических нужд можно, как исключение, использовать обычную (черную) сталь.

При использовании обычной стали допустимое значение плотности тока для плоских электродов составляет $0,5 \text{ A/cm}^2$, для цилиндрических – не более 2 A/cm^2 . Для электродов из титана и нержавеющей стали величина плотности тока по условиям образования гремучего газа не ограничивается, но размеры электродов должны обеспечивать получение необходимой мощности.

Порядок выполнения работы. Перед тем как приступить к экспериментальному исследованию необходимо, ознакомиться с аппаратурой и приборами, входящими в состав лабораторной установки, записать их технические данные (наименование прибора, его система, пределы измерения и класс точности), а также изучить схему лабораторной установки (рис. 13.1).

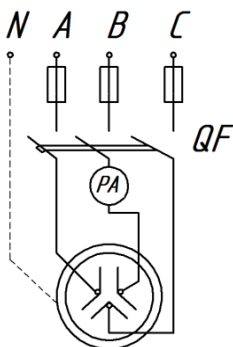


Рис. 13.1. Электрическая схема установки, применяемая для нагрева проводников второго рода

Замерить температуру воды в начале работы и после подачи напряжения начать отсчет времени нагрева, записывая через каждые 10°C значения времени и тока в таблицу 13.1.

Таблица 13.1

Результаты испытания электродного водонагревателя

$U_c, \text{ В}$	$t^0, \text{ C}$	$\tau, \text{ с}$	$I, \text{ А}$	$i, \text{ A/cm}^2$	$P, \text{ Вт}$	$G, \text{ л/мин}$	$\eta, \%$
220	20						
	30						
	40						
	50						
	60						
	70						

Плотность тока на электродах определяется по максимальному току I и его активной поверхности (площади) s :

$$i = \frac{I}{s}. \quad (13.1)$$

Мощность электродного водонагревателя рассчитывается по следующей зависимости:

$$P = \sqrt{3}IU. \quad (13.2)$$

Производительность электродного водонагревателя:

$$G = \frac{V \cdot 60}{\tau}, \quad (13.3)$$

где V – объем воды, л;

τ – время нагрева, мин.

Коэффициент полезного действия электродного водонагревателя:

$$\eta = \frac{G \cdot (t_{\text{кон}}^0 - t_{\text{нач}}^0)}{864 \cdot P_{\text{ср}}}, \quad (13.4)$$

где $P_{\text{ср}}$ – средняя мощность нагревателя, Вт:

$$P_{\text{ср}} = \frac{P_{\text{нач}} - P_{\text{кон}}}{2}. \quad (13.5)$$

Контрольные вопросы

1. Что относится к основным параметрам электродного водонагревателя?
2. От чего зависит КПД электродного водонагревателя?
3. Вследствие чего образуется взрывоопасный гремучий газ?
4. Какой материал используют для изготовления электродов?
5. От чего зависит мощность электродного водонагревателя?
6. Почему вода, подогретая в электродных котлах, не годится для питья?
7. Можно ли применять электродные котлы для тепловой обработки пищевых жидкостей.
8. Как влияет электролиз на теплоноситель и котел?
9. Можно ли применять в качестве теплоносителя дистиллированную воду в электродных котлах?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 14

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЭЛЕМЕНТНЫХ НЕПРОТОЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия элементных непроточных водонагревателей.

Для обеспечения горячей водой объектов сельскохозяйственного производства широкое применение нашли элементные водонагреватели. В элементных водонагревателях нагрев воды осуществляется посредством теплопередачи от герметических нагревательных элементов (ТЭНов), помещенных в нагреваемую воду. В зависимости от режима работы принято различать водонагреватели емкостные (непроточные) и проточные.

Маркировка ТЭН по ГОСТ: ТЭН-123/456,

где 1 – развернутая длина: 0,25; 0,30; 0,35; 0,42; 0,50; 0,60; 0,70; 0,78; 0,85; 1,00; 1,20; 1,40; 1,70; 2,00; 2,40; 2,80; 3,50; 4,00; 4,75; 5,60; 6,30 (м);

2 – условное обозначение длины контактного вывода. Длина контактного стержня (мм) в заделе: А – 40; Б – 65; В – 100; Г – 125; Д – 160; Е – 250; Ж – 400; З – 630.

3 – наружный диаметр трубки: номинальные диаметры: 8; 9,5; 10; 12,5; 13; 16 (мм);

4 – номинальная мощность $P_{ном}$: 50; 60; 80; 100; 120; 160; 200; 250; 320; 400; 600; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 3500; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000; 12000; 12500; 16000; 20000; 25000 (Вт);

5 – условное обозначение нагреваемой среды:

- Х, П, Р, Ю – вода, слабый раствор щелочей и кислот (кипячение) (в зависимости от удельной мощности);
- И – жиры и пищевые масла (до 300°C);
- Ш – щелочи, селитры (до 600°C) и плавление;
- Ф – олово, свинец, типографский сплав (до 450°C) и плавление;
- М – металлические формы (стальные и чугунные) (ТЭН залиты в алюминий), нагрев до 200°C;
- воздух и смеси газов:
 - С (в спокойном состоянии до 450°C);
 - Т (450-700 °C);
 - О (среда движется со скоростью 6 м/с, 450°C);

– К (среда движется со скоростью 6 м/с, 450-600 °С);
6 – номинальное напряжение: 12; 24; 36; 48; 55; 60; 110; 127;
220; 380 (В). Например: ТЭН-32А10/0,4Р220.

В сельскохозяйственном производстве широко распространены трехфазные емкостные элементные водонагреватели. К ним относятся водонагреватели типов: ВЭТ (водоподогреватель электрический термос), УАП (универсальный автоматический подогреватель), САОС (нагрев сопротивлением, аккумуляторного типа, открытая система горячего водоснабжения), САЗС (нагрев сопротивлением аккумуляторного типа, закрытая система горячего водоснабжения).

Электроводонагреватель типа ВЭТ. ВЭТ (водонагреватель электрический – термос) предназначены для нагрева воды до 90°С, потребляемой на различные технологические нужды в животноводстве, мастерских, гаражах, коммунально-бытовых предприятиях (рис. 14.1).

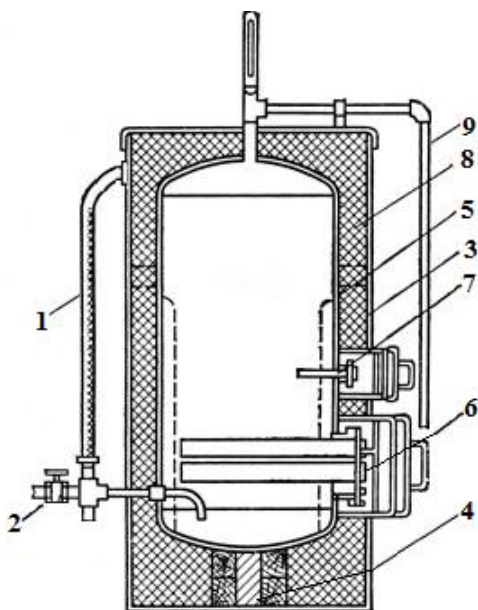


Рис. 14.1. Водонагреватель электрический термос ВЭТ-200:

1 – изолирующая вставка трубопровода холодной воды; 2 – впускной вентиль;
3 – кожух; 4 – крестовина; 5 – резервуар; 6 – нагреватель; 7 – температурное реле;
8 – вата минеральная; 9 – разборный трубопровод

Их изготавливают вместимостью от 200 до 1600 л и мощностью от 6 до 33 кВт (табл. 14.1). Водонагреватель ВЭТ-200 имеет резервуар со сферическим днищем и наружный жестяной кожух, между которыми заложена тепловая изоляция. Нагревательное устройство состоит из трубчатых элементов (ТЭН), соединенных в «звезду» при питании от сети 380/220 В. Питание водой осуществляется через поплавковый поршневой клапан, автоматически поддерживающий определенный уровень заполнения резервуара. Заданная температура воды поддерживается автоматически при помощи dilatометрического терморегулятора. Водонагреватели проточного тепла отличаются компактностью и быстродействием.

Таблица 14.1

Основные технические данные электроводонагревателей типа ВЭТ

Показатель	ВЭТ-200	ВЭТ-400	ВЭТ-800	ВЭТ-1600
Вместимость резервуара, л	200	400	800	1600
Мощность, кВт	6	10,5	16,5 (6+10,5)	31,5 (10,5+21)
Габаритная высота, мм	1380	1600	1980	2465
Высота кожуха, мм	1320	1550	1910	2400
Диаметр кожуха, мм	670	790	950	1200
Внутренний диаметр резервуара, мм	500	635	800	1000
Масса, кг	150	200	350	650
Число нагревательных устройств, шт.	1	1	2	2
КПД (минимальный), %	92	94	95	96
Время нагрева на 80 °С, ч	3,4	3,8	4,7	5
Начальная скорость естественного охлаждения, град/ч	1,2	1,0	0,8	0,6
Суточная производительность при свободном графике включения, л	800	1500	4000	8000
Напряжение сети, В	380/220 или 220/127			

Электроводонагреватель типа УАП. По назначению и принципу действия эти водонагреватели аналогичны электроводонагревателям типа ВЭТ. В таблице 14.2 приведены основные технические данные электроводонагревателей типа УАП.

Водонагреватели УАП-800 и УАП-1600 работают с тремя уровнями мощности, определенными соотношениями 1 : 2/3 : 1/3 и

соответствующими тремя режимами работы – форсированный нагрев, аккумуляторный режим работы и разогрев 1/4 объема.

Таблица 14.2

Основные технические данные водонагревателей УАП

Показатель	УАП 400/0,9-М1	УАП 800/0,9-М1	УАП 1600/0,9-И1
Вместимость резервуара, л	400	800	1600
Мощность, кВт	12	18	30
Напряжение сети, В	380/220		
Рабочая температура, °С	90		
Время нагрева до рабочей температуры, ч	2,9	4,0	4,6
Габариты, мм:			
– диаметр	740	1098	1098
– высота	1850	1610	2525
Масса, кг	130	320	550

Емкостные электрические водонагреватели типа УАП, из которых наиболее распространен водонагреватель УАП-400/0,9-М1 (рис. 14.2), предназначены для нагрева воды на животноводческих фермах, в гаражах, мастерских, предприятиях бытового и коммунального назначения. В обозначении водонагревателя: 400 – вместимость резервуара в литрах, 0,9 – температура горячей воды (90°С), М1 – модификация. Мощность водонагревателя 12 кВт (6 ТЭНов по 2 кВт), продолжительность нагрева воды до максимальной температуры 4 ч. Автоматическое поддержание температуры осуществляется при помощи температурного реле *SK*, которое через контакт промежуточного реле *KV* включает или обесточивает катушку электромагнитного пускателя *KM*, включающего или отключающего ТЭНы водонагревателя. Свечение лампы *HC* сигнализирует о включенном состоянии аппарата. Электронагревательные установки широко применяют в сельскохозяйственном производстве. Для подогрева воды используют установки прямого и косвенного нагрева, а также установки индукционного и диэлектрического нагрева. Автоматическое управление электроводонагревателями осуществляется по температуре, а электропаровыми котлами – дополнительно еще и по давлению пара. Перед включением в сеть элементные водонагреватели обязательно следует заполнить водой, так как невыполнение этого требования приводит к выходу из строя нагревательных элементов. Электрод-

ные же водонагреватели не имеют этой особенности. На рисунке 14.2 приведено устройство водонагревателя типа УАП, выпускаемого вместо водонагревателя ВЭТ, и электрическая схема управления им.

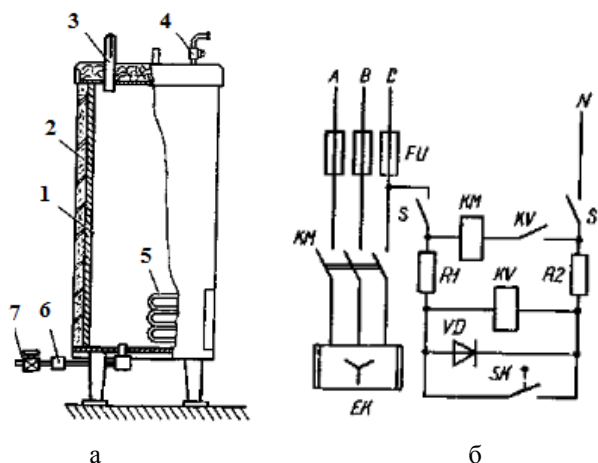


Рис. 14.2. Емкостной электроводонагреватель УАП-400/0,9 (а) и его электрическая схема (б):

1 – резервуар; 2 – тепловая изоляция; 3 – термометр; 4, 8 – патрубки для горячей и холодной воды; 5 – нагревательный блок; 6 – трубка для питающих проводов; 7 – ТЭНы (6 нагревателей); 9 – обратный клапан; 10 – запорный вентиль

Водонагреватель предназначен для нагрева воды до 90°C и выполнен в виде стального резервуара 1 с патрубком 4 для горячей воды. Резервуар теплоизолирован стекловатой 2 и закрыт внешним металлическим кожухом. Благодаря теплоизоляции температура воды снижается очень медленно. На подводящем трубопроводе установлены обратный клапан 6 и запорный вентиль 7. Водоподогреватель подключают к водопроводу с избыточным давлением не менее 50 кПа, под действием которого горячая вода вытесняется через патрубок 4. Автоматическое управление элементами нагревателями 5 (ТЭНы) осуществляется при помощи контактного термометра 3, контакты SK которого при высокой температуре воды шунтируют обмотку магнитного пускателя KM, а последний отключает электронагреватели EK от сетевого напряжения. Повторное подключение электронагревателя к сети происходит при снижении температуры воды на 5°C . Диод VD применен для облегчения работы контактов SK. ТЭНы более мощных водонагрева-

телей типа УАП устанавливают в двух зонах резервуара: в нижней и верхней. Каждой группой ТЭНов управляет свой термодатчик.

Водонагреватели типа САОС и САОЗ. Предназначены для нагрева воды в системах снабжения горячей водой животноводческих ферм (промывка молочного оборудования, приготовление кормов и др.), гаражей, пунктов технического обслуживания и коммунально-бытовых предприятий.

Аккумуляционные электроводонагреватели высокого давления типа САОС и САЗС (рис. 14.3) имеют вместимость 400, 800 и 1600 л. Номинальная мощность водонагревателей 12, 18 и 30 кВт; время разогрева воды до номинальной температуры (90°С) соответственно 3,5; 5 и 6 ч.

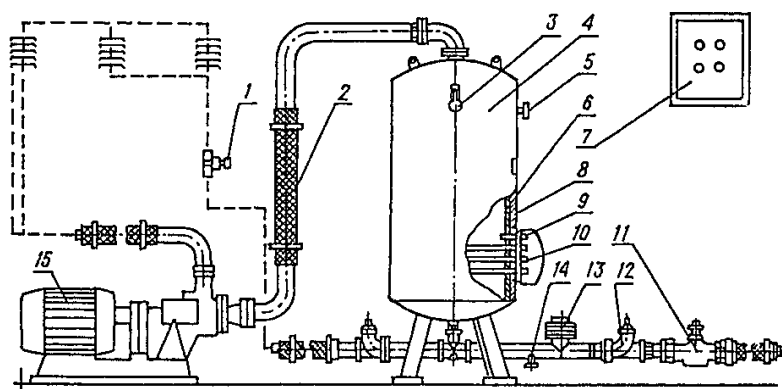


Рис. 14.3. Электроводонагреватель САЗС-400/90-III:

- 1 – датчик температуры воды в системе водоснабжения;
2 – вставка изолирующая; 3 – термометр; 4 – кожух; 5 – термоконтактор аварийной защиты; 6 – резервуар; 7 – ящик управления; 8 – теплоизоляция; 9 – датчик температуры воды в водонагревателе; 10 – блок нагревательный; 11 – вентиль;
12 – клапан обратный; 13 – клапан избыточного давления; 14 – пробка слива; 15 – агрегат электронасосный

Электроводонагреватели типа САОС работают при избыточном давлении, равном давлению в электропроводной сети, не имеют запорного вентиля на входном патрубке.

Электроводонагреватели САЗС имеют дополнительную систему замкнутого трубопровода с встроенным циркуляционным насосом, работой которого управляет температурное реле, установленное в наиболее холодном месте помещения.

Контрольные вопросы

1. Устройство и применение трубчатых электронагревателей.
2. Задача трубчатых электронагревателей.
3. Основные достоинства и недостатки элементных водонагревателей емкостного типа.
4. Изменяется ли мощность и ток нагревателя в процессе нагрева и почему?
5. Какие мероприятия предусмотрены для обеспечения электробезопасности при работе с элементными водонагревателями?
6. В чем различие между проточным и емкостным водонагревателями?
7. Какие типы непроточных элементных водонагревателей Вы знаете?
8. Какие типы емкостных аккумулирующих водонагревателей Вы знаете?
9. Что влияет на срок службы элементных электронагревателей?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ОСНОВНЫХ ТИПОВ ЭЛЕМЕНТНЫХ ПРОТОЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия, элементных проточных водонагревателей.

Элементные водонагреватели работают по принципу косвенного электронагрева воды осуществляемого при помощи ТЭНов. Эти электроустановки обладают достаточной электробезопасностью, просты в обслуживании и широко применяются для нагрева воды непосредственно в местах ее потребления. Основная особенность этих водонагревателей – сравнительно небольшая производительность при высокой электробезопасности и простоте обслуживании, доступной для неэлектротехнического персонала. В элементных водонагревателях электрический ток не влияет на качество воды, мощность водонагревателей за время нагрева практически не меняется. Недостатки элементных водонагревателей заключаются в сравнительно низкой эксплуатационной надежности из-за ограниченного срока службы ТЭНов и большом удельном расходе электроэнергии на нагрев воды (более низкий КПД).

Подогрев проточной воды. Примером эффективного использования элементных водонагревателей являются системы электроподогрева воды для поения животных и птицы. Согласно зоотехническим требованиям, температура воды в поилках должна быть: для крупного рогатого скота не ниже $+(5-7)^{\circ}\text{C}$, для кур-несушек $+(10-13)^{\circ}\text{C}$. Кроме того, подогрев воды в циркуляционных системах необходим, чтобы предотвратить замерзание трубопроводов зимой в неотапливаемых помещениях.

Электроводонагреватель типа ЭПВ. В сельскохозяйственном производстве распространен электрический проточный водонагреватель ЭПВ-2А (рис. 15.1). Нагрев воды производится тремя ТЭ-Нами, установленными в цилиндрический теплоизолированный корпус 2. Общая мощность ТЭНов 12 кВт. При температуре нагрева воды 90°C производительность аппарата достигает 120 л/ч, что достаточно для удовлетворения потребности в горячей воде, например коровника на 100 голов.

Температуру нагретой воды регулируют степенью открытия вентиля на подводящем трубопроводе или автоматическим включением и отключением элементов при заданном расходе воды. Во избежание перегрева нагревательных элементов 1 вода должна непрерывно протекать через аппарат. Для предотвращения возможности взрыва при интенсивном парообразовании, например, в случае прекращения потока воды, на отводящем штуцере 4 установлен предохранительный клапан давления 5.

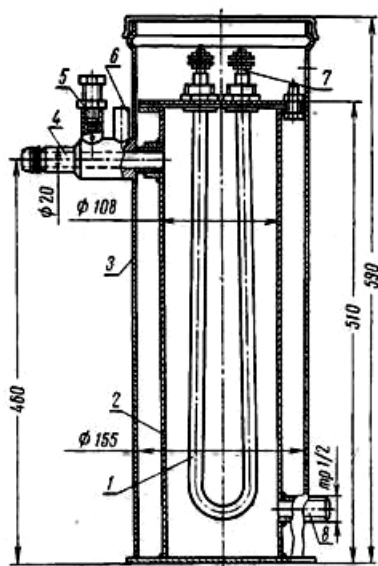


Рис. 15.1. Проточный электроводонагреватель ЭПВ-2А:

1 – ТЭНы; 2 – корпус; 3 – наружный кожух; 4 и 8 – отводящий и подводящий штуцер; 5 – предохранительный клапан; 6 – штуцер для термометра; 7 – выходы нагревателей

Электроводонагреватель типа ВЭП. Водонагреватель ВЭП-600 (рис. 15.2) предназначен для подогрева питьевой воды в коровниках до 200 коров с привязным содержанием. Его можно также использовать для подогрева воды до 80°C, используемой для технических нужд. Мощность ТЭНов составляет 10 кВт. Водонагреватель включает в себя проточный нагревательный бак 4 с предохранительным клапаном 6, терморегулятором 7 и термометром 8. Циркуляция воды в системе осуществляется при помощи насоса 9. В комплект установки входит шкаф управления. Темпе-

ратуру воды на выходе нагревателя регулирует термореле, а цикличность работы насоса автоматически обеспечивает поддержание заданной температуры воды при помощи термореле, установленного в самой холодной зоне системы поения.

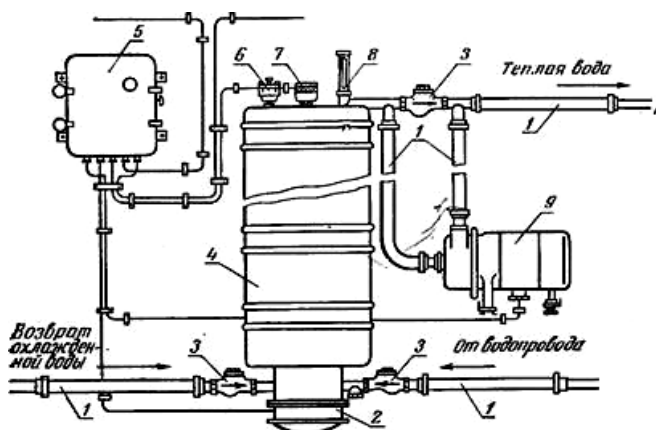


Рис. 15.2. Водонагреватель электрический ВЭП-600:

- 1 – изолирующие вставки; 2 – нагревательный блок; 3 – обратный клапан;
 4 – бак; 5 – шкаф управления; 6 – предохранительный клапан;
 7 – термоконтрактор; 8 – термометр; 9 – насос

При беспривязном содержании крупного рогатого скота применяют специальные групповые автопоилки с электроподогревом воды типа АГК-4 мощностью 1 кВт.

Электроводонагреватель типа ЭВ. Проточный элементный водонагреватель ЭВ-Ф-15 состоит из водонагревателя и шкафа управления (рис. 15.3). Температуру воды регулируют ее подачей и контролируют по термометру. При 75-80°C термореле своим контактом SK (рис. 15.4) отключает водонагреватель от сети. В автоматическом режиме работы водонагреватель включается через 15-45 с после включения SA и замыкания контакта SK. Выдержку обеспечивает реле времени KTI. При замкнутом контакте SK конденсатор C2 заряжается от выпрямителя VD2...VD5 через SK и R1. При достижении напряжения на C2 определенной величины транзистор VT открывается и включает тиристор VS1, который закорачивает цепь постоянного тока выпрямителя и тем самым обеспечивает питание катушки пускателя KM на переменном токе. Выдержка времени снижает частоту включений пускателя и подгорание контакта термореле.

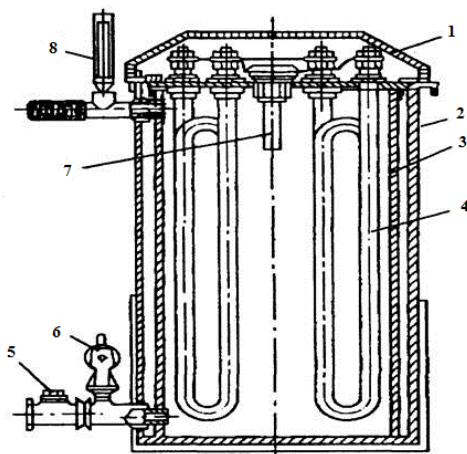


Рис. 15.3. Водонагреватель ЭВ-Ф-15:

1 – крышка; 2 – кожух; 3 – корпус; 4 – трубчатые водонагреватели; 5 – клапан обратный; 6 – клапан избыточного давления; 7 – термореле; 8 – термометр

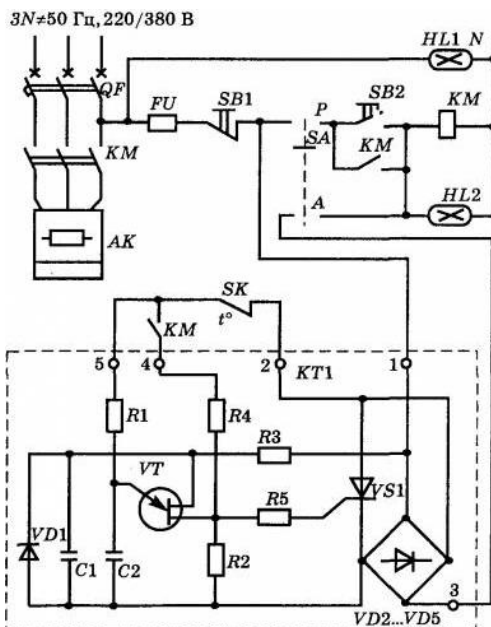


Рис. 15.4. Принципиальная электрическая схема работы ЭВ-Ф-15

Электроводонагреватель типа ПВ. Проточный индукционный водонагреватель ПВ-1 представляет собой трехфазный понижающий трансформатор, первичная обмотка которого выполнена медным проводом, а вторичная изготовлена из стальной трубы диаметром

20 мм и электрически замкнута накоротко.

Токи, достигающие тысяч ампер, нагревают вторичную обмотку, которая отдает теплоту воде, протекающей внутри нее. Температуру воды регулируют ее подачей. Электрическая схема содержит защиту от перегрева воды (термометр манометрический) и понижающий трансформатор (устройство УВТЗ-1).

Контрольные вопросы

1. Задача трубчатых электронагревателей.
2. Основные достоинства и недостатки элементных водонагревателей емкостного типа.
3. Изменяется ли мощность и ток нагревателя в процессе нагрева и почему?
4. Какие мероприятия предусмотрены для обеспечения электробезопасности при работе с элементными водонагревателями?
5. В чем различие между проточным и емкостным водонагревателями?
6. Какие типы проточных элементных водонагревателей Вы знаете?
7. В чем преимущества электрических водонагревателей от водонагревателей, использующих химическую энергию сжигаемого топлива?
8. Какие средства используются для автоматического управления работой электрических водонагревателей?
9. Что влияет на срок службы элементных электронагревателей?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 16

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОБОГРЕВА В ПАРНИКАХ И ТЕПЛИЦАХ

Цель работы: изучить способы электрического обогрева в парниках и теплицах.

В современных культивационных сооружениях закрытого грунта существует возможность круглогодичного выращивания свежих овощей с урожайностью до 100 кг с квадратного метра, что существенно превышает урожайность в открытом грунте в наиболее благоприятных для возделывания овощей странах.

Для выращивания растений помещения закрытого грунта оборудуют системами отопления, вентиляции, полива, добавочного освещения (облучения) и другими, предназначенными для создания надлежащих условий устанавливаемых агротехникой всесезонного производства овощной продукции. Среди параметров микроклимата наиболее важным является температурно-влажностный режим внутри помещений.

Оптимальные температурные условия для растений можно создать лишь при гибкой системе обогрева почвы и воздушной среды с надежной автоматизацией температурного режима.

В закрытом грунте применяются три вида обогрева: почвенный, воздушный и почвенно-воздушный. Агротехническим условиям в наибольшей степени отвечает почвенно-воздушный обогрев, который по затратам энергии является наиболее экономичным. В теплицах при почвенно-воздушном обогреве расход тепла почти в 2 раза меньше, чем при почвенном обогреве. В парниках, где объем воздушной среды сравнительно мал, иногда ограничиваются только почвенным обогревом.

Электрический обогрев обладает рядом ценных преимуществ по сравнению с другими способами обогрева: возможностью точной регулировки температурных режимов; использования одного и того же вида энергии как для обогрева, так и для досвечивания растений, их полива, кроме этого сам процесс электрообогрева очень просто автоматизируется, что характеризуется значительной экономией затрачиваемых средств.

Наибольшее распространение электрообогрев получил в парниковых хозяйствах южной зоны страны, успешно конкурируя с

другими способами обогрева. Затраты энергии на электрический обогрев парников меньше, чем на водяной, а качество рассады лучше, да и урожай на 10-15% больше. Это как раз и объясняется в основном лучшей организацией автоматизации процесса. Затраты на электрообогрев парников окупаются за 3-4 года. Приведенные затраты на электрообогрев меньше, чем при обогреве горячей водой от местной котельной.

Заметное распространение получает электрический обогрев почвы и воздуха в весенних пленочных теплицах, где все затраты, связанные с поддержанием надлежащего температурного режима, окупаются менее, чем за сезон эксплуатации сооружений.

Менее распространен электрический обогрев зимних теплиц, однако он может успешно применяться в качестве резервного, а также для снятия пиков тепловой нагрузки в периоды, когда наружные температуры превышают расчетные значения.

К наиболее распространенным способам электрообогрева почвы и воздуха в парниках и теплицах относятся элементный и электрокалориферный.

Обогрев почвы возможен электродным способом, но из-за повышенной электроопасности и значительного расхода листовой стали на электроды, которые к тому же затрудняют механическую обработку почвы, этот способ не получил распространения.

В теплицах иногда применяют инфракрасный обогрев. Недостаток этого способа заключается в том, что из-за опасности ожогов растений трудно создать необходимую плотность облучения и равномерное распределение тепловых лучей в пространстве теплицы.

Элементный обогрев почвы и воздуха можно осуществлять различными способами, которые отличаются конструктивным выполнением нагревательных устройств, их размещением, значением питающего напряжения и др.

В качестве нагревательных элементов для почвенного обогрева чаще всего используют стальную оцинкованную проволоку диаметром 2-7 мм, нагревательные провода (ПОСХВ, ПОСХП и др.), нагревательный кабель.

Для обогрева почвы нагревательные элементы размещают следующими способами:

а) в асбоцементных или гончарных трубах, которые укладывают в слой песка под растительным слоем почвы (трубчатые нагревательные элементы);

б) непосредственно в слое песка под почвой;

в) в асфальтобетонном монолите под почвой.

Частным случаем последнего способа является обогрев почвы асфальтобетонными нагревательными блоками.

Для обогрева воздуха нагревательные элементы подвешивают на конструкциях помещений (непосредственно или в асбоцементных трубах).

Для питания устройств почвенного и воздушного обогрева используют сетевое (380/220 В) или пониженное (12-127 В) напряжение.

Для обогрева почвы трубчатыми нагревательными элементами используют асбестоцементные или гончарные трубы диаметром 100-150 мм, а для обогрева воздуха – 50-75 мм. Для повышения электроизоляционных свойств асбоцементные трубы предварительно пропитывают в горячем битуме или трансформаторном масле. Стыки труб тщательно заделывают цементом, чтобы не попадала вода, в противном случае нагревательные элементы быстро выйдут из строя.

Трубы защищают нагревательные элементы от механических повреждений, увеличивая безопасность обслуживания и способствуя выравниванию температуры на поверхности почвы. Увеличение диаметра почвенных труб способствует лучшему выравниванию температурного поля почвенного слоя.

Трубы почвенного и воздушного обогрева необходимо прокладывать с уклоном 0,002-0,003. Внутри труб на изолирующих опорных дисках протягивают голую оцинкованную проволоку (рис. 16.1, а). На выходе из труб проволоку крепят на изоляторах в монтажных каналах по торцам парника. Удельная мощность трубчатых элементов не превышает 100 Вт/м.

Обогрев трубчатыми элементами на сетевом напряжении связан с меньшими капитальными затратами по сравнению с питанием пониженным напряжением. Однако в этом случае нужны более тщательные мероприятия по технике безопасности. Пониженное напряжение требует применения понижающих трансформаторов и большего расхода материалов на подводящие провода и шины.

При обогреве почвы неизолированной стальной проволокой ее укладывают параллельными нитями вдоль парника в слое песка толщиной 100-150 мм, находящегося под почвой. Для этого используют оцинкованную проволоку диаметром не менее 4 мм.

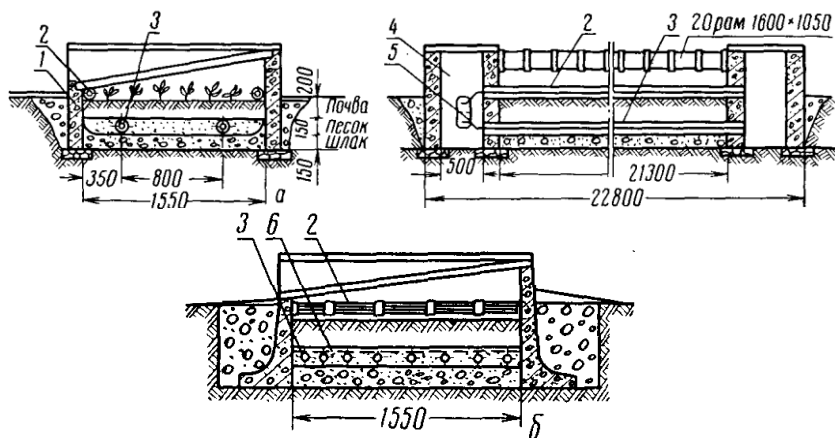


Рис. 16.1. Устройство парников с электрообогревом:

- а* – обогрев трубчатыми нагревательными элементами;
- б* – обогрев нагревательными проводами в слое песка; 1 – парник; 2 – элементы воздушного обогрева; 3 – элементы почвенного обогрева; 4 – монтажный канал; 5 – переходной канал; 6 – экранная металлическая сетка

Песок, обладая высокой теплопроводностью, улучшает теплоотдачу проволоки и выравнивает температуру по поверхности почвенного слоя. Удельная мощность нагревательных элементов не превышает 15-25 Вт/м. Для питания в целях безопасности используют пониженное напряжение 24-36 В. Над проволокой на расстоянии 50-60 мм от нее укладывают металлическую сетку с ячейками 30-60 мм, присоединяемую к заземлению. Число параллельных ветвей выбирают исходя из условий допустимой температуры и равномерности нагрева; оно составляет от 4 до 8. Во избежание интенсивного высыхания почвы и сгорания перегноя температура проволоки должна быть не выше 40°C. При обогреве стальной оцинкованной проволокой расход на нагревательные элементы невелик, но при этом способе обогрева требуются понижающие трансформаторы и много расходуется металла на подвод тока.

Обогрев почвы и воздуха нагревательным проводом аналогичен обогреву стальной проволокой (рис. 16.1, б). Провод можно укладывать в асбоцементные трубы, проложенные в слое песка под растительным слоем, или непосредственно в слой песка. При укладке в трубах достигается безопасность обслуживания, легкость смены перегоревшего провода, защита от механических повреждений. Однако это требует значительного количества труб. Так, на один парник при двух почвенных и двух воздушных элементах требуется около 86 м асбоцементных труб. При непосредственной укладке в песок провод от повреждений защищают металлической сеткой с ячейками 30-50 мм, укладываемой в песок над проводом на расстоянии 50 мм (рис. 16.1, б), или бетонной стяжкой. Сетку заземляют, и она служит дополнительной мерой электробезопасности на случай повреждения изоляции провода. Шаг укладки провода в песок выбирают из условия, чтобы неравномерность температуры не превышала 3-4. В среднем шаг принимают равным 100-150 мм. Для этого на 1 м² почвы требуется 4-6 м провода. Для обогрева воздуха нагревательный провод подвешивают на строительных конструкциях или крепят к несущему тросу при помощи специальных подвесок.

Общую длину провода обогрева почвы и воздуха разбивают на ряд отдельных секций. Изменяя схему их включения, можно регулировать мощность обогрева.

Стальную проволоку или нагревательный провод можно укладывать в асфальтобетонный монолит толщиной 30-70 мм, закладываемый под почвенный слой (рис. 16.2).

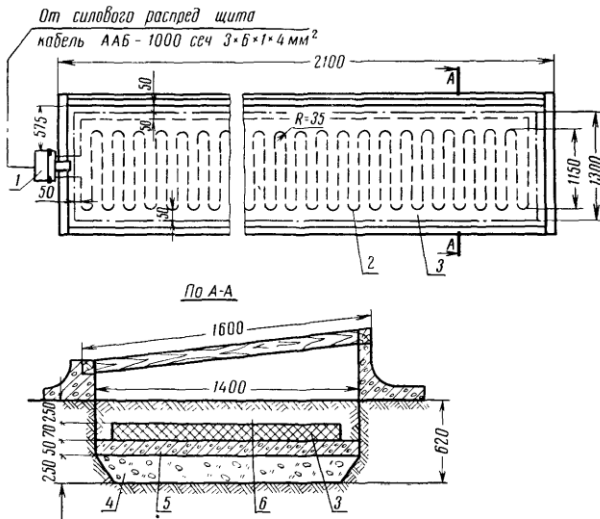


Рис. 16.2. Устройство парника со сплошным асфальтобетонным покрытием нагревательного элемента:

1 – клеммная коробка; 2 – нагревательный элемент;
3 – сплошное асфальтобетонное покрытие; 4 – шлак; 5 – гравий; 6 – почва

Такой способ повышает теплоаккумулирующую способность устройств обогрева, безопасность обслуживания, а также равномерность распределения температуры.

Естественно, этот способ требует больших затрат на сооружение обогрева и, кроме того, связан с трудностью замены поврежденного (сгоревшего) нагревательного элемента.

В последние годы получает распространение электрокалориферный обогрев почвы и воздуха, особенно в весенних пленочных теплицах. В парниках электрокалориферы обогревают только почву, прогоняя нагретый воздух по замкнутой системе воздухопроводов и подпочвенных труб, соединенных с калорифером (рис. 16.3). В теплицах могут обогреваться одновременно и почва, и воздух. Для обогрева почвы, так же, как и в парниках, под растительным слоем прокладывают воздухопроводные трубы. Если обогреваются почва и воздух, то теплоноситель из подпочвенных каналов поступает в воздушную зону теплицы, откуда вновь забирается калорифером. При обогреве только воздуха применяют воздухораспределительные каналы в виде перфорированных пластмассовых труб

диаметром 18-25 см. Выходящий из труб воздух не должен попадать непосредственно на растения.

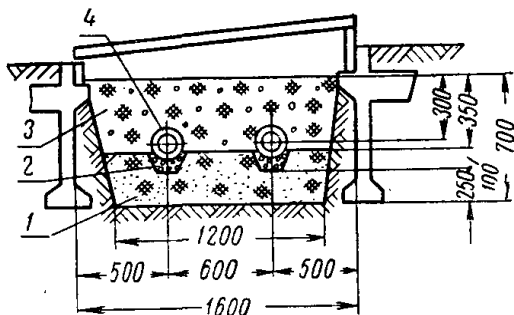


Рис. 16.3. Поперечное сечение парника, обогреваемого электрокалорифером:

1 – утрамбованный грунт; 2 – щебень; 3 – питательный слой; 4 – греющие трубы

В отличие от парников воздух в теплицах необходимо обогревать, так как его объем в 10-15 раз больше, чем в парниках. Для этой цели используют электрокалориферы. Элементный обогрев воздуха эффективен только в малых объемах (в парниках).

Установки электрокалориферного обогрева легко автоматизировать, на них мало расходуется материалов, их можно использовать для обогрева почвы и воздуха, для вентиляции (при достаточной солнечной радиации); кроме того, их легко перемещать.

Электрооборудование парников и теплиц должно быть устойчивым к повышенной влажности, воздействию химически активных растворов и газов.

Контрольные вопросы

1. Область использования электронагрева в закрытом грунте.
2. Для чего необходимо отопление в теплицах?
3. Способы размещения нагревательных элементов для обогрева почвы.
4. Что используют в качестве нагревательных элементов?
5. В чем заключаются особые условия эксплуатации электрооборудования и техники безопасности в культивационных помещениях?
6. Какие устройства используются для обогрева воздуха в теплицах?
7. Способы электрического обогрева парников и теплиц.
8. Какими преимуществами при выращивании растений обладают помещения закрытого грунта?
9. Устройство парника со сплошным асфальтобетонным покрытием.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 17

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РЕМОНТНО-МЕХАНИЧЕСКИХ МАСТЕРСКИХ

Цель работы: изучить конструкцию электротермического оборудования ремонтно-механических мастерских.

Нагрев и термическая обработка металла играют существенную роль в процессах ремонта сельскохозяйственной техники. Некоторые виды ремонта вообще невозможны без термической обработки.

В ремонтном производстве электронагрев в основном применяется для следующих целей: нагрева деталей и инструмента для термической и термохимической обработки и пайки, сварки, нагрева заготовок перед механической обработкой, металлизации, наплавки изношенных поверхностей и др.

Для выполнения этих операций сельскохозяйственные ремонтные предприятия оснащены разнообразным электротермическим оборудованием, которое мало отличается от соответствующего оборудования промышленных предприятий и подробно описано в литературе по промышленной электротермии. В ремонтном производстве, гаражах и на других подсобных предприятиях применяются также установки низкотемпературного электронагрева для вулканизации резины, подогрева моющих растворов, предпускового подогрева двигателей тракторов и автомобилей и др.

Электрические печи сопротивления – наиболее распространенный вид электротермического оборудования. На сельскохозяйственных ремонтных предприятиях применяют в основном камерные электропечи сопротивления с металлическими нагревателями, рассчитанные на работу с обычной (окислительной) средой (типа СНО) и с защитной средой (типа СНЗ). Печи сопротивления с металлическими нагревателями подразделяются на низкотемпературные (до 700°C), среднетемпературные (до 1200°C) и высокотемпературные (до 1300°C).

При более высоких температурах применяют печи с нагревателями из дисилицида молибдена (неорганическое соединение металла молибдена и кремния), карборунда и других неметаллических материалов. На небольших ремонтных предприятиях наиболее распространены печи типа СНО с окислительной (воздушной)

средой. Они предназначены для нагрева деталей под закалку, отпуск, отжиг, нормализацию, цементацию, пайку твердыми припоями, нагрев заготовок под ковку, штамповку, прессование. Эти печи выпускают на мощности от 12 до 125 кВт. Конструкция их показана на рисунке 17.1. В печи предусмотрена камера, сложенная из огнеупоров и тепловой изоляции и заключенная в металлический кожух. На внутренних огнеупорных стенках камеры смонтированы электрические нагреватели из нихрома круглого или прямоугольного сечения.

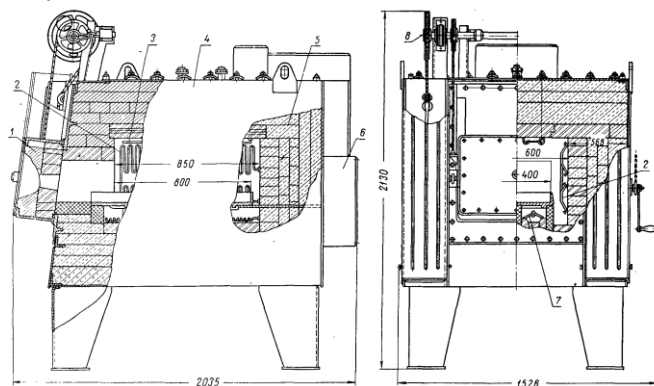


Рис. 17.1. Электрическая печь сопротивления камерная СНО-4.8.2,5/10:

1 – дверца; 2 – нагреватель боковой; 3 – нагреватель сводовый; 4 – кожух;
5 – футеровка; 6 – выходы нагревателей; 7 – нагреватель подовый; 8 – механизм подъема дверцы

Электрические печи типа СНО подключают к сети непосредственно или через автотрансформаторы. Для управления печами выпускаются щиты управления типа ИЗР (измерение, запись и регулирование температуры) или более простые (для маломощных печей) типа ИР.

Электродные соляные ванны предназначены для жидкостной химико-термической обработки изделий (цементация, цианирование), нагрева под закалку и пайку твердыми припоями. Нагрев происходит в расплаве солей, находящихся в сварном металлическом тигле. Тепло в ванне выделяется при прохождении тока по расплаву между электродами. Рабочая температура достигает 850°C. Питание к электродам подается от понижающих трансформаторов.

Электрические масляные и щелочные ванны предназначены для отпуска деталей и инструмента после закалки. Рабочая температура составляет 200–250 °С. Обогрев осуществляется ТЭНами.

Преимущества нагрева в жидкостных ваннах заключаются в более быстром и равномерном нагреве деталей особенно сложной формы. Недостаток ванн: большой расход электроэнергии, большая продолжительность разогрева, тяжелые условия труда, особенно при обслуживании соляных ванн.

Электросварочное оборудование. Операции сварки, заварки, наплавки, резки металлов – самые распространенные при ремонте сельскохозяйственной техники. На ремонтных предприятиях приходится сваривать детали, различные по толщине и материалу, поэтому одно из основных требований, предъявляемых к сварочному оборудованию, – универсальность.

Для ручной дуговой сварки, резки и наплавки переменным током используют сварочные трансформаторы с отдельным регулирующим дросселем (СТЭ-24У, СТ-34У), со встроенным дросселем (СТН-350, СТН-500), с повышенным магнитным рассеянием (ТС-300, ТСК-300, ТС-500) и др. В последние годы наибольшее распространение получили сварочные трансформаторы типа ТС (рис. 17.2).

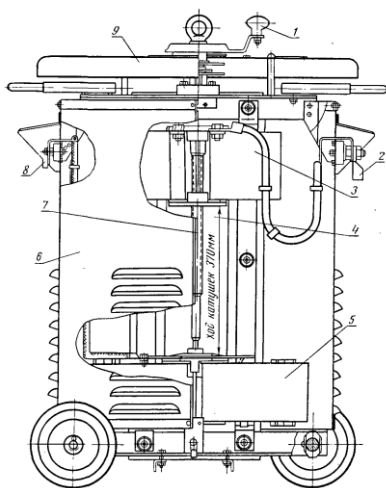


Рис. 17.2. Сварочный трансформатор ТС-500:

1 – рукоятка механизма регулирования сварочного тока; 2 – клеммы низкого напряжения; 3 – подвижная катушка; 4 – магнитопровод;

5 – неподвижная катушка; 6 – кожух; 7 – регулировочный винт;
8 – клеммы низкого напряжения; 9 – крышка

Для питания электрической дуги при полуавтоматической и автоматической дуговой сварке под слоем флюса используют трансформаторы с дистанционным управлением ТСД-500, ТСД-1000-2 и др.

При восстановлении изношенных деталей находит применение вибродуговая наплавка, для которой используют обычные сварочные трансформаторы.

Процесс вибродуговой наплавки отличается от обычной дуговой наплавки вибрацией электрода. Вследствие изменения размеров стекающих капель существенно улучшаются процесс наплавки и механические свойства наплавленного слоя, снижается перегрев металла.

Для дуговой сварки постоянным током и контактно-дуговой вибронеплавки используют сварочные преобразователи ПСО-120, ПСО-300, ПСО-500 на номинальные сварочные токи соответственно 120, 300 и 500 А. Все большее распространение получают наиболее совершенные аппараты электродуговой сварки – сварочные выпрямители: селеновые ВСС-120-4, ВСС-300-3 (рис. 17.3) и кремниевые ВКС-120, ВКС-300. По сравнению со сварочными преобразователями выпрямители имеют на 30-50% меньшую металлоемкость и на 20% выше КПД.

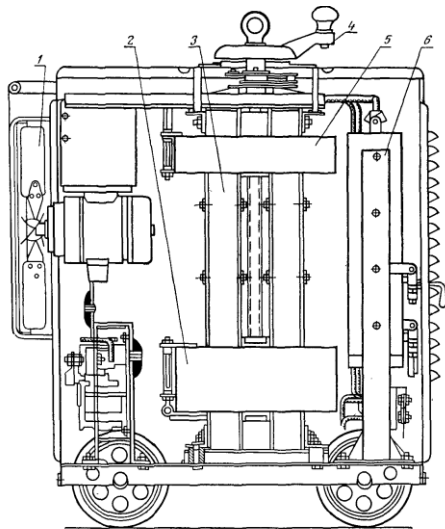


Рис. 17.3. Сварочный выпрямитель ВСС-300:

- 1 – вентилятор; 2 – неподвижная обмотка; 3 – магнитопровод трансформатора;
 4 – рукоятка механизма перемещения подвижной обмотки трансформатора;
 5 – подвижная обмотка трансформатора; 6 – блок селевых выпрямителей

Помимо перечисленного основного электросварочного оборудования общего назначения, на ремонтных предприятиях используют специализированное оборудование: установки электроконтактной сварки, выпрямительные агрегаты для питания гальванических ванн и вибродуговых установок, передвижные сварочные агрегаты постоянного тока, универсальные наплавочные аппараты вибродуговой металлизации и др.

Высокочастотные установки. В процессах ремонта машин высокочастотный нагрев применяется для поверхностной закалки деталей и инструмента, плавки металлов, сквозного нагрева заготовок, подогрева деталей перед наплавкой при высокочастотной металлизации и т. п. Особенно важна роль поверхностной закалки деталей. Сочетание твердой износостойкой поверхности и вязкой сердцевины обеспечивает высокий срок службы деталям, подвергающимся поверхностному износу в сочетании с ударными нагрузками. Поверхностная закалка инструмента повышает его эксплуатационную стойкость в 4-5 раз по сравнению с термообработкой в печах.

На рисунке 17.4 приведен общий вид установки ЛПЗ-2-67М, а на рисунке 17.5 – принципиальная электрическая схема генераторного блока.

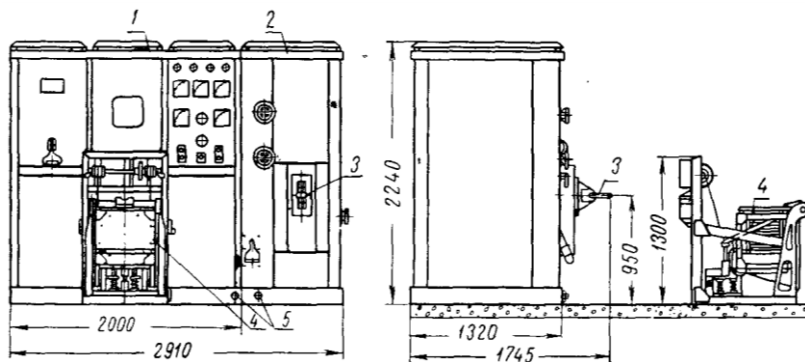


Рис. 17.4. Общий вид и габаритные размеры установки ЛПЗ-2-67М (с индукционной печью):

1 – генераторный блок; 2 – блок контура; 3 – индуктор; 4 – индукционная печь; 5 – шпильки заземления блоков

Ламповый генератор собран по схеме параллельного питания с самовозбуждением. На анод генераторной лампы L (ГУ-23А) подается напряжение 10,5 кВ с высоковольтного выпрямителя, собранного на тиратронах. Анодный колебательный контур состоит из индуктивностей $L5-L6$ и емкости $C11$. С анодным контуром кондуктивно связан нагревательный контур, индуктивностью которого является высокочастотный трансформатор $L7-L8$, а емкостью – $C12$. Обратная сеточная связь осуществляется при помощи трансформатора обратной связи $L3-L4$. Напряжение на нагрузке плавно изменяется перемещением короткозамкнутой катушки $L5$.

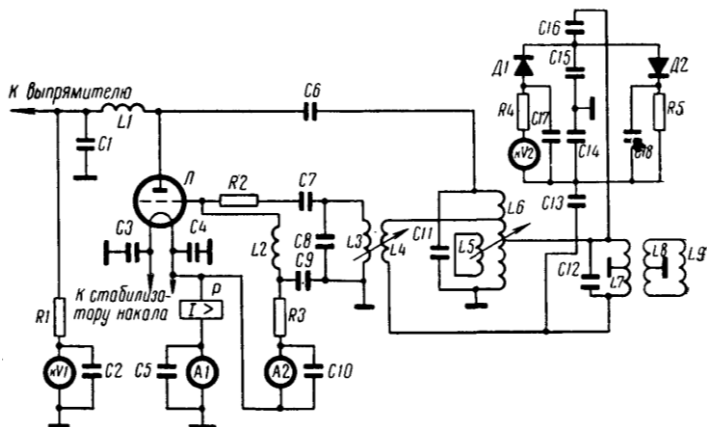


Рис. 17.5. Принципиальная электрическая схема генераторного блока высокочастотной установки ЛПЗ-2-67М:

- Λ – триод генераторный ГУ-23А; $L1$ – дроссель анодный;
 $C6$ – конденсатор анодно-разделительный; $L2$ – дроссель сеточный;
 $L3-L4$ – трансформатор обратной сеточной связи;
 $L5$ – короткозамкнутая катушка; $L6$ – индуктивность анодного контура;
 $C11$ – конденсатор анодного контура; $L7-L8$ – высокочастотный трансформатор;
 $L9$ – индуктор; $\kappa V1, \kappa V2$ – киловольт-метры; $A1$ – амперметр анодный;
 $A2$ – амперметр сеточный; P – реле токовое

На крупных ремонтных предприятиях используются более мощные установки: ВЧИ-100/0,07-ЗП – для поверхностной закалки, ВЧИ-100/0,07-НС – для сквозного нагрева и др.

Низкотемпературные установки.

Моечные машины и ванны с электроподогревом используют для мойки узлов тракторов и автомобилей перед разборкой, мойки и очистки деталей, реконсервации подшипников и т. п. Подогрев моющих растворов до температуры $85-95^{\circ}\text{C}$ осуществляется в основном трубчатыми нагревателями типа ТЭН, НВ, НВЖ и другими, встраиваемыми непосредственно в ванны. В некоторых машинах детали после мойки подсушиваются встроенными электросушилками (калориферами).

По мощности и техническому исполнению устройства для подогрева растворов мало отличаются от устройств электронагрева воды. Мощность подогревателей моечной машины МК-5 составляет 60 кВт, МД-1 – 32 кВт, МД-2 – 35 кВт. Удельный расход электроэнергии по опытным данным находится в пределах $0,20-0,25$ кВт·ч на 1 кг деталей.

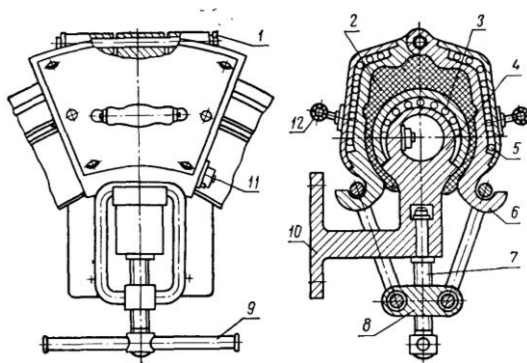


Рис. 17.6. Электровулканизатор для ремонта покрышек:

- 1 – ось наружных полусекторов; 2 – покрышка;
 3 – нагреватель внутреннего сектора; 4 – внутренний нагревательный сектор;
 5 – нагреватель наружного полусектора; 6 – наружный нагревательный полусектор; 7, 8, 9 – элементы натяжного механизма; 10 – кронштейн;
 11 – терморегулятор; 12 – ручка

Электровулканизаторы применяются для местного ремонта резиновых камер, покрышек, а также различных резиновых и прорезиненных изделий. Вулканизаторы бывают стационарными или переносными, с элементным или электропаровым обогревом и в различном конструктивном оформлении. На рисунке 17.6 приведен электровулканизатор для ремонта покрышек с двухсторонним обогревом. Вулканизатор имеет внутренний нагревательный сектор 3 и два наружных нагревательных полу сектора 6 со встроенными спиральными нагревателями 3 и 5. Диаметр внутреннего сектора соответствует внутреннему диаметру покрышки, а внутренняя поверхность наружных полусекторов – внешней конфигурации покрышек. Вулканизируемую покрышку 2 устанавливают поврежденным участком между внутренним и наружным секторами и спрессовывают натяжным механизмом 9. Вулканизацию проводят при температуре 130-150°С. Необходимую температуру поддерживают терморегулятором 11. Продолжительность вулканизации покрышек 0,5-1,5 ч, необходимая выдержка создается реле времени. Аналогичны по устройству электровулканизаторы камер, приводных ремней, конвейерных лент и др. Они позволяют точно поддерживать температуру и отличаются небольшими размерами и массой.

Электроподогрев двигателей тракторов и автомобилей не-

обходим в зимнее время для облегчения запуска и уменьшения износа деталей. Наиболее распространенный способ подогрева заключается в следующем. В поддон картера двигателя встраивают трубчатые нагреватели типа НВ или другие аналогичного назначения, которые подогревают картерное масло, все картерное пространство и кривошипно-шатунную группу. Подогрев включают сразу после того, как машину ставят на стоянку, или за некоторое время перед пуском. Мощность подогревателей зависит от типа двигателя, принятого режима подогрева, температуры наружного воздуха.

Контрольные вопросы

1. Какое оборудование применяется в ремонтно-механических мастерских?
2. Для чего используют соляные и щелочные ванны?
3. Конструкция генераторного блока высокочастотной установки.
4. Конструкция электровулканизатора.
5. Объясните устройство и назначение электрических печей сопротивления.
6. Какое оборудование применяется для электросварки?
7. В чем заключаются правила безопасной эксплуатации электросварочного оборудования?
8. Каков принцип работы электрических вулканизаторов?
9. Для каких целей применяется электронагрев в ремонтном производстве?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 18

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ И ПАРОВОДОНАГРЕВАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучить конструкцию и принцип действия электрических парогенераторов и пароводонагревателей.

Пар широко используется в сельскохозяйственном производстве для отопления животноводческих и производственных помещений, тепловой обработки кормов, пастеризации молока, стерилизации молочной посуды, почвы в теплицах и т.д.

Для отопления и других тепловых процессов используют пар с давлением $(0,2-0,4) \cdot 10^5$ Па и температурой $105-110^\circ\text{C}$. На крупных сельскохозяйственных предприятиях пар получают в центральных котельных (топливных или электрических), у рассредоточенных потребителей – от мелких огневых или электрических котлов.

Электродный паровой котел КЭПР-160/0,4. Конструкция котла КЭПР-160/0,4 мощностью 160 кВт приведена на рисунке 18.1.

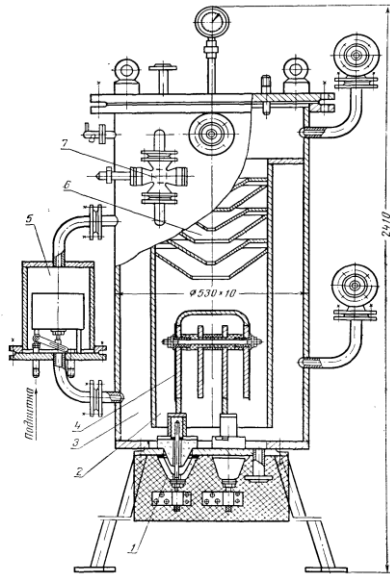


Рис. 18.1. Электродный паровой котел КЭПР-160/0,4:

1 – проходной изолятор; 2 – парогенерирующая камера;
3 – вытеснительная камера; 4 – электродная система; 5 – поплавковый регулятор подпитки; 6 – механический сепаратор пара; 7 – регулятор температуры пара

Электрокотел представляет собой сварной каркас из стандартных стальных труб, размещенных соосно и образующих внутреннюю (парогенерирующую) 2 и внешнюю (вытеснительную) 3 камеры. Внутри парогенерирующей камеры размещена электродная система 4 в виде пакета плоских пластин, к которым подводится напряжение по токоведущим шпилькам через проходные изоляторы 1. Крайние пластины электродного пакета изолированы с наружной стороны диэлектрическими пластинами.

Верхние не заполненные водой части парогенерирующей и вытеснительной камер образуют паровое пространство котла. Отличительной особенностью котлов является автоматическое регулирование мощности в зависимости от разбора пара. При давлении пара, не превышающем максимально допустимое, регулирующий клапан 7 регулятора температуры открыт, и вода в обеих камерах находится на одинаковом уровне, полностью покрывая электроды и обеспечивая полную мощность. При уменьшении разбора пара, давление и температура его возрастают, и когда они превысят заданное значение, срабатывает регулятор 7, перекрывая сообщение парогенерирующей и вытеснительной камер. Под действием возрастающего давления пара вода из камеры 2 вытесняется во внешнюю камеру 3, оголяя электроды и этим уменьшая мощность. Этот принцип обеспечивает автоматическую работу не только при изменении интенсивности разбора пара, но и при изменении удельного сопротивления воды.

Питательная вода поступает в электрокотел в вытеснительную камеру через поплавковый регулятор подпитки 5. Для уменьшения влажности пара в парогенерирующей камере установлен механический сепаратор пара. Котел снабжается двумя предохранительными клапанами для защиты от повышения давления, двумя водомерными колонками и манометром.

В сельскохозяйственном производстве во многих случаях чаще необходим пар низкого давления с расходом всего 30-50 кг/ч, при продолжительности работы установки 2-6 ч в сутки. Получение такого количества пара с помощью мощных огневых или электрических установок весьма неэкономично, особенно в летнее

время. Поэтому для таких целей разработаны небольшие по мощности пароводонагреватели, в том числе передвижные.

Пароводонагреватель ЭПВ-25П (рис. 18.2). Пароводонагреватель состоит из рамы на колесах 1, электродного котла 2, струйного водонагревателя 3, аккумулирующей емкости 4, бачка с постоянным уровнем воды, пульта управления, шкафа для укладки кабеля и шланга разбора пара или горячей воды 5. Аккумулирующая емкость дает возможность агрегату работать в автономном режиме в течение одного-двух часов. Мощность и паропроизводительность могут плавно меняться от 10 до 33 кВт и от 12 до 42 кг/ч. Максимальная производительность по горячей воде с температурой 65-85°C – 480 л/ч, давление пара – до 70 кПа, температура – 107 °C.

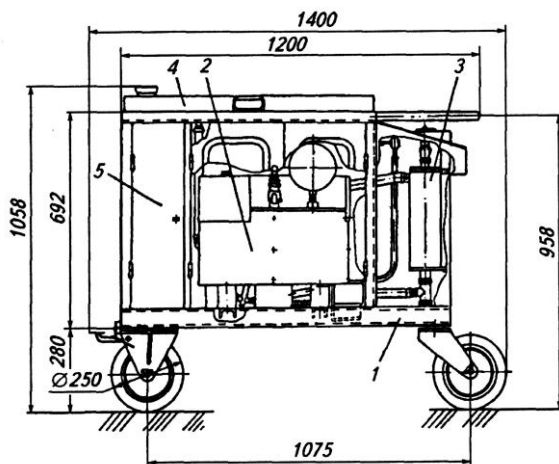


Рис. 18.2. Передвижной пароводонагреватель ЭПВ-25П:

1 – рама; 2 – электродный котел; 3 – струйный водонагреватель;
4 – аккумулирующая емкость; 5 – шкаф для укладки кабеля

В пароводонагревателе используют систему электродов в виде концентрических колец. Такая электродная система обладает большой объемной мощностью при высокой равномерности электрического поля и является одной из наиболее эффективных с точки зрения скорости выхода котла на рабочий режим (одна минута вместо двадцати у ЭПВ-25). Специальные датчики, управляющие

подпиткой воды и продувкой котла, обеспечивают заданный диапазон рабочего сопротивления воды.

Для обеспечения технологических процессов пароводонагреватель перемещают к месту работы и подключают к водопроводу и электрической сети. При таком подключении пароводонагреватель может работать в автоматическом режиме в течение всей рабочей смены. При необходимости получения горячей воды холодная вода из водопровода нагревается в струйном водонагревателе, смешиваясь с паром.

Контрольные вопросы

1. Для чего используется пар в сельском хозяйстве?
2. Принцип работы электродного парового котла КЭПР.
3. Как осуществляется автоматическое регулирование мощности?
4. Почему электрические паровые котлы выполняют, как правило, электродными?
5. Конструкция передвижного пароводонагревателя ЭПВ-25П.
6. Для чего предназначен струйный водонагреватель?
7. За счет чего достигается ускоренный выход на рабочий режим ЭПВ-25П.
8. Какие материалы используются в качестве электродов в электродных водонагревателях и почему?
9. Преимущества и недостатки электродных водонагревателей.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 19

ИЗУЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Цель работы: изучить принцип действия ультразвуковых установок.

Ультразвуковые установки получили большое распространение для обработки твердых материалов, обладающих большой хрупкостью. К таким материалам относятся стекло, фарфор, керамика, кварц, драгоценные камни, твердые сплавы, ферриты, минералокерамические резцы, карбид вольфрама и другие, обработка которых обычным механическим путем весьма затруднительна.

Принцип ультразвуковой обработки материалов можно уяснить на примере рисунка 19.1.

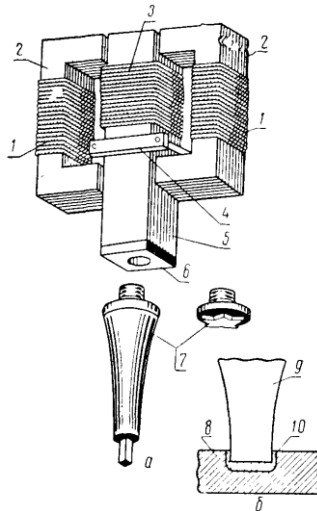


Рис. 19.1. Устройство магнитострикционного излучателя для ультразвукового сверления материалов:

- а* – схема устройства; *б* – процесс сверления; 1 – обмотка подмагничивания сердечника постоянным током; 2 – боковые плечи сердечника; 3 – обмотка переменного тока; 4 – скрепление сердечника в узел ультразвуковой волны; 5 – магнитострикционный сердечник; 6 – гайка на свободном конце сердечника для крепления рабочего инструмента; 7 – рабочие инструменты для сверления отверстий различной формы (трансформаторы скорости); 8 – обрабатываемый материал; 9 – рабочий инструмент; 10 – суспензия с абразивным порошком

К магнитострикционному сердечнику 5 крепят концентратор ультразвука, на концевую часть которого насаживают рабочую часть инструмента (головку), форма которой может быть квадратной, прямоугольной, многогранной, круглой, овальной и т. д. в зависимости от желаемой конфигурации отверстия в обрабатываемом материале. Обрабатываемую поверхность материала смачивают эмульсией абразивного порошка в воде или в масле. В качестве абразива используют корунд или карбид бора, карбид кремния и другие, которые тверже обрабатываемого материала.

Когда головку рабочего инструмента подводят к обрабатываемой поверхности, находящиеся между ними частицы абразива ударяют по обрабатываемому материалу и выкалывают из него миниатюрные частицы. Так как частиц абразива много, а частота ударов определяется частотой ультразвука 20-30 кГц, то процесс обработки идет довольно быстро.

Ультразвуковая очистка. Прежде чем хромировать, никелировать или ремонтировать детали машин и приборов, надо очистить и обезжирить их поверхности. Особенно затруднительна очистка и мойка мелких деталей сложной формы, с отверстиями, узкими прорезями и винтовыми нарезками. В этом случае ультразвуковая очистка представляет собой эффективное средство повышения производительности труда и качества очистки.

Механическое действие ультразвука можно представить, как удары захлопывающихся вблизи очищаемой поверхности кавитационных пузырьков, которые вызывают разрушение поверхностной пленки.

Целесообразно применять такую очищающую жидкость, которая смачивает детали, эффективно воздействует на загрязнения и не вступает в химическую реакцию с деталями, хотя ультразвуковая очистка возможна и в жидкостях, не растворяющих загрязнений.

Применение ультразвука позволяет снизить трудоемкость очистки в 2-10 раз в зависимости от размеров, формы и материала очищаемых деталей. Расход химикатов при этом уменьшается в 2 раза и значительно повышается качество очистки. Для этих целей используются ультразвуковые установки с частотой 20-25 кГц при акустической мощности 1-2,5 кВт. Интенсивность должна быть 5-10 Вт/см². Однако можно использовать и более высокую частоту 200-1600 кГц, при которой качество очистки повышается.

Ультразвук можно успешно применять для очистки паровых котлов от накипи.

Ультразвуковая сварка. Ультразвуковая сварка позволяет соединять легко окисляющиеся металлы, сварка которых обычными способами затруднительна. Соединяемые поверхности изделий под относительно небольшим давлением прижимают друг к другу и одну из них при помощи ультразвука приводят в колебательное движение относительно другой с ультразвуковой частотой порядка 15-30 кГц (рис. 19.2). Под действием трения между поверхностями происходит разрушение окисных пленок и появляются пластические деформации микровыступов с образованием общих кристаллов, прочно соединяющих свариваемые поверхности деталей. Сварка происходит без заметного повышения температуры, и поэтому ее часто относят к холодным видам сварки.

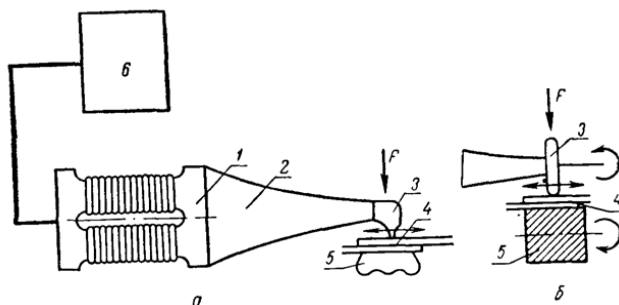


Рис. 19.2. Принципиальная схема ультразвуковой точечной (а) и шовной (б) сварки:

1 – преобразователь; 2 – трансформатор скорости; 3 – наконечник;
4 – свариваемые детали; 5 – опора; б – генератор

При помощи ультразвука хорошо свариваются алюминий, медь, их сплавы, а также тугоплавкие и активные металлы, такие, как молибден, цирконий и его сплавы, титан и др. При ультразвуковой сварке не нарушаются физико-химические свойства свариваемых материалов. Высокое качество сварки получается при толщине деталей до 2,5 мм. Сварка продолжается доли секунды.

Ультразвуковая пайка. Как известно, обычными методами паять алюминий весьма трудно, так как стойкая окисная пленка на его поверхности препятствует смачиванию металла жидким припоем. Ультразвуковые колебания частотой 16-23 кГц в жидком припое вызывают кавитационные явления и ударные импульсы,

которые воздействуют на припой и поверхность облуживаемых деталей и разрушают окисную пленку. Легкие частицы окисной пленки всплывают на поверхность припоя, который затем беспрепятственно облуживает очищенную поверхность металла. Наиболее эффективна интенсивность ультразвуков 25-100 Вт/см². Ультразвуковой паяльник представляет собой головку, на которой размещены жестко соединенные между собой нагреватель, акустический трансформатор скорости и магнитострикционный преобразователь (рис. 19.3).

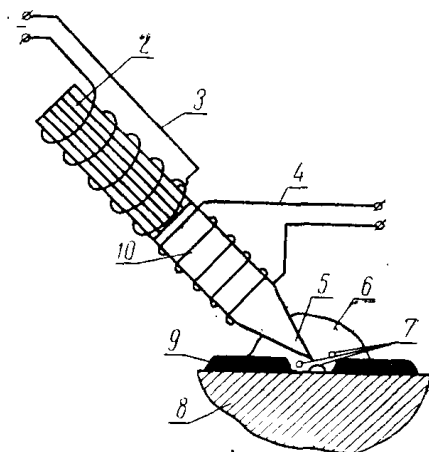


Рис. 19.3. Схема ультразвукового паяльника:

- 1 – питание; 2 – магнитострикционный излучатель; 3 – обмотка, которая питается от генератора ультразвуковой частоты; 4 – нагревательная обмотка; 5 – жало головки паяльника; 6 – припой; 7 – кавитационные пузырьки; 8 – алюминиевая пластина; 9 – окисная пленка; 10 – головка паяльника

Ультразвуковая пастеризация молока. В основе бактерицидного действия ультразвука лежит механическое воздействие на бактериальные клетки, вызывающее их раздробление. Разрушающее действие интенсивных ультразвуковых колебаний в жидкости обусловлено в основном явлением кавитации. Зона кавитации, в которой наблюдается бактерицидный эффект, называется зоной эффективной обработки.

Замечено, что при малой интенсивности ультразвуковых колебаний, недостаточной для образования зоны кавитации, механические воздействия приводят к ускоренному размножению бактерий и не обладают бактерицидными действиями.

Гомогенизация молока – раздробление жировых шариков под действием ультразвука. В таком состоянии молоко не отстаивается, лучше сохраняется, усваивается и применяется в качестве специального детского питания.

Обработка семян. Ультразвуковые колебания малой интенсивности в определенных дозах, как правило, стимулируют развитие растительных организмов. Обработанные оптимальными дозами ультразвуковых колебаний семена быстрее прорастают, повышается всхожесть, ускоряется рост растений, повышается урожайность.

Другие технологические применения ультразвука. Ультразвук может быть использован для смешивания не смешивающихся обычным путем жидкостей, например, рыбьего жира с водой для выпойки животным и птице. Ультразвук может быть использован для мойки доильной аппаратуры и молочной посуды, осветления виноградного и других соков, ускорения созревания фотоэмульсий, улучшения антифрикционных свойств смазочных масел, повышающих износостойкость машин в эксплуатации, и для других целей.

Разработка систем практического использования ультразвука в технологических процессах сельского хозяйства еще не закончена, и эта проблема ждет своего решения.

Ультразвуковые дефектоскопы и приборы. В ультразвуковых дефектоскопах и приборах используются, в основном, следующие свойства ультразвука: способность при определенных частотах распространяться в твердых веществах на большую глубину без заметного ослабления и способность отражаться и преломляться на границе раздела двух веществ, разная скорость распространения и степень поглощения в различных средах и веществах.

Принцип действия простейшего дефектоскопа можно пояснить на следующем примере. Если к исследуемому объекту с одной стороны подвести ультразвуковые колебания, а с другой стороны эти колебания будут восприниматься приемником, например, в виде пьезоэлектрической пластинки, которая, колеблясь, создает электрические потенциалы, усиливаемые при помощи усилителя и регистрируемые соответствующими приборами, то показания приборов и характер изменения выходных электрических величин будут характеризовать внутреннее состояние вещества материала.

Если внутри исследуемого объекта есть дефект, то часть ультразвуковых волн отражается от границы дефекта и не попадает на приемную пьезоэлектрическую пластинку, создавая звуковую тень за дефектом и вызывая соответствующие изменения в показаниях электрических приборов, записях осциллографа или изображениях на экране.

При помощи ультразвука можно в различных деталях определить дефекты, их размеры, глубину залегания и состав отдельных компонентов вещества. Ультразвуковыми дефектоскопами контролируют качество сварки, целостность болтов, плотность соединения, однородность заливки вкладышей подшипников, качество клапанов двигателей, автомобильных покрышек, склейки пластических масс и фанерных листов и др.

Существуют ультразвуковые приборы, которые позволяют измерять расстояние, обнаруживать препятствия, определять толщину сального слоя у свиней, измерять концентрацию многих газов в воздухе, степень запыленности воздуха, вязкость и скорость жидкости и т. п.

Существует много методов преобразования звуковых изображений в видимые. Получение звуковых изображений является эффективным методом изучения структуры оптически непрозрачных сред и имеет большие перспективы для своего развития и применения.

Контрольные вопросы

1. Где используются ультразвуковая технология.
2. Какими преимуществами обладает ультразвуковая обработка материалов перед механической?
3. Принцип обработки ультразвуком твердых материалов.
4. Преимущество ультразвуковой сварки по сравнению с дуговой.
5. Принцип ультразвуковой очистки.
6. Преимущество ультразвуковой очистки.
7. Принцип ультразвуковой сварки.
8. Недостатки ультразвуковой сварки.
9. Принцип ультразвуковой пайки.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Баев, В. И. Практикум по электрическому освещению и облучению. – М. : КолосС, 2008. – 191 с.
2. Баранов, Л. А. Светотехника и электротехнология / Л. А. Баранов, В. А. Захаров. – М. : КолосС, 2006. – 344 с.
3. Васильев, С. И. Измерение влажности почвы в СВЧ диапазоне электромагнитных волн / С. И. Васильев, С. В. Машков, М. Р. Фатхутдинов // Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве : сб. тр. – Ставрополь : Агрус, 2015. – С. 57-63.
4. Газалов, В. С. Светотехника и электротехнология. – Ростов-на-Дону : Терра, 2004. – 344 с.
5. Гриднева, Т. С. Автоматизация процесса загрузки дробилки / Т. С. Гриднева, С. С. Нугманов // Актуальные проблемы аграрной науки и пути их решения : сб. науч. тр. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2016. – С. 313-315.
6. Гриднева, Т. С. Автоматика : практикум / Т. С. Гриднева, С. С. Нугманов, С. В. Машков, П. В. Крючин. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2016. – 108 с.
7. Гриднева, Т. С. Применение электроактивированной воды в сельском хозяйстве / Т. С. Гриднева, С. С. Нугманов // Проблемы и достижения современной науки : мат. III Международной научно-практической конференции. – Уфа : РИО ИЦИПТ, 2016. – № 1(3). – С. 72-74.
8. Гриднева, Т. С. Электроснабжение : практикум. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2015. – 111 с.
9. Лабораторный практикум по электротехнологии. Часть 1. Электротермия : методическое пособие / П.Л. Лекомцев, А.В. Савушкин, О.Г. Долговых, А.М. Ниязов. – Ижевск : ИжГСХА, 2012 – 67 с.
10. Оськин С.В. Электротехнологии в сельском хозяйстве / С.В. Оськин. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – 501 с.
11. Попов, Д. В. Автоматизация процесса охлаждения молока в молочном цехе СПК «Арзамасцевский» Богатовского района Самарской области / Д. В. Попов, Т. С. Гриднева // Мат. 60-й студенческой науч.-практ. конф. инженерного факультета Самарской ГСХА : сб. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2015. – С. 38-42.
12. Практикум по электротехнологии / В. Н. Гайдук, В. Н. Шмигель. – М. : Агропромиздат, 1989. – 175 с.
13. Семёнов, Б. Ю. Экономичное освещение для всех. – М. : СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 224 с.
14. Совершенствование электрофизических способов и технических средств для контроля и воздействия на сельскохозяйственные объекты :

отчет о НИР (промежуточ.) / рук. Нугманов С. С. ; исполн.: Гриднева Т. С., Васильев С. И., Фатхутдинов М. Р. – Кинель, 2015. – 49 с. – № ГР 01201376403.

15. Совершенствование электрофизических способов и технических средств для контроля и воздействия на сельскохозяйственные объекты : отчет о НИР (промежуточ.) / рук. Нугманов С. С. ; исполн.: Гриднева Т. С., Васильев С. И., Савельева Э. Н. – Кинель, 2014. – 28 с. – № ГР 01201376403. – Инв. № 215020940028.

16. Совершенствование электрофизических способов и технических средств для контроля и воздействия на сельскохозяйственные объекты : отчет о НИР (промежуточ.) / рук. Нугманов С. С. ; исполн.: Фатхутдинов М. Р., Тарасов С. Н., Васильев С. И., Крючин П. В., Гриднева Т. С., Сыркин В. А. – Кинель, 2016. – 54 с. – № ГР 01201376403. – Инв. № АААА-Б17-217013020021-7.

17. Сыркин, В. А. Монтаж электрооборудования и средств автоматизации : методические указания для выполнения лабораторных работ. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2014. – Т. 1. – 61 с.

18. Шашлов, А. Б. Основы светотехники : учебник. – 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Логос, 2011. – 256 с.

19. Шеховцов, В. П. Осветительные установки промышленных и гражданских объектов. – М. : ФОРУМ, 2009. – 160 с.

20. Фатхутдинов, М. Р. Универсальное устройство для обработки семян озоном / М. Р. Фатхутдинов, С. В. Машков, С. И. Васильев, П. В. Крючин // Сельский механизатор. – 2016. – № 8. – С. 14.

21. Гусаров, В. А. Автономные системы теплоснабжения на основе тепловых насосов воздух-вода / В. А. Гусаров, В. В. Харченко, А. О. Сычев [и др.] // Известия Академии наук СССР. Отделение технических наук. Энергетика и автоматика. – 2013. – № 3. – С. 67.

22. Юдаев, И. В. Совершенствование электродной системы электропропольщика // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2011. – № 10. – С. 11-13.

23. Юдаев, И. В. Малоэнергетические электроимпульсные технологии и их использование в сельском хозяйстве / И. В. Юдаев // Энергосберегающие технологии. Проблемы их эффективного использования. Материалы II международной научно-практической конференции, 11-12.12.2007 г. - Волгоград: ВГСХА, 2008. - С. 157-158.

24. Юдаев, И. В. Основы электротермии / И. В. Юдаев, Е. Н. Живописцев, А. М. Глушков. – Волгоград : Волгоградская ГСХА, 2011. – 160 с.

АЛФАВИТНО-ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Б

Балластные устройства, 37

В

Водонагреватели типа САОС и САОЗ, 81

Время нагрева, 75, 83

Высокочастотные установки, 99

Г

Горелка, 30

Д

Дефектоскоп, 111

Длина волны, 42

Длина люминесцентной лампы, 22

З

Зажимы лампы, 15, 26, 36

И

Индекс цветопередачи, 51

Индуктивное сопротивление, 35

Инфракрасное излучение, 42

Искусственный источник
оптического излучения, 6

К

Кавитационные явления, 109

Конструкция компактной
люминесцентной лампы, 24

Конструкция люминесцентной
лампы низкого давления, 19

Коэффициент пульсации
освещенности, 43, 51

Коэффициент температурного
изменения электропроводимости,
61

Л

Ламповый генератор, 99

Лампы

накаливания, 6, 7, 11, 12, 13, 15, 17,
25, 44, 54

общего назначения, 12

люминесцентные, 7, 20, 26, 46

газоразрядные, 6, 7, 8, 10, 11, 35,
44, 45, 118

газосветные, 8

галогенные, 7

дуговая ртутная, 29

М

Маркировка, 18, 76

Металлогалогенные лампы, 9

Минимальная освещенность
рабочей поверхности, 43

Моечные машины и ванны, 100

Мощность, 8, 12, 15, 19, 22, 27, 31,
32, 38, 40, 42, 45, 49, 61, 64, 66, 67,
68, 75, 76, 81, 82, 83, 87, 90, 91, 92,
104

Н

Напряжение, 5, 15, 20, 21, 23, 25, 26,
31, 33, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 58,
67, 77, 90, 91, 99, 104

О

Объем воды, 75

Окисные пленки, 109

Оптический диапазон, 42
Освещение, 42, 113
Освещенность при номинальном напряжении, 27, 32

П

Пароводонагреватель ЭПВ-25П, 105
Пластические деформации, 109
Подогрев проточной воды, 83
Правила безопасной эксплуатации электрокотлов, 71, 72
Преобразование электрической энергии, 19
Проводники II рода, 63
Прожектор, 48, 54
Пускорегулирующий аппарат, 30

Р

Расстояние от люминесцентной лампы до фотоэлемента, 22
Регенеративный цикл, 7

С

Самонакаляющиеся оксидные катоды, 34
Светильник, 48
Светимость, 51
Световая отдача, 6, 7, 8, 11, 16, 17, 18, 23, 27, 29, 45, 49, 50
Световой поток, 7, 16, 17, 22, 23, 27, 28, 32, 33, 42, 43, 45, 48, 49, 50, 53
Светораспределение, 48
Сдвиг по фазе, 36
Сила света, 50
Спротивление, 15, 16, 21, 30, 32, 35, 39, 40, 41, 46, 55, 56, 60, 61, 62, 64, 66, 68
Спектр, 6, 8, 9, 29, 42, 43, 45
Стартер, 21, 34, 36, 39, 46

Т

Тело накала, 6, 7, 13, 15, 16
Температурный коэффициент сопротивления, 16
Терморегулятор, 84, 102
Трехфазные емкостные элементные водонагреватели, 77
Трубы почвенного и воздушного обогрева, 90

У

Удельная электропроводимость, 61
Ультразвуковая очистка, 108
пайка, 109
сварка, 109
Ультразвуковые установки, 107
Ультрафиолетовое излучение, 42, 45

Ц

Цветовая температура, 50
Цоколь, 24

Э

Электрические масляные и щелочные ванны, 96
Электрические печи сопротивления, 95
Электроводонагреватель типа ВЭП, 84
типа ВЭТ, 77
типа ПВ, 87
типа УАП, 78
типа ЭВ, 85
Электровулканизаторы, 101
Электродные водонагреватели, 63, 64, 79
Электродные соляные ванны, 96

Электродный водогрейный котел
КЭВ, 64, 68
Электродный водонагреватель
ЭВН-25/0,4, 66
ЭПЗ-100, 65
Электродный нагрев, 60, 61, 62, 63,
69, 72
Электродный паровой котел
КЭПР-160/0,4, 103
Электродосветные лампы, 8

Электроды, 12, 25, 29, 34, 60, 62, 63,
64, 65, 66, 68, 70, 72, 73, 89, 104
Электроконтактный нагрев, 55
Электроподогрев двигателей
тракторов и автомобилей, 102
Электросварочное оборудование,
97

Я

Яркость, 51

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Общие правила работы в лаборатории «Светотехника и электротехнология».....	4
<i>Часть 1. Светотехника</i>	6
Лабораторная работа №1. Изучение основных типов искусственных источников оптического излучения.....	6
Лабораторная работа №2. Изучение световых и электрических характеристик ламп накаливания.....	11
Лабораторная работа №3. Изучение световых и электрических характеристик люминесцентных ламп низкого давления.....	18
Лабораторная работа №4. Изучение световых и электрических характеристик компактных люминесцентных ламп.....	24
Лабораторная работа №5. Изучение световых и электрических характеристик дуговой ртутной люминесцентной лампы высокого давления.....	29
Лабораторная работа №6. Изучение балластных сопротивлений газоразрядных ламп.....	34
Лабораторная работа №7. Изучение коэффициента пульсации светового потока при различных схемах включения люминесцентных ламп низкого давления.....	42
Лабораторная работа №8. Изучение основных характеристик светильников.....	48
<i>Часть 2. Электротехнология</i>	55
Лабораторная работа №9. Изучение процесса электронагрева сопротивлением.....	55
Лабораторная работа №10. Изучение нагрева проводников второго рода.....	60
Лабораторная работа №11. Изучение конструкции основных типов электродных водонагревателей и котлов.....	63
Лабораторная работа №12. Изучение эксплуатационных особенностей работы электродного котла.....	70
Лабораторная работа №13. Изучение параметров электродного водонагревателя.....	73
Лабораторная работа №14. Изучение конструкции основных типов элементных непроточных водонагревателей.....	76
Лабораторная работа №15. Изучение конструкции и принципов	

работы основных типов элементных проточных водонагревателей.....	83
Лабораторная работа №16. Изучение электрического обогрева в парниках и теплицах	88
Лабораторная работа №17. Изучение электротермического обору- дования для ремонтно-механических мастерских	95
Лабораторная работа №18. Изучение конструкции электриче- ских парогенераторов и пароводонагревателей	103
Лабораторная работа №19. Изучение ультразвука в технологи- ческих процессах	107
Рекомендуемая литература.....	113
Алфавитно-предметный указатель.....	115

Учебное издание

**Машков Сергей Владимирович
Юдаев Игорь Викторович
Гашенко Алексей Александрович
Крючин Павел Владимирович**

СВЕТОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

Практикум

Технический редактор О. Ю. Богачева

Подписано в печать 29.05.2017. Формат 60×841/16

Тираж 100. Заказ №149.

Отпечатано с готового оригинал-макета в редакционно-издательском отделе

ФГБОУ ВО Самарской ГСХА

446442, Самарская область, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2

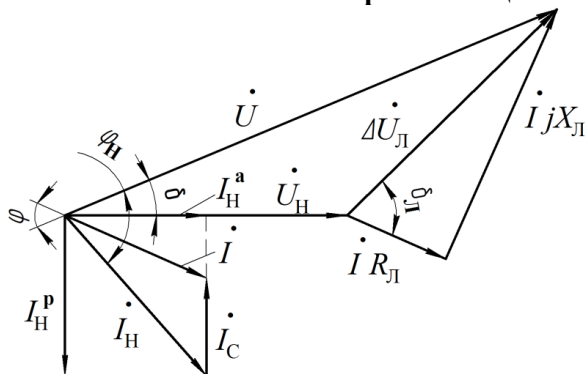
E-mail: ssaariz@mail.ru

С. И. Васильев, И. В. Юдаев

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Практикум

Часть 1. Линейные электрические цепи



«Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов
Российской Федерации по агроинженерному образованию в
качестве учебного пособия для студентов, осваивающих
образовательные программы бакалавриата по направлению
подготовки «Агроинженерия»

Кинель 2016

УДК 631.371 (07)

В19

Рецензенты:

В.И. Загинайлов, доктор технических наук, профессор кафедры
«Электроснабжение и электротехника им. академика И.А. Будзко»
ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева»

В.Я. Хорольский, доктор технических наук, профессор кафедры
«Электроснабжение и эксплуатация электрооборудования»
ФГБОУ ВО «Ставропольский ГАУ»

Васильев, С. И.

В19 Электротехника и электроника : практикум. Ч. 1. Линейные электрические цепи / С. И. Васильев, И. В. Юдаев. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2016. – 133 с.

ISBN 978-5-88575-

В практикуме рассмотрены вопросы, касающиеся линейных электрических цепей постоянного, синусоидального однофазного и трехфазного токов, индуктивно-связанных цепей, их структуры, свойств и режимов работы. Вопросы, касающиеся методов их расчета, а также методов преобразования структуры электрических цепей. Исследования характеристик и режимов работы четырехполюсников и цепей трехфазного тока, а также переходных процессов, возникающих в линейных электрических цепях.

Практикум предназначен для бакалавров, обучающихся по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».

УДК 631.371 (07)

В19

ISBN 978-5-88575-

© Васильев С. И., Юдаев И. В., 2016
© ФГБОУ ВО Самарская ГСХА, 2016

Предисловие

Практикум содержит описание двадцати лабораторных работы, охватывающих основные разделы дисциплины «Электротехника и электроника» и направленных на исследование линейных цепей постоянного и переменного синусоидального тока, а так же линейных цепей несинусоидального тока.

Цель практикума – помочь студентам глубже понять суть процессов, происходящих в электрических цепях, невидимых наглядно и потому наиболее сложных для понимания.

В процессе выполнения работ студенты учатся применять полученные теоретические сведения на практике, а результаты экспериментов – анализировать и делать соответствующие выводы.

Работы расположены по мере возрастания сложности изучаемого материала.

Каждая лабораторная работа содержит необходимые для её выполнения теоретические сведения, графический материал, позволяющий глубже понять суть изучаемого вопроса, а также способствующий изучению методики сборки электрических схем в практических условия.

В процессе изучения данного учебного издания у обучающихся должны формироваться следующие профессиональные компетенции:

- готовность к участию в проведении исследований рабочих и технологических процессов машин;
- готовность к обработке результатов экспериментальных исследований; проектная деятельность.

Лабораторная работа №1

Исследование характеристик ЛЭЦПТ с одним источником ЭДС

Цель работы: экспериментально проверить справедливость законов линейных электрических цепей (ЛЭЦ) постоянного тока (ПТ), исследовать характеристики ЛЭЦПТ и изучить методику построения потенциальной диаграммы.

Линейной электрической цепью называется электрическая цепь, все элементы которой являются линейными (т.е. имеют линейную вольтамперную характеристику). На рисунке 1.1, а представлена схема линейной неразветвленной электрической цепи. Её элементами являются: E – источник ЭДС, B ; R_0 – внутреннее сопротивление источника ЭДС, Ом; R_n – сопротивление нагрузки, Ом. Ток в такой цепи определяется по закону Ома:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_n}, \text{ А.} \quad (1.1)$$

Для участка цепи, содержащего источник ЭДС (рис. 1.1, б) обобщенный закон Ома:

$$I_3 = \frac{U_{BC} - E_2}{R_3}, \text{ А.} \quad (1.2)$$

В свою очередь

$$U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C, \text{ В.} \quad (1.3)$$

Знак «+» ставится, если направление ЭДС совпадает с направлением напряжения. Если в данный участок цепи добавить кроме источника ЭДС еще и идеальный источник тока (включенный сонаправленно с током), то общий ток рассматриваемого участка цепи составит:

$$I_3 = \frac{U_{BC} - E_2}{R_3} + J, \text{ А,} \quad (1.4)$$

где J – ток источника тока, А.

Законы Кирхгофа:

1) Сумма токов сходящихся в узле электрической цепи равна нулю $\Sigma I = 0$ А.

2) Сумма ЭДС источников вдоль любого замкнутого контура равна сумме падений напряжений на потребителях этого же замкнутого контура $\sum E = \sum RI$.

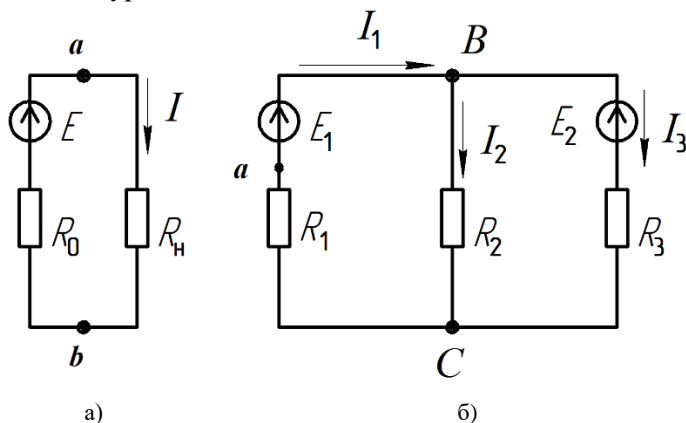


Рис. 1.1. Схемы электрических цепей:
 а – неразветвленная цепь с одним источником ЭДС;
 б – разветвленная цепь с двумя источниками ЭДС

Каждая точка электрической цепи обладает потенциалом относительно любой другой точки этой же электрической цепи. Распределение потенциалов вдоль неразветвленной электрической цепи или вдоль замкнутого контура разветвленной цепи можно представить графически в виде потенциальной диаграммы. По оси абсцисс откладываются сопротивления участков в последовательности обхода контура, а по оси ординат – потенциалы соответствующих точек. Величины сопротивлений и потенциалов откладываются в соответствующих масштабах (m_R и m_ϕ соответственно).

Для построения потенциальной диаграммы необходимо задаться направлением обхода контура и принять потенциал какой-либо точки контура равным нулю (условно заземлить выбранную точку). Например, для схемы на рисунке 1.1, б направление обхода контура выбираем вправо, и потенциал точки a , $\phi_a = 0$ В. Рассмотрим два контура: малый ($aBCa$) и большой ($aBCa$ через источник ЭДС E_2). Рассчитаем величины потенциалов всех точек и получим:

$$\begin{aligned} \phi_B &= \phi_a + E_1; \quad \phi_C = \phi_B - R_2 \cdot I_2; \quad \phi_C = \phi_B - E_2 - R_3 \cdot I_3; \\ \phi_a &= \phi_C - R_1 \cdot I_1 = 0. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Зависимость $\varphi = f(R)$ представляет собой ломаную линию, тангенс угла наклона прямых которой, к оси абсцисс, пропорционален токам на соответствующих участках цепи:

$$\operatorname{tg}\beta = I \frac{m_R}{m_\varphi}, \quad (1.6)$$

где m_R – масштаб сопротивлений, Ом/мм;

m_φ – масштаб потенциалов, В/мм.

Пример построения потенциальной диаграммы для схемы, приведенной на рисунке 1.1, б, представлен на рисунке 1.2. Пользуясь приведенным графиком, можно определить напряжение между двумя любыми точками цепи.

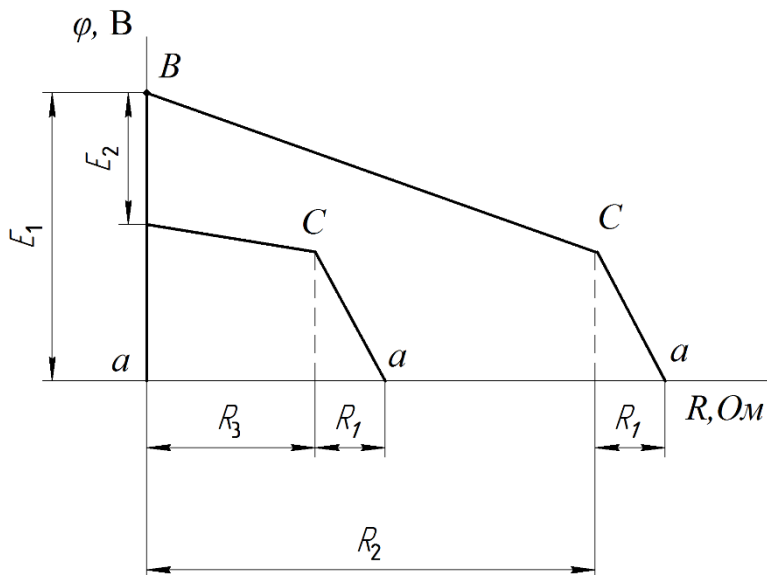


Рис. 1.2. Потенциальная диаграмма разветвленной ЛЭЦ

При построении потенциальной диаграммы важно помнить, что сопротивления откладываются по оси абсцисс последовательно.

Правильность расчета электрической цепи можно проверить, составляя баланс мощности цепи, согласно которому суммарная мощность, генерируемая источниками электрической энергии, равна суммарной мощности, потребляемой приемниками в цепи:

$$\sum_{S=1}^K E_S I_S + \sum_{m=1}^n U_m J_m = \sum_{i=1}^q R_i I_i^2, \quad (1.7)$$

Условие баланса мощностей является следствием закона сохранения энергии и относится к общим свойствам цепей.

Задание. Определить величины и направления токов во всех ветвях схемы, величины и полярность потенциалов всех характерных точек схемы. По полученным характеристикам рассчитать сопротивления и мощности всех участков схемы построить потенциальную диаграмму. Проанализировать результаты работы и сделать выводы.

Порядок выполнения работы.

1) Включить стенд с помощью тумблера «Сеть». Включить источник E_1 (тумблер S_2 установить в положение 1). С помощью мультиметра произвести измерения величины ЭДС источника E_1 . Отключить стенд. Результаты занести в таблицу 1.1.

Источник E_2 исключен из цепи (тумблер S_3 только в положении 2 на протяжении всего эксперимента).

2) Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 1.3). Включить стенд, измерить потенциалы (с помощью мультиметра) точек b, c, d, e цепи, относительно точки a (с учетом знаков, при этом черный щуп устанавливается в точку a). Показания занести в таблицу 1.1.

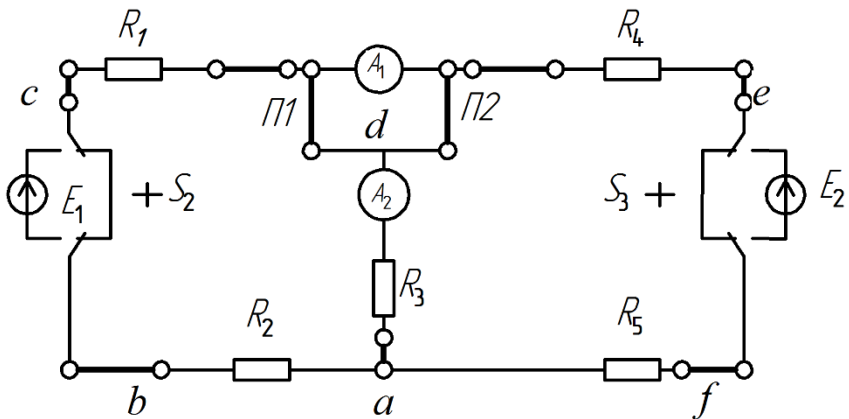


Рис. 1.3. Схема соединения лабораторной установки

3) Измерить токи в ветвях цепи. Ток I_1 измеряется прибором A_1 при положении переключки «П» в поз. «П2» (рис. 1.3), I_3 – измеряется прибором A_1 при положении переключки «П» в поз. «П1», ток I_2 измеряется прибором A_2 . Нумерация токов в соответствии с рисунком 1.1, б. Полученные данные занести в таблицу 1.1.

4) По данным измерений рассчитать величины напряжений на каждом участке цепи (с учетом знаков) по формулам:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= \varphi_a - \varphi_b, \text{ В}; U_{bc} = \varphi_b - \varphi_c, \text{ В}; \\ U_{cd} &= \varphi_c - \varphi_d, \text{ В}; U_{de} = \varphi_d - \varphi_e, \text{ В}; \\ U_{ea} &= \varphi_e - \varphi_a, \text{ В}; U_{da} = \varphi_d - \varphi_a, \text{ В}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

5) Используя значения таблицы 1.1 и закон Ома рассчитать величины сопротивлений каждого участка цепи, а также эквивалентное сопротивление $R_э$:

$$\begin{aligned} R_{ab} &= U_{ab}/I_1, \text{ Ом}; R_{bc} = (E_1 + U_{bc})/I_1, \text{ Ом}; \\ R_{cd} &= U_{cd}/I_1, \text{ Ом}; R_{de} = U_{de}/I_3, \text{ Ом}; \\ R_{ea} &= U_{ea}/I_3, \text{ Ом}; R_{da} = U_{da}/I_2, \text{ Ом}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Полученные значения занести в таблицу 1.2.

Эквивалентное сопротивление рассчитывается с учетом того, что некоторые сопротивления подключены между собой параллельно, а часть последовательно. С учетом схемы лабораторной установки (рис. 1.3), получим:

$$R_э = R_{ab} + R_{bc} + R_{cd} + \frac{(R_{de} + R_{ea})R_{da}}{R_{de} + R_{ea} + R_{da}}, \text{ Ом}. \quad (1.10)$$

б) Используя все полученные данные составить баланс мощностей, т.е. рассчитать мощность источника ЭДС и мощность, потребляемую каждым из элементов. Определить суммарную мощность потребителей $\sum P$. Определить погрешность измерений и расчетов δ , представляющую собой частное (выраженное в процентах) от разности мощностей генератора и потребителей.

$$\begin{aligned} P_{E1} &= E_1 \cdot I_1, \text{ Вт}; P_{ab} = I_1^2 \cdot R_{ab}, \text{ Вт}; \\ P_{bc} &= I_1^2 \cdot R_{bc}, \text{ Вт}; P_{cd} = I_1^2 \cdot R_{cd}, \text{ Вт}; \\ P_{de} &= I_3^2 \cdot R_{de}, \text{ Вт}; P_{ea} = I_3^2 \cdot R_{ea}, \text{ Вт}; \\ P_{da} &= I_2^2 \cdot R_{da}, \text{ Вт}. \end{aligned} \quad (1.11)$$

7) По полученным в работе данным выбрать масштабы потенциалов и сопротивлений и построить потенциальную диаграмму (пример представлен на рисунке 1.2).

8) Проанализировав полученные данные и потенциальную диаграмму сделать выводы.

Таблица 1.1

Результаты эксперимента

Измерено									Рассчитано					
E_1 , В	φ_a , В	φ_b , В	φ_c , В	φ_d , В	φ_e , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	U_{ab} , В	U_{bc} , В	U_{cd} , В	U_{de} , В	U_{ea} , В	U_{da} , В

Таблица 1.2

Результаты расчета сопротивлений цепи

R_{ab} , Ом	R_{bc} , Ом	R_{cd} , Ом	R_{de} , Ом	R_{ea} , Ом	R_{da} , Ом	R_3 , Ом

Таблица 1.3

Результаты расчета баланса мощностей

Мощность источника	Мощности потребителей						Суммарная мощность	Погрешность
P_{E1} , Вт	P_{ab} , Вт	P_{bc} , Вт	P_{cd} , Вт	P_{de} , Вт	P_{ea} , Вт	P_{da} , Вт	$\sum P$, Вт	$\delta = \frac{P_{E1} - \sum P}{P_{E1}}$

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулировать определение узла, ветви и контура электрической цепи.
2. Сформулировать первый и второй законы Кирхгофа, порядок расчета цепи с их применением.
3. Дать определение потенциальной диаграммы.
4. Что такое потенциал?
5. Возможно ли построить потенциальную диаграмму для участка цепи?

Лабораторная работа №2

Исследование режимов работы ЛЭЦПТ, соединенной по мостовой схеме

Цель работы: исследовать возможные режимы работы линейной электрической цепи постоянного тока при мостовой схеме подключения нагрузки, а также параметры характеризующие данные режимы.

Мостовая схема подключения нагрузки (в роли которой могут быть измерительные приборы) (рис. 2.1, а) используется для измерения относительного изменения сопротивления в одном из плеч моста. В этом случае через его диагональ будет протекать ток, а при разорванной цепи диагонали возникнет напряжение холостого хода. В качестве переменного сопротивления могут использоваться так же терморезисторы, тензометрические датчики, фоторезисторы и др. Мостовая схема может находиться в одном из четырех режимов: в уравновешенном (сбалансированном) состоянии; неуравновешенном (разбалансированном) состоянии; режиме холостого хода; режиме короткого замыкания.

В уравновешенном состоянии ток через диагональ моста I_H (ток нагрузки) не протекает $I_H = 0$ А (рис. 2.1, а).

В плечах моста может находиться одно или несколько переменных сопротивлений. В данном случае переменное сопротивление одно – омическое сопротивление R_1 (рис. 2.1, б).

Условие равновесия моста постоянного тока (рис. 2.2) определяется из соотношения равенства сопротивлений их плеч:

$$R_1 \cdot R_{22} = R_{20} \cdot R_{23}, \quad (2.1)$$

Отсюда получаем величину уравновешивающего сопротивления в плече моста

$$R_1^y = \frac{R_{20} \cdot R_{23}}{R_{22}}, \quad \text{Ом.} \quad (2.2)$$

Нагрузкой моста R_H является сопротивление R_{24} . Величина сопротивления нагрузки определяется по закону Ома:

$$R_H = U_H / I_H, \quad \text{Ом.} \quad (2.3)$$

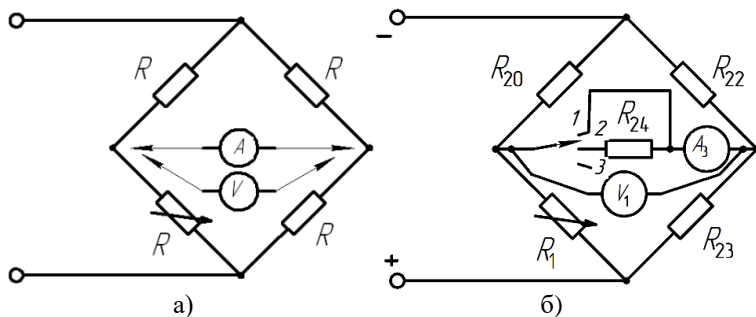


Рис. 2.1. Мостовые схемы подключения нагрузки:
а – принципиальная измерительная; б – с резистивной нагрузкой

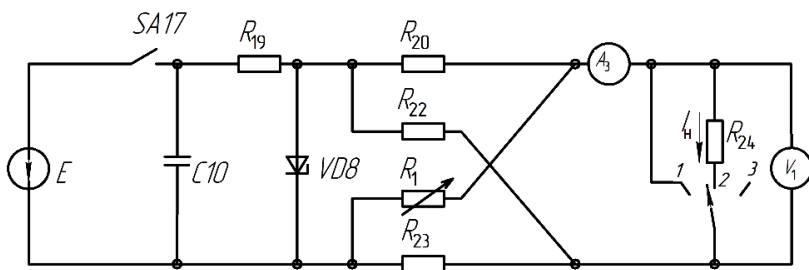


Рис. 2.2. Схема исследуемой мостовой цепи

Для удобства расчетов мостовую схему возможно заменить схемой эквивалентного генератора.

Для расчета параметров элементов схемы эквивалентного генератора необходимо теоретически или экспериментально получить величины напряжения холостого хода и короткого замыкания.

По этим данным можно рассчитать величину входного сопротивления моста относительно его нагрузки:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{хх}}}{I_{\text{к}}}, \text{ Ом.} \quad (2.4)$$

ЭДС эквивалентного генератора, в свою очередь, определится по зависимости:

$$E_{\text{Г}} = I_{\text{н}}(R_{\text{н}} + R_{\text{вх}}), \text{ В.} \quad (2.5)$$

В результате получим схему эквивалентного генератора (рис. 2.3).

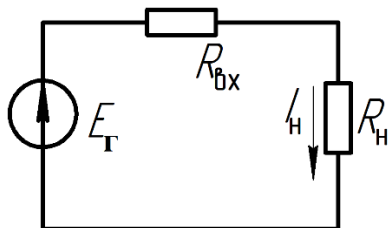


Рис. 2.3. Схема эквивалентного генератора

Задание. Исследовать характеристики электрической цепи в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой. Провести необходимые расчеты параметров элементов схемы. Исследовать зависимость напряжения на нагрузке U_H от величины переменного сопротивления R_1 , $U_H = f(R_1)$.

Порядок выполнения работы.

1) Списать со стенда в таблицу 2.1 технические данные измерительного моста R_{20} , R_{22} , R_{23} и провести расчет сопротивления R_1^y , при котором мост будет находиться в уравновешенном состоянии.

2) Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 2.4). Тумблер SA3 устанавливается в верхнее положение «Включено». **Тумблер SA II в течение всей работы должен находиться в верхнем положении** («Включено») (рис. 2.4).

3) Включить лабораторный стенд. Включить измерительный мост тумблером SA7. При этом переключатель SA13 устанавливается в режим холостого хода (поз. «3»). В таком положении необходимо установить напряжение на входе цепи (на стабилитроне) $U_{ст} = 12$ В. Сопротивление R_1 установить равным $R_1 = 10$ кОм.

4) Вольтметром PVI измерить напряжение U_{xx} и занести данные в таблицу 2.1.

5) Переключателем SA13 установить режим короткого замыкания (поз. «1»). Переключатель RI установить на 8 кОм. Амперметром PA3 измерить ток I_K и данные занести в таблицу 2.1.

6) Переключатель SA13 установить в режим под нагрузкой (поз. «2»). По вольтметру PVI и амперметру PA3 измерить величины напряжения и тока на нагрузке U_H , I_H и занести данные в таблицу 2.1. По ним, в последующем, рассчитать сопротивление нагрузки R_H (резистора R_{24}).

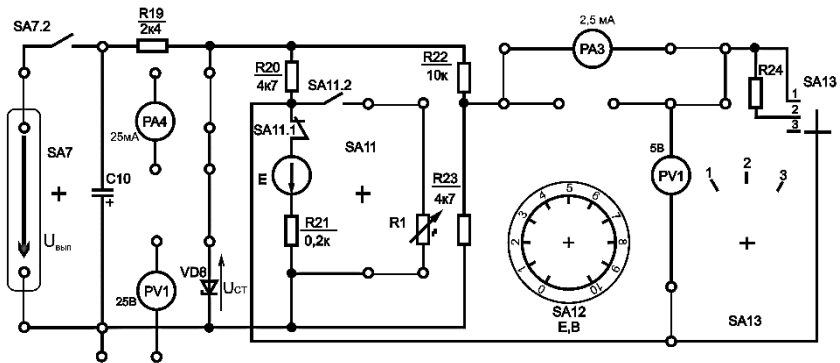


Рис. 2.4. Схема сборки исследуемой мостовой цепи

7) Переключателем $SA13$ снова установить режим короткого замыкания (поз. «1») и, изменяя величину сопротивления R_1 , добиться состояния уравновешенности моста (ток на нагрузке должен быть равным нулю). Полученные значения величины R^{y_1} занести в таблицу 2.1.

8) Переключателем $SA13$ установить рабочий режим ($SA13$ в поз. «2»). Изменяя сопротивление R_1 переключателем $R1$, в интервале от 0 до 10 кОм измерить величину U_H и данные занести в таблицу 2.2.

9) Сравнить величины R^y_1 и $R^{y_3}_1$, оценить погрешность δ . Результаты расчетов и измерений занести в таблицу 2.1.

$$\delta = \frac{R_1^y - R_1^{y_3}}{R_1^y} . \quad (2.6)$$

10) На основании полученных данных (табл. 2.2) построить график функции $U_H = f(R_1)$.

Таблица 2.1

Результаты эксперимента по исследованию мостовой схемы

Исходные данные			Измерено						Рассчитано			
R_{20} кОм	R_{22} кОм	R_{23} кОм	U_{xx} В	I_K А	U_H В	I_H А	$R^{y_3}_1$ Ом	R^y_1 Ом	R_H Ом	δ %	$R_{вх}$ Ом	E_T В

Таблица 2.2

Результаты исследования зависимости $U_n = f(R_1)$

Установлено	R_1 , кОм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Измерено	U_n , В											

Вопросы для самоконтроля

1. Назначение мостовой схемы соединения нагрузки.
2. Перечислите возможные режимы работы мостовых схем.
3. Какие виды датчиков можно подключать к мостовой схеме?
4. Приведет ли короткое замыкание резистивного датчика к короткому замыканию электрической цепи? Поясните свой ответ.
5. Возможно ли из мостовой схемы (рис. 2.1, б) выделить схему «звезды» или «треугольника» сопротивлений? Поясните свой ответ.

Лабораторная работа №3

Исследование характеристик ЛЭЦ ПТ методом наложения токов

Цель работы: экспериментально исследовать справедливость законов Кирхгофа для цепей с несколькими источниками ЭДС, принцип наложения, свойство и характеристики взаимности ЛЭЦ.

К основным принципам и свойствам линейных электрических цепей относятся принципы независимости ветвей схемы и наложения токов.

Принцип независимости действия ЭДС формулируется следующим образом: в линейной электрической цепи действие, оказываемое каждой из ЭДС в отдельности, можно рассматривать независимо от действия других ЭДС цепи. На этом свойстве базируется *принцип наложения*: ток в любой k -й ветви электрической цепи можно рассматривать как алгебраическую сумму токов в этой же ветви от действия каждой из ЭДС цепи в отдельности.

Согласно методу наложения токов выражение для k -го тока ветви можно представить в виде

$$I_k = E_1 g_{k1} + E_2 g_{k2} + \dots + E_k g_{kk} + \dots + E_n g_{kn}, A. \quad (3.1)$$

Коэффициенты уравнения (3.1) постоянны, не зависят от токов и напряжений и имеют размерность проводимости. Коэффициенты с одинаковыми индексами (g_{kk}) называются собственными или входными проводимостями ветвей. Они численно равны току ветви при действии единичной ЭДС в 1 В, включенной в эту ветвь (рис. 3.1, б).

Величина, обратная входной проводимости, называется входным сопротивлением ветви.

$$g_{11} = \frac{I_{11}}{E_1}, \text{ См.} \quad (3.2)$$

$$R_{\text{вх}11} = \frac{1}{g_{11}}, \text{ Ом.} \quad (3.3)$$

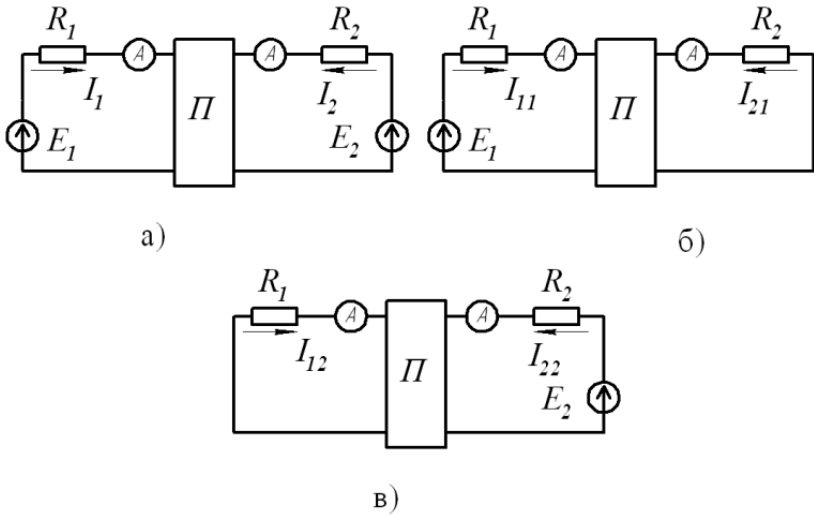


Рис. 3.1. Схемы для исследования принципа взаимности ЛЭЦ:
 а - исходная схема с двумя источниками ЭДС; б - источник ЭДС в 1-й ветви;
 в - источник ЭДС во 2-й ветви

Коэффициенты с разными индексами (g_{k1} , g_{kn}) называются передаточными или взаимными проводимостями. Так, g_{kn} есть взаимная проводимость k -й и n -й ветвей, она численно равна току в k -й ветви, возникающему от действия единичной ЭДС $E = 1$ В, находящейся n -й ветви. Для цепи (рис. 3.1, б) имеем

$$g_{21} = \frac{I_{21}}{E_1}, \text{ сим.} \quad (3.4)$$

Взаимное сопротивление двух ветвей обратно пропорционально их взаимной проводимости. Взаимные проводимости определяются следующим образом:

$$g_{kn} = g_{nk} = \frac{1}{R_{kn}}, \text{ сим.} \quad (3.5)$$

Входные и взаимные проводимости могут быть определены опытным или расчетным путём. При экспериментальном их определении измеряются токи в ветвях цепи от действия каждой из

ЭДС в отдельности, а затем определяются собственные и взаимные проводимости.

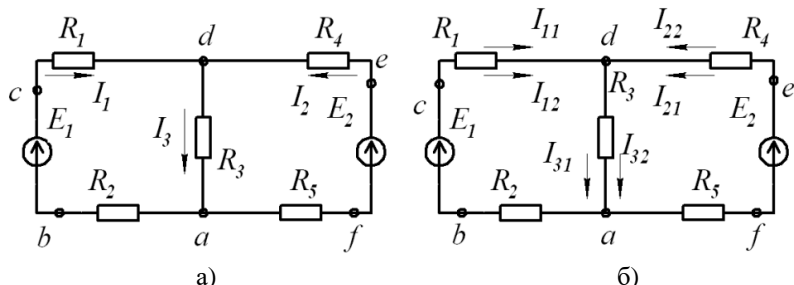


Рис. 3.2. Электрическая схема для исследования метода наложения: а – схема с полными токами ветвей; б – схема с частичными токами ветвей

Принцип наложения используется в методе расчета, получившем название *метода наложения*.

Порядок расчета методом наложения (рис. 3.2):

- ✓ Исходная схема разбивается на расчетные схемы, в каждой из которых действует одна ЭДС или один источник тока. Все остальные источники ЭДС или тока считаются отсутствующими, но в схеме сохраняются их внутренние сопротивления.
- ✓ Определяются частичные токи в ветвях каждой из вспомогательных расчетных схем.
- ✓ для определения токов исходной схемы производится алгебраическое суммирование частичных токов расчетных схем для каждой ветви с учетом их знаков.

Принципом наложения нельзя пользоваться при вычислении мощностей, так как мощность – квадратичная функция тока или напряжения. Принцип наложения и принцип взаимности связаны между собой.

Принцип взаимности заключается в следующем: если некоторая ЭДС, находящаяся в какой-либо k -й ветви сколь угодно сложной линейной электрической цепи, вызывает ток в m -й ветви данной электрической цепи, то при отсутствии других ЭДС, та же ЭДС, будучи перенесенной в m -ветвь, вызовет в k -ветви ток, той же величины, что и во второй ветви.

Например, для схемы (рис. 3.1, б и 3.2, б) ток $I_{21} = g_{21} \cdot E_1$, а при перенесении ЭДС из первой ветви во вторую (рис. 3.1, в) ток $I_{12} = g_{12} \cdot E_2$, но так как $g_{21} = g_{12}$ и $E_1 = E_2$, то $I_{21} = I_{12}$.

Задание. Изучить исследуемые схемы. Провести замеры частичных токов ветвей по методу наложения. Провести расчеты полных токов ветвей, собственных и взаимных проводимостей ветвей. Рассчитать потенциалы характерных точек схемы (при работе обоих источников ЭДС E_1 и E_2) и построить потенциальную диаграмму.

Порядок выполнения работы.

1) Включить лабораторный стенд тумблером «Сеть». Тумблеры S_2 и S_3 должны находиться в положении «1». Измерить величину ЭДС первого источника E_1 , установить значение ЭДС E_2 равным E_1 , с помощью ЛАТРА. Измерения величины ЭДС производить мультиметром. Результаты занести в таблицу 3.1.

2) Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 3.3).

3) Отключить источник ЭДС E_2 переключив тумблер S_3 в положение «2», измерить значения токов I_{11} (по амперметру A_1 переключка в положении «П2»), I_{21} (по амперметру A_1 переключка в положении «П1»), I_{31} (по амперметру A_2). Включить источник ЭДС E_2 переключив тумблер S_3 в положение «1», и отключить источник ЭДС E_1 переключив тумблер S_2 в положение «2», измерить значения токов I_{12} , (по амперметру A_1 переключка в положении «П2»), I_{22} (по амперметру A_1 переключка в положении «П1»), I_{32} (по амперметру A_2) в ветвях с учетом знаков. Результаты занести в таблицу 3.1.

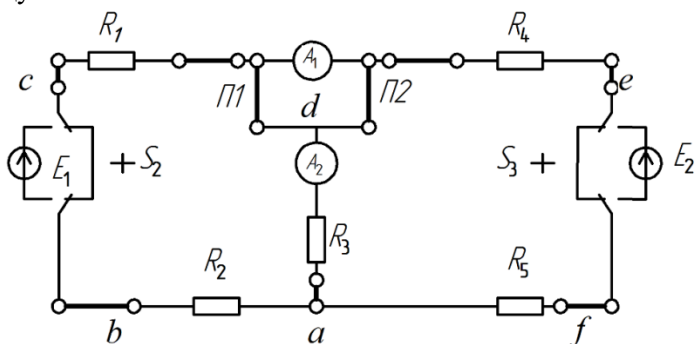


Рис. 3.3. Схема соединения исследуемой лабораторной цепи

4) Включить оба источника ЭДС, тумблеры S_2 и S_3 , в положение «1», измерить полные токи I_1 , I_2 , I_3 (аналогично пункту 3) в ветвях цепи и занести все данные в таблицу 3.1.

5) Суммируя полученные данные по методу наложения получить токи в ветвях I_{1p} , I_{2p} , I_{3p} и проверить достоверность метода наложения. Результаты расчета занести в таблицу 3.2.

6) На основании экспериментальных данных вычислить собственные g_{11} , g_{22} , g_{33} и взаимные g_{12} , g_{21} , g_{31} , g_{32} проводимости ветвей. Полученные данные занести в таблицу 3.2.

$$\left. \begin{aligned} g_{11} &= \frac{I_{11}}{E_1}, \text{ сим}; g_{12} = g_{21} = \frac{I_{12}}{E_2}, \text{ сим}; g_{22} = \frac{I_{22}}{E_2}, \text{ сим}; \\ g_{31} &= \frac{I_{31}}{E_1}, \text{ сим}; g_{32} = \frac{I_{32}}{E_2}, \text{ сим}; g_{33} = g_{31} + g_{32}, \text{ сим.} \end{aligned} \right\} (3.6)$$

7) Рассчитать погрешность измерений, по формуле, приведенной в таблице 3.2.

Таблица 3.1

Результаты измерений по методу наложения

E_1 , В	E_2 , В	I_{11} , А	I_{21} , А	I_{31} , А	I_{12} , А	I_{22} , А	I_{32} , А	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А

Таблица 3.2

*Результаты расчетов по методу наложения
и принципу взаимности*

I_{1p} , А	I_{2p} , А	I_{3p} , А	g_{11} , См	g_{22} , См	$g_{12} = g_{21}$, См	g_{31} , См	g_{32} , См	g_{33} , См	$\delta = (I_1 - I_{1p})/I_1$

8) Построить потенциальную диаграмму схемы для режима работы цепи, при обоих включенных источниках ЭДС. Сопротивления участков цепи принять равными: $R_{ab} = 52,4 \text{ Ом}$; $R_{bc} = 7,6 \text{ Ом}$; $R_{cd} = 52,4 \text{ Ом}$; $R_{da} = 167 \text{ Ом}$; $R_{de} = 158 \text{ Ом}$; $R_{ef} = 10 \text{ Ом}$; $R_{fa} = 200 \text{ Ом}$.

Вопросы для самоконтроля

1. На каком принципе основан метод наложения?
2. Поясните, что такое собственные и взаимные проводимости ветвей, и каким образом они определяются экспериментально?
3. Укажите порядок расчета цепи методом наложения.
4. Сформулируйте принцип взаимности.
5. Возможно ли использовать метод наложения если цепь невзаимная?

Лабораторная работа №4

Исследование характеристик активного двухполюсника ПТ

Цель работы: исследовать характеристики линейного активного двухполюсника и определить параметры его схемы замещения эквивалентным генератором.

Часть электрической цепи с двумя выделенными зажимами (полюсами) называется двухполюсником (рис. 4.1, *a*). На электрической схеме эту часть цепи изображают в виде прямоугольника (рис. 4.1, *б*). Различают активные двухполюсники, содержащие источники электрической энергии, и пассивные, не содержащие таких источников. Основными обобщенными параметрами активного двухполюсника являются входное сопротивление $R_{вх}$ и напряжение холостого хода U_{xx} . Входное сопротивление двухполюсника $R_{вх}$ определяется относительно выделенных зажимов цепи при условии, что все источники тока отключены, а источники ЭДС закорочены, но их внутренние сопротивления в схеме цепи сохраняются. Напряжение холостого хода U_{xx} определяется как напряжение, действующее на разомкнутых выделенных зажимах цепи. Аналитически для определения $R_{вх}$ и U_{xx} используются любые методы анализа электрической цепи. Указанные параметры можно определить и опытным путем с помощью вольтметра и амперметра. При этом входное сопротивление определяется как

$$R_{вх} = \frac{U_{xx}}{I_k}, \text{ Ом.} \quad (4.1)$$

При известных обобщенных параметрах активного двухполюсника ток в выделенной ветви, например, ветви «ав» (рис. 4.1, *a*) определяется по формуле

$$I_{ab} = \frac{U_{xx}}{R_{вх} + R_{ab}}, \text{ А.} \quad (4.2)$$

Если в ветви имеется источник ЭДС, то ток в ветви равен

$$I_{ab} = \frac{U_{xx} \pm E_{ab}}{R_{вх} + R_{ab}}, \text{ А.} \quad (4.3)$$

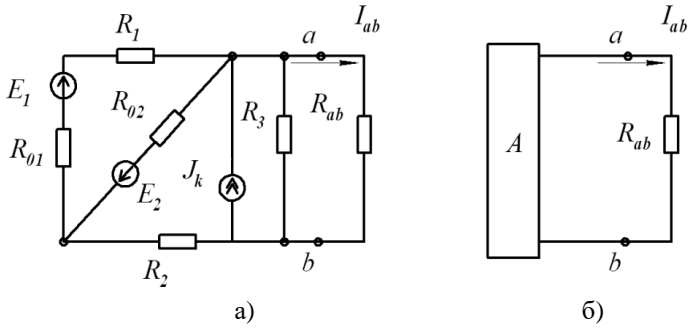


Рис. 4.1. Схемы активного двухполюсника:
 а – развернутая (элементарная); б – принципиальная

Активный двухполюсник можно представить в виде эквивалентного источника ЭДС (эквивалентного генератора) с $E_{\Gamma} = U_{xx}$ и внутренним сопротивлением $R_{\Gamma} = R_{xx}$ (рис. 4.2, а). Ток в исследуемой ветви равен

$$I_{ab} = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_{ab}}, \text{ А.} \quad (4.4)$$

Активный двухполюсник можно представить так же схемой эквивалентного источника тока

$$J_k = \frac{U_{xx}}{R_{Bx}}, \text{ А.} \quad (4.5)$$

Ток источника равен току между замкнутыми накоротко зажимами выделенной ветви.

Внутренняя проводимость такого генератора равна

$$G_{Bx} = 1/R_{Bx}, \text{ сим.} \quad (4.6)$$

Величина падения напряжения в исследуемой ветви равна

$$U_{ab} = \frac{J_k}{G_{Bx} + G_{ab}}, \text{ В.} \quad (4.7)$$

где $G_{ab} = 1/R_{ab}$, сим. – проводимость ветви с нагрузкой.

Соответственно ток в нагрузке определится по зависимости

$$I_H = \frac{J_k}{1 + G_{Bx} \cdot G_{ab}}, \text{ А.} \quad (4.8)$$

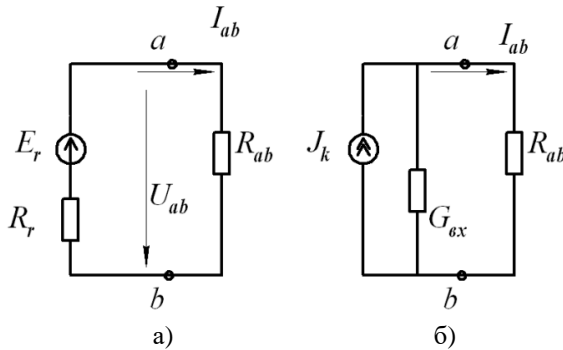


Рис. 4.2. Схемы замещения активного двухполюсника эквивалентными генераторами:
 а – последовательная (с источником ЭДС);
 б – параллельная (с источником тока)

Схему эквивалентного генератора с источником ЭДС (рис. 4.2, а) называют схемой Тевенена-Гельмгольца, а схему с источником тока (рис. 4.2, б) – схемой Нортонa.

При анализе процессов, проходящих в цепи активного двухполюсника, и условий передачи энергии от него к нагрузке, рассматривают следующие режимы работы:

- ✓ Холостой ход (х.х.), при котором потребитель отключен; ток через выделенные зажимы равен нулю, напряжение на разомкнутых зажимах наибольшее.
- ✓ Короткое замыкание (к.з.), при котором выделенные зажимы замкнуты накоротко; напряжение на них равно нулю, а ток имеет максимальную величину:

$$I_k = \frac{U_{xx}}{R_{вх}}, \text{ А.} \quad (4.9)$$

- ✓ Работа с нагрузкой, при которой к выделенным зажимам подключена нагрузка в виде омического, активного или комплексного (полного) сопротивления.

Задание. Проработать теоретические вопросы по теме лабораторной работы. Изучить схему лабораторной установки. Провести измерения параметров двухполюсника в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой. По полученным данным провести расчеты параметров двухполюсника

и эквивалентного генератора, а также характеристики процесса передачи мощности.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать исследуемую цепь двухполюсника согласно рисунку 4.3. Тумблеры S_2 и S_3 должны находиться в положении «2» (источники ЭДС отключены).

2) Включить лабораторный стенд. Временно отсоединить перемычки в точках «b» и «c» схемы, включить источник ЭДС E_1 (тумблер S_2 в положении «1») и мультиметром замерить величину его ЭДС. Показания занести в таблицу 4.1.

3) Отключить источник ЭДС E_1 и установить на место отсоединенные перемычки в точках «b» и «c». Отсоединить перемычку в точке «e» цепи и включить источник ЭДС E_1 . Мультиметром замерить величину напряжения холостого хода U_{xx} между точками «d» и «a». Занести полученное значение в таблицу 4.1.

4) Отключить источник ЭДС E_1 и установить отсоединенную перемычку в точке «e». Установить закорачивающую перемычку между выходом амперметра A_1 (с правой стороны от него к группе точек «d») и точкой «a». Включить источник ЭДС E_1 и замерить ток короткого замыкания $I_{кз}$ по амперметру A_1 . Занести полученное значение в таблицу 4.1.

5) Убрать установленную закорачивающую перемычку и замерить величину тока нагрузки I_n по амперметру A_1 . Мультиметром замерить напряжение на нагрузке U_n , между точками «d» и «a». Занести полученное значение в таблицу 4.1.

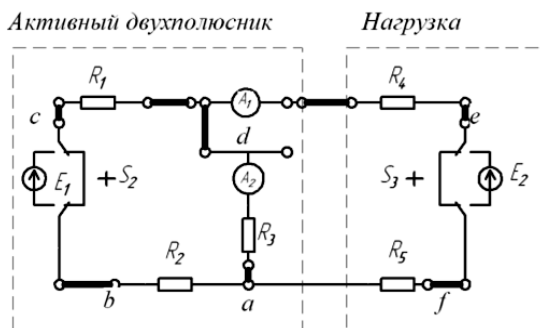


Рис. 4.3. Схема подключения лабораторной установки для определения параметров двухполюсника

Таблица 4.1

*Результаты эксперимента по определению параметров
активного двухполюсника*

Измерено					Рассчитано			
$E_1,$ В	$U_{xx},$ В	$I_{кз},$ А	$I_H,$ А	$U_H,$ В	$R_{вх},$ Ом	$R_H,$ Ом	$E_\Gamma,$ В	$P_H,$ А

6) Используя полученные данные (табл. 4.1), провести расчеты всех необходимых параметров электрической цепи:

$$\left. \begin{aligned} R_{вх} &= \frac{U_{xx}}{I_{кз}}, \text{ Ом}, \quad R_H = \frac{U_H}{I_H}, \text{ Ом}, \\ E_\Gamma &= I_H (R_H + R_{вх}), \text{ В}, \\ I_H^p &= \frac{U_{xx}}{R_H + R_{вх}}, \text{ А}. \end{aligned} \right\} \quad (4.10)$$

7) Составить схему эквивалентного генератора и построить его потенциальную диаграмму.

8) Проанализировать полученные экспериментальные и расчетные данные и сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение двухполюсника электрической цепи.
2. Охарактеризовать режимы работы активного двухполюсника.
3. Привести примеры реальных устройств, в работе которых имеют место режимы, аналогичные режимам активного двухполюсника.
4. Как определяются обобщенные параметры активного двухполюсника?
5. Привести схемы замещения активного двухполюсника эквивалентными генераторами с источником ЭДС и источником тока.

Лабораторная работа № 5

Исследование процесса передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке

Цель работы: исследовать характеристики процесса передачи мощности от активного двухполюсника постоянного тока к нагрузке.

Активный двухполюсник, содержащий в своем составе какие-либо источники энергии, относительно своих выводных зажимов является генератором для какой-либо внешней электрической цепи (нагрузки).

Активный двухполюсник может работать в трех основных режимах:

- холостого хода, при котором ток нагрузки равен нулю $I_H = 0$ А, а напряжение на нагрузке имеет максимальное значение $U_H = \max$;
- короткого замыкания, при котором ток нагрузки имеет максимальное значение $I_H = \max$, а напряжение на нагрузке равно нулю $U_H = 0$ В;
- под нагрузкой, при котором ток и напряжения имеют определенные величины.

Работа в режиме под нагрузкой может быть двух типов:

- режим согласованной нагрузки, при котором сопротивление нагрузки R_H равно входному сопротивлению $R_{вх}$ активного двухполюсника. Нагрузке передается наибольшая полезная мощность, при КПД передачи равном 0,5;
- режим оптимальной нагрузки, при котором обеспечиваются наилучшие условия передачи мощности от активного двухполюсника нагрузке. В этом случае КПД может достигать значений 0,95-0,97, при этом величина передаваемой мощности ниже, чем при согласованном режиме.

При известных обобщенных параметрах активного двухполюсника ток в выделенной ветви, например, ветви «ав» (рис. 5.1, а) определяется по формуле

$$I_H = \frac{U_{xx}}{R_{вх} + R_H}, \text{ А.} \quad (5.1)$$

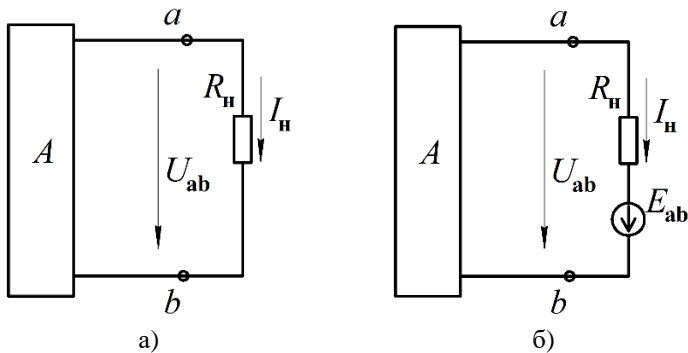


Рис. 5.1. Схемы активных двухполюсников с нагрузками: а – с пассивной ветвью нагрузки; б – с активной ветвью нагрузки

Если в ветви нагрузки имеется источник ЭДС (рис. 5.1, б), то ток в ветви определяется с учетом влияния этого источника. Знак «плюс» ставится в том случае, если направление источника ЭДС совпадает с направлением тока, иначе знак «минус».

$$I_n = \frac{U_{xx} \pm E_{ab}}{R_{вх} + R_n}, \text{ А.} \quad (5.2)$$

Мощность, выделяющаяся в нагрузке, определяется по формуле

$$P_n = U_{ab} \cdot I_n = I_n \cdot R_n \cdot I_n = I_n^2 \cdot R_n, \text{ Вт,} \quad (5.3)$$

Учитывая выражение (5.1) получим

$$P_n = \frac{U_{xx}^2}{(R_{вх} + R_n)^2} R_n, \text{ Вт.} \quad (5.4)$$

Из полученной зависимости видно, что функция мощности является нелинейной, а квадратичной. Поэтому необходимо выяснить, каково должно быть соотношение между сопротивлением нагрузки R_n и сопротивлением двухполюсника $R_{вх}$, чтобы в сопротивлении нагрузки выделялась максимальная мощность. Для этого необходимо определить первую производную мощности P_n по сопротивлению R и приравнять ее к нулю:

$$\frac{dP}{dR} = \frac{(R_H + R_{BX})^2 - 2R_H(R_H + R_{BX})}{(R_H + R_{BX})^4} = 0. \quad (5.5)$$

Дробь будет равна нулю, если ее числитель равен нулю:

$$(R_H + R_{BX})^2 - 2R_H(R_H + R_{BX}) = 0. \quad (5.6)$$

Решив данное уравнение, получаем, что $R_H = R_{BX}$. То есть данное равенство соответствует максимуму функции $P_H = f(R_H)$.

Таким образом, выражение (5.4), с учетом полученного равенства, характеризует величину максимальной мощности, которая может быть передана от активного двухполюсника к нагрузке:

$$P_{\max} = \frac{U_{XX}^2}{4R_{BX}}, \text{ Вт.} \quad (5.7)$$

Полная мощность, выделяемая активным двухполюсником, составит

$$P_{\text{полн}} = U_{XX} \cdot I_H = \frac{U_{XX}^2}{R_H + R_{BX}}, \text{ Вт.} \quad (5.8)$$

Коэффициент полезного действия процесса передачи энергии составит

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\text{полн}}} = \frac{R_H}{R_H + R_{BX}}. \quad (5.9)$$

Анализируя данное выражение очевидно, что если $R_H = R_{BX}$, то КПД передачи составит $\eta = 0,5$.

Задание. Изучить схему исследуемого двухполюсника с нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров процесса передачи мощности от активного двухполюсника к омической нагрузке. По результатам измерений провести необходимые расчеты параметров процесса передачи и построить требуемые графики. Провести анализ графиков и результатов эксперимента, по итогам сформулировать выводы.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать электрическую схему исследуемого активного двухполюсника по рисунку 5.2.

2) Временно отсоединить перемычку, ведущую к резистору R_{17} . Включить стенд и установить с помощью ЛАТРа напряжение на выходе активного двухполюсника равным 20 В (по вольтметру $V1$). Избегать работы схемы при токах нагрузки более 0,3 А на протяжении более 10 мин. Записать показания приборов в режиме холостого хода U_{xx} .

3) Установить сопротивление нагрузки равным 100 Ом (левый переключатель блока $R17$) и установить на место перемычку, ведущую к резистору R_{17} . Провести измерения по приборам (напряжение U_n по вольтметру $V2$, а ток I_n по амперметру $A1$). Далее установить сопротивление нагрузки равным 90 Ом и провести аналогичные измерения. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

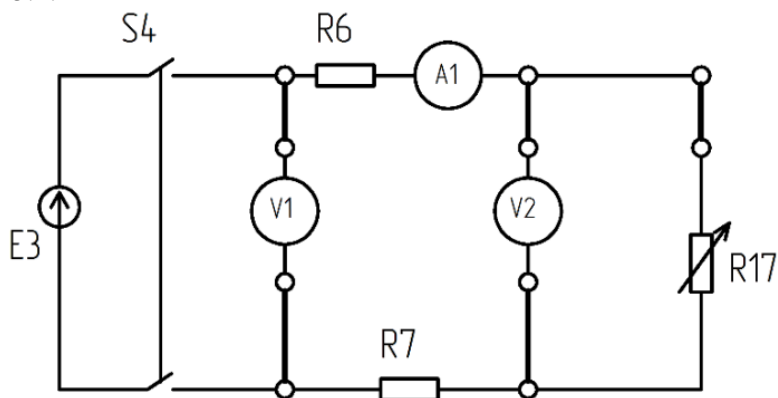


Рис. 5.2. Схема подключения лабораторной установки для исследования процесса передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке

4) Провести расчеты необходимых параметров процесса передачи мощности ($P_{полн}$ по зависимости (5.8), а P_n по зависимости (5.3)). Результаты занести в таблицу 5.1. Величину КПД рассчитать по формуле (5.9).

5) По данным таблицы 5.1 построить графики функций $P_{полн} = f(I_n)$, $P_n = f(I_n)$, $\eta = f(I_n)$ в одних координатных осях. Исследуя графики, проанализировать режимы работы активного двухполюсника и сделать выводы.

Таблица 5.1

Результаты эксперимента по исследованию процесса передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке

Установлено	Измерено			Рассчитано		
R_n , Ом	U_{xx} , В	U_n , В	I_n , А	$P_{полн.}$, Вт	P_n , Вт	η
∞ (холостой ход)	20					
100						
90						
80						
70						
60						
50						
40						
30						
20						
10						
0 (КЗ)						

Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение понятию «активный двухполюсник».
2. Какова зависимость КПД передачи от сопротивления нагрузки?
3. Какова зависимость мощности, выделяемой в нагрузке, от ее сопротивления?
4. Каким образом можно повысить КПД передачи мощности?
5. В каких случаях необходимо повышать КПД передачи, а в каких необходимо передавать максимальную мощность, но с КПД равным 0,5?

Лабораторная работа №6

Исследование характеристик ЛЭЦСТ на примере пассивного двухполюсника

Цель работы: исследовать характеристики, основные свойства и законы ЛЭЦ синусоидального тока на примере пассивных двухполюсников с активными, активно-реактивными и реактивными сопротивлениями.

Как известно, часть электрической цепи с двумя выделенными жазимами (полюсами) называется двухполюсником. Пассивные двухполюсные элементы вводят в схемы замещения цепей синусоидального тока для учета процессов преобразования электромагнитной энергии. Двухполюсники могут быть резистивными – R (рис. 6.1, а), индуктивными – L (рис. 6.1, б) и емкостными – C (рис. 6.1, в), а также смешанными: активно-индуктивными – RL , активно-емкостными – RC и активно-индуктивно-емкостными – RLC .

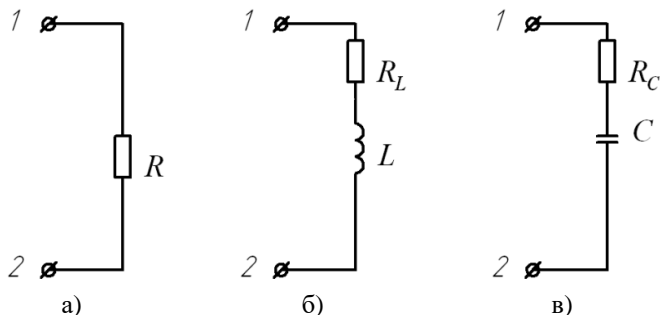


Рис. 6.1. Схемы пассивных двухполюсников: а – активный; б – индуктивный; в – емкостный

В цепи с двухполюсником активного сопротивления мгновенное значение напряжения определяется выражением

$$u = U_m \sin \omega t, \text{ В.} \quad (6.1)$$

Для определения тока используем закон Ома:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \text{ А.} \quad (6.2)$$

Ток совпадает по фазе с напряжением. Тогда мгновенную мощность можно определить зависимостью

$$p = ui = U_m I_m \sin^2 \omega t, \text{ Вт.} \quad (6.3)$$

Средняя за период мощность, равная активной мощности определяется выражением

$$P_{\text{ср}} = P = UI \cos \varphi = RI^2 \cos \varphi, \text{ Вт.} \quad (6.4)$$

В цепи с индуктивностью L при напряжении $u = U_m \sin \omega t$ ток определяется зависимостью

$$i = I_m \sin(\omega t - 90), \text{ А.} \quad (6.5)$$

Ток отстает по фазе от напряжения на угол $\pi/2$, а его амплитуда равна:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L}, \text{ А,} \quad (6.6)$$

где $\omega L = 2\pi f L = X_L$ – индуктивное сопротивление, Ом.

В цепи с емкостью C , при напряжении $u = U_m \sin \omega t$, ток определяется выражением

$$i = I_m \sin(\omega t + 90), \text{ А.} \quad (6.7)$$

Ток опережает по фазе напряжение на угол $\pi/2$, а его амплитуда определяется зависимостью

$$I_m = \frac{U_m}{1/\omega C} = \frac{U_m}{X_C} = \omega C U_m, \text{ А,} \quad (6.8)$$

где $1/\omega C = 1/2\pi f C = X_C$ – емкостное сопротивление, Ом.

Мгновенная мощность в цепях с индуктивностью и емкостью определяется зависимостью

$$p = ui = \omega L I_m^2 \sin 2\omega t, \text{ Вт.} \quad (6.9)$$

Мощность изменяется по синусоиде с двойной частотой 2ω .

Угол сдвига фаз на реактивном элементе равен

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}. \quad (6.10)$$

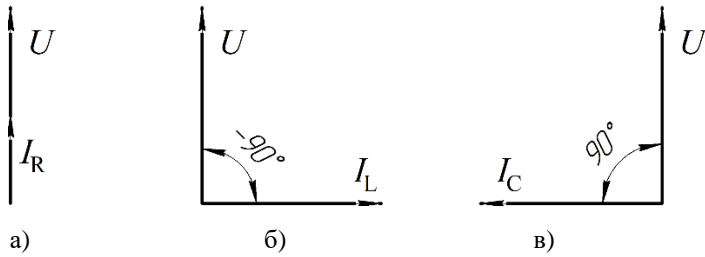


Рис. 6.2. Векторные диаграммы идеальных двухполюсников
а – активного; б – индуктивного; в – емкостного

При подключении идеальных реактивных элементов угол сдвига фаз между током и напряжением составляет ровно 90° . При этом в индуктивном элементе ток отстает от напряжения (рис. 6.2, б), а на емкостном элементе – опережает (рис. 6.2, в). Однако реальные индуктивные и емкостные элементы обладают не только реактивным, но и активным сопротивлением, поэтому угол сдвига фаз будет несколько меньше 90° .

Векторные диаграммы идеальных элементов представлены на рисунке 6.2, а реальных – на рисунке 6.3.

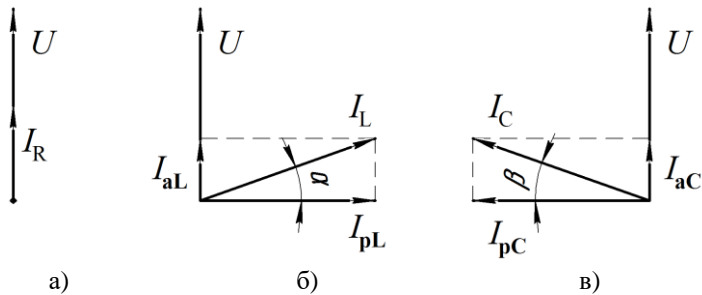


Рис. 6.3. Векторные диаграммы реальных двухполюсников:
а – активного; б – индуктивного (активно-индуктивного);
в – емкостного (активно-емкостного)

Задание. Изучить схемы подключения исследуемых двухполюсников. Провести необходимые измерения параметров исследуемых двухполюсников. На основании полученных параметров провести необходимые расчеты характеристик двухполюсников и построить их векторные диаграммы.

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 6.4, а).
- 2) Включить лабораторный стенд, затем включить ЛАТР, затем включить тумблер $S7$.
- 3) Установить входное напряжение равное 50 В.
- 4) Провести измерения параметров по приборам и занести их показания в таблицу 6.1.
- 5) Отключить тумблер $S7$ и собрать следующую электрическую цепь с индуктивным элементом $L2$ (рис. 6.4. б).
- 6) **Установить переключатель $L2$ в положение «2».** Включить тумблер $S7$, установить величину входного напряжения равную **200 В** и провести действия аналогичные пункту 4.
- 7) Отключить тумблер $S7$ и собрать следующую электрическую цепь с емкостным элементом $C1$ (рис. 6.4, в).
- 8) Установить величину емкости $C1$ равную 40 мкФ (на одноименном блоке выключателей, справа стороны стенда). Включить тумблер $S7$, установить величину входного напряжения равную **45 В** и провести действия аналогичные пункту 4.
- 9) Собрать электрическую цепь по рисунку 6.4, г. Установить величину входного напряжения равную 250 В и провести действия аналогичные пункту 4.
- 10) Собрать электрическую цепь по рисунку 6.4, д. Установить величину входного напряжения равную 80 В и провести действия аналогичные пункту 4.
- 11) Собрать электрическую цепь по рисунку 6.4, е. Установить величину входного напряжения равную 250 В и провести действия аналогичные пункту 4.
- 12) Провести необходимые расчеты (по формулам (6.11) приведенным ниже) и заполнить таблицу 6.1.

$$\left. \begin{aligned}
 S &= UI, \text{ ВА}, \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}, \\
 \varphi &= \arccos \varphi, \text{ град.}, \\
 Z &= \frac{U}{I}, \text{ Ом}, \quad R = Z \cos \varphi, \text{ Ом}, \\
 X &= Z \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi)}, \text{ Ом}, \\
 Q &= S \sqrt{(1 - \cos^2 \varphi)}, \text{ вар}, \\
 L &= \frac{X}{\omega}, \text{ Гн}, \quad I_a = I \cos \varphi, \text{ А},
 \end{aligned} \right\} \quad (6.11)$$

$$I_p = I\sqrt{(1 - \cos^2\varphi)}, \text{ A.}$$

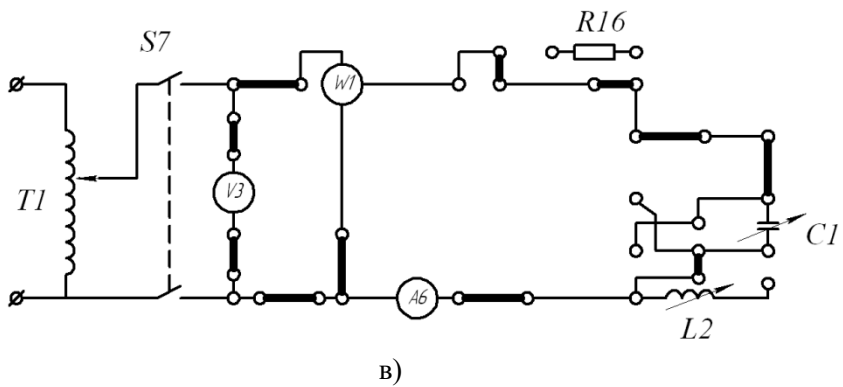
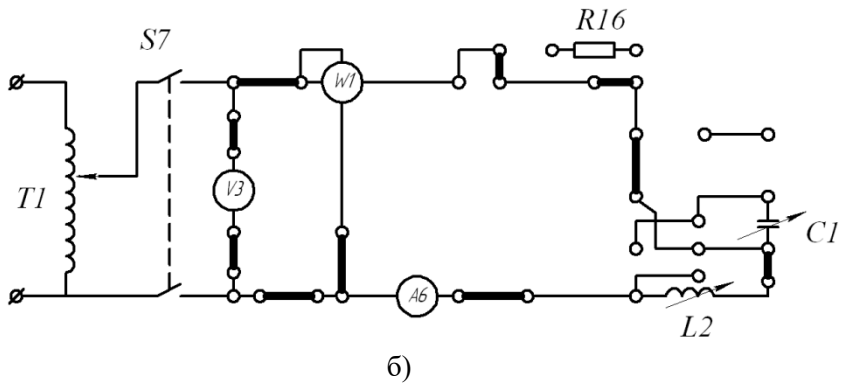
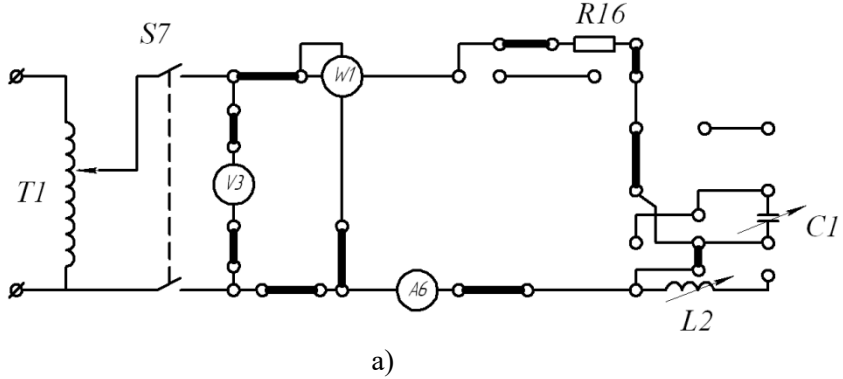


Рис. 6.4. Схемы соединения цепей двухполюсников:

а – активного; б – индуктивного; в – емкостного; г – активно-индуктивного;
 д – активно-емкостного; е – активно-индуктивно-емкостного

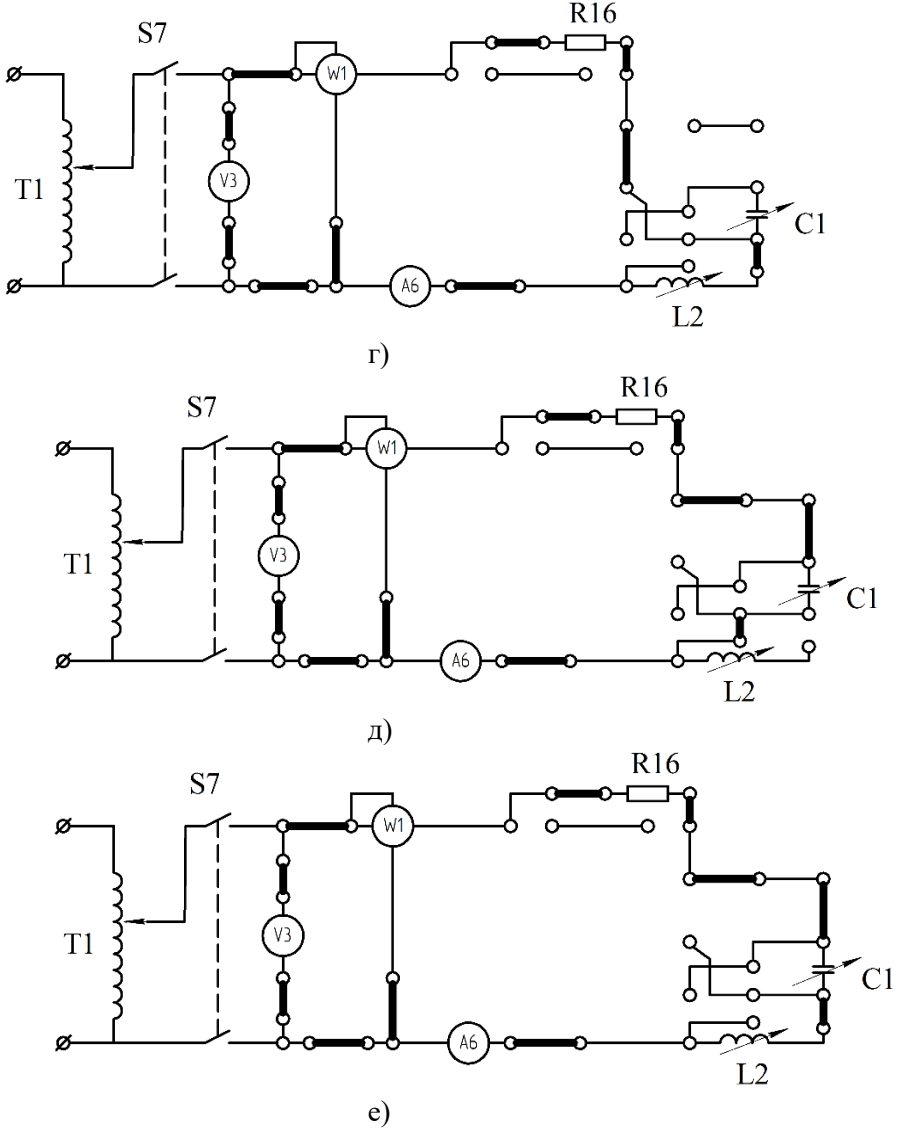


Рис. 6.4. Окончание (начало см. на с. 34)

13) Для каждого двухполюсника построить векторную диа-

грамму напряжения и тока(-ов). Проанализировать полученные результаты и представить краткие выводы.

Таблица 6.1

Результаты исследования характеристик двухполюсников

Тип 2-х полус- ника	Измерено			Рассчитано										
	U , В	I , А	P , Вт	S , ВА	$\cos\varphi$	φ , град	Z , Ом	R , Ом	X , Ом	Q , вар	L , Гн	C , мкФ	I_a , А	I_p , А
R								-	-	-	-			-
L											-			
C											-			
RL												-		
RC											-			
RLC														

Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение пассивного и активного двухполюсников.
2. Как экспериментально определить параметры пассивного двухполюсника в цепи переменного тока?
3. Что понимают под активной, реактивной и полной мощностью? Назвать единицы их измерения.
4. Привести формулы для расчета параметров активных и реактивных двухполюсников.
5. Привести векторные диаграммы простейших двухполюсников в цепи переменного тока.

Лабораторная работа №7

Исследование линейного двухполюсника в режиме резонанса напряжений

Цель работы: исследовать характеристики явления резонанса напряжений в цепи линейного двухполюсника с последовательным соединением реактивных элементов.

В электрических цепях переменного синусоидального тока, содержащих емкостные и индуктивные элементы, при определенных условиях возникает резонанс. При этом ток и напряжение на зажимах цепи совпадают по фазе ($\varphi = 0$), а полное сопротивление является чисто активным.

При резонансе происходит обмен энергией между магнитным полем катушки индуктивности и электрическим полем конденсатора

$$W_M = \frac{Li^2}{2}, \text{ Дж}; \quad (7.1)$$

$$W_{\text{Э}} = \frac{Cu^2}{2}, \text{ Дж}. \quad (7.2)$$

В любой момент времени должно соблюдаться условие

$$\frac{Li^2}{2} = \frac{Cu^2}{2} = \text{const}. \quad (7.3)$$

Поэтому, при резонансе энергия от источника поступает только на покрытие тепловых потерь в резисторах цепи.

В случае последовательного соединения реактивных элементов (рис. 7.1) ток в цепи один, и равен току, проходящему через каждый элемент цепи. Величина падений напряжений на каждом элементе различна, как по величине, так и по фазе. В такой цепи возможно возникновение резонанса напряжений.

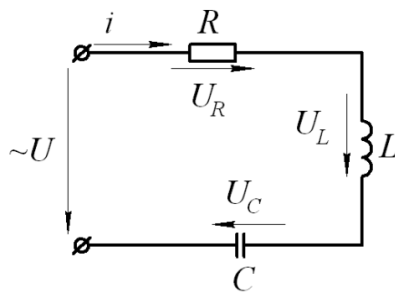


Рис. 7.1. Схема последовательного резонансного двухполюсника

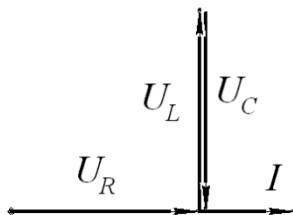


Рис. 7.2. Векторная диаграмма последовательного резонансного двухполюсника

Напряжение, приложенное к последовательной цепи, равно

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C, \text{ В.} \quad (7.4)$$

Полное комплексное сопротивление последовательной цепи равно:

$$\underline{Z} = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = Z e^{j\varphi}, \text{ Ом.} \quad (7.5)$$

При $\varphi = 0$, $\underline{Z} = Z = R$, то есть при резонансе напряжений сопротивление цепи имеет чисто активный характер. Следовательно, получаем

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \text{ Ом,} \quad (7.6)$$

где ω_0 – резонансная частота контура, с^{-1} .

Из выражения (7.6) получаем величину резонансной частоты

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \text{ с}^{-1}, \quad (7.7)$$

или, соответственно, величину периодической частоты

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \text{ Гц.} \quad (7.8)$$

Так как при резонансе ток в цепи имеет чисто активный характер ($I = \dot{U}/R$), то модули индуктивного и емкостного сопротивлений равны между собой

$$U_L = U_C = \omega_0 LI = \frac{\omega_0 L}{R} U, \text{ В.} \quad (7.9)$$

Отношение

$$\frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C} = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{U_{L_0}}{U} = \frac{U_{C_0}}{U} = \frac{\rho}{R} = Q \quad (7.10)$$

называют добротностью резонансного контура.

Добротность показывает, во сколько раз напряжение на индуктивном (емкостном) элементе превышает напряжение на входе цепи в режиме резонанса.

Величина ρ , называемая характеристическим или волновым сопротивлением, характеризует отношение напряжения на индуктивном или емкостном сопротивлении к току и численно равна реактивному сопротивлению в режиме резонанса. Данная величина определяется по выражению

$$\rho = QR = X_{L_0} = X_{C_0} = \sqrt{L/C}, \text{ Ом.} \quad (7.11)$$

Задание. Изучить схему подключения исследуемого двухполюсника. Провести необходимые измерения параметров исследуемого резонансного двухполюсника. На основании полученных параметров провести необходимые расчеты характеристик двухполюсника и построить его векторные диаграммы (до резонанса, при наступлении резонанса и после резонанса).

Порядок выполнения работы.

1) Собрать электрическую цепь для экспериментального определения параметров катушки индуктивности, согласно рисунку 7.3.

2) Экспериментально определить параметры катушки индуктивности L_2 . Для этого переключатель индуктивности установить

в позицию «2». **Входное напряжение установить равным 60 В.** Провести необходимые измерения, а полученные данные занести в таблицу 7.1.

3) Провести необходимые расчеты параметров катушки по формулам (7.12), а полученные данные занести в таблицу 7.1.

$$\left. \begin{aligned} R_K &= \frac{P_K}{I_K}, \text{ Ом}, \quad Z_K = \frac{U_K}{I_K}, \text{ Ом}, \\ X_K &= \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \text{ Ом}, \quad L_K = \frac{X_K}{2\pi f}, \text{ Гн}. \end{aligned} \right\} (7.12)$$

4) Для получения резонанса напряжений расчетным путем вычислить величину емкости батареи конденсаторов по формуле (7.13). Полученное значение занести в таблицу 7.2.

$$C_1 = \frac{10^6}{4\pi^2 f^2 L}, \text{ мкФ}. \quad (7.13)$$

5) Собрать электрическую цепь последовательного резонансного контура согласно рисунку 7.4.

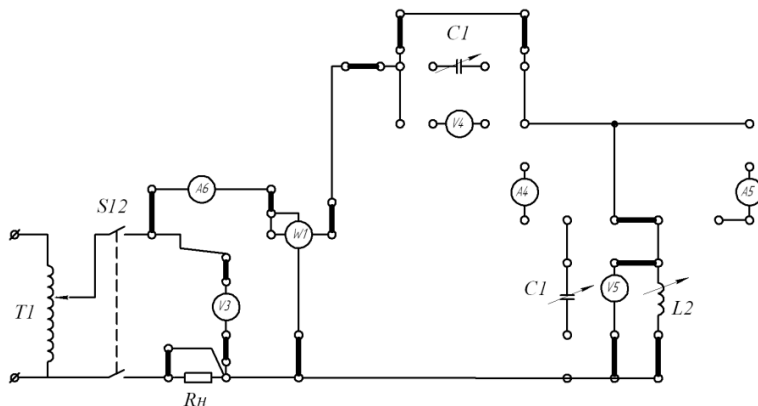


Рис. 7.3. Схема подключения исследуемой цепи для определения параметров катушки индуктивности

6) Исследовать явление резонанса напряжений. **Напряжение на входе цепи установить равным 24 В!** Тумблерами батареи конденсаторов C_1 установить величину емкости равную расчетной « C_1 ». Показания приборов занести в таблицу 7.2.

7) Установить величину емкости на 50% ниже « C_1 » и провести измерения. Затем установить величину емкости на 50% выше « C_1 », и повторить измерения. Полученные данные занести в таблицу 7.2.

8) Выполнить необходимые расчеты параметров исследуемой последовательной цепи по формулам (7.12), (7.14) и (7.15).

Характеристическое сопротивление составит

$$\rho = \sqrt{L_{кк}/C_1}, \text{ Ом.} \quad (7.14)$$

Добротность контура определяется выражением

$$Q = \frac{\rho}{R}. \quad (7.15)$$

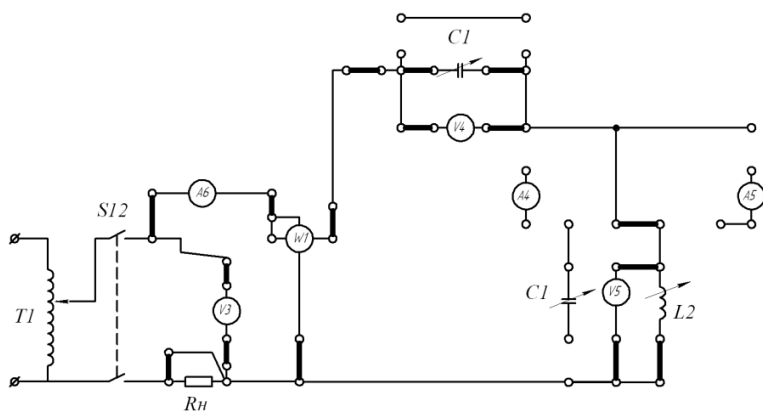


Рис. 7.4. Схема подключения исследуемой цепи для исследования явления резонанса напряжений

9) Построить векторные диаграммы токов и напряжений исследуемой цепи для всех исследованных случаев, проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Таблица 7.1

Результаты определения параметров катушки индуктивности

Установлено	Измерено			Рассчитано			
	$U_{кк}$, В	$I_{кк}$, А	$P_{кк}$, Вт	$Z_{кк}$, Ом	$R_{кк}$, Ом	$X_{кк}$, Ом	$L_{кк}$, Гн
60							

Таблица 7.2

Результаты исследования явления резонанса напряжений

Установлено		Измерено					Рассчитано				
емкость, C_1 , мкФ	U , В	I , А	U_C , В	U_L , В	P , Вт	Z , Ом	R , Ом	$\cos \varphi$	ρ , Ом	Q	
C_1											
- 50% C_1		24									
+ 50% C_1											

Вопросы для самоконтроля

1. Дать общее определение резонанса любой системы.
2. Резонанс напряжений – это желательный режим силовой производственной цепи?
3. Что такое добротность цепи и как она определяется, если известны параметры цепи R , L , C ?
4. Какое значение принимает ток (высокое или низкое) в цепи при резонансе напряжений?
5. Возрастает или убывает входное сопротивление последовательного контура электрической цепи, при вхождении в режим резонанса напряжений?

Лабораторная работа №8

Исследование линейного двухполюсника в режиме резонанса ТОКОВ

Цель работы: исследовать характеристики явления резонанса токов в цепи линейного двухполюсника с параллельным соединением реактивных элементов.

В электрических цепях переменного тока, содержащих емкостные и индуктивные элементы, при определенных условиях возникает резонанс. При этом ток и напряжение на зажимах цепи совпадают по фазе ($\varphi = 0$). Как и в последовательном двухполюснике, в параллельном сопротивление и проводимость параллельных ветвей имеет чисто активный характер. То есть, $b_L = b_C$, или $b_L + b_C = 0$.

При резонансе происходит обмен энергией между магнитным полем катушки индуктивности и электрическим полем конденсатора:

$$W_M = \frac{Li^2}{2}, \text{ Дж}; \quad (8.1)$$

$$W_Э = \frac{Cu^2}{2}, \text{ Дж}. \quad (8.2)$$

В любой момент времени должно соблюдаться условие

$$\frac{Li^2}{2} = \frac{Cu^2}{2} = \text{const}. \quad (8.3)$$

Поэтому, при резонансе энергия от источника поступает только на покрытие тепловых потерь в резисторах цепи.

В электрической цепи при параллельном соединении катушки индуктивности и емкости (рис. 8.1) при определенных условиях возникает резонанс токов, а именно, ток I и напряжение U на входе цепи должны совпадать по фазе ($\varphi = 0$).

По условию резонанса сумма реактивных проводимостей ветвей должна быть равна нулю. Тогда, в нашем случае, получим суммарную реактивную проводимость ветвей:

$$b = b_L + b_C = \frac{\omega L}{R_k^2 + \omega^2 L^2} - \omega C = 0 \text{ сим.} \quad (8.4)$$

То есть резонансная частота будет равна

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} \left(1 - \frac{R^2 C}{L}\right)} = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - R^2 \frac{C}{L}}, \text{ с}^{-1}. \quad (8.5)$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота в контуре без потерь, т.е. при $R_k = 0$ Ом.

Если решением получается мнимая единица, то резонанс, в данном контуре, невозможен.

Активная проводимость цепи определится по зависимости

$$g = \frac{R^2}{R^2 + \omega^2 L^2}, \text{ сим.} \quad (8.6)$$

То есть она зависит от частоты приложенного напряжения. Следует обратить внимание на то, что при резонансе ток в ветви с катушкой индуктивности не равен току в ветви с конденсатором (рис. 8.2), а равны лишь их реактивные составляющие.

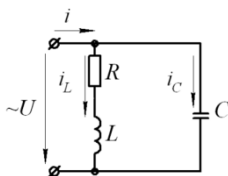


Рис. 8.1. Схема параллельного резонансного двухполюсника

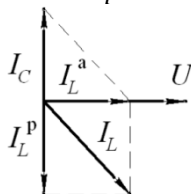


Рис. 8.2. Векторная диаграмма параллельного резонансного двухполюсника

Задание. Изучить схему подключения исследуемого двухполюсника. Провести необходимые измерения параметров исследуемого резонансного двухполюсника. На основании полученных параметров провести необходимые расчеты характеристик двухполюсника и построить его векторные диаграммы (до резонанса, при наступлении резонанса и после резонанса).

Порядок выполнения работы.

1) Собрать электрическую цепь для экспериментального определения параметров катушки индуктивности согласно рисунку 8.3.

2) Экспериментально определить параметры катушки индуктивности L_2 . Для этого переключатель индуктивности установить в позицию «2». **Входное напряжение установить равным 60 В.** Провести необходимые измерения, а полученные данные занести в таблицу 8.1.

3) Провести необходимые расчеты параметров катушки по формулам (8.7). Полученные данные занести в таблицу 8.1.

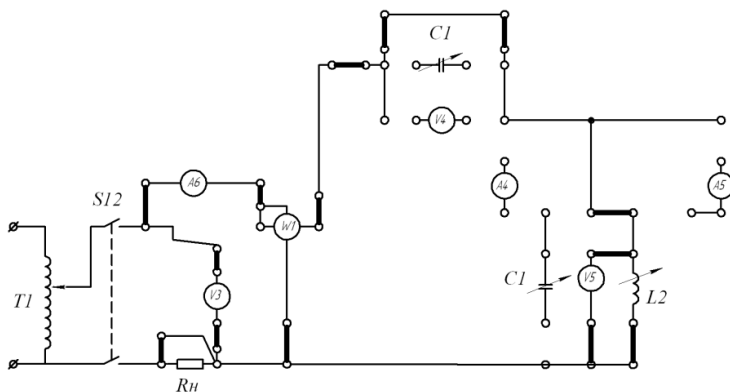


Рис. 8.3. Схема подключения исследуемой цепи для определения параметров катушки индуктивности

$$\left. \begin{aligned} R_K &= \frac{P_K}{I_K}, \text{ Ом}, \quad Z_K = \frac{U_K}{I_K}, \text{ Ом}, \\ X_K &= \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \text{ Ом}, \quad L_K = \frac{X_K}{2\pi f}, \text{ Гн}. \end{aligned} \right\} \quad (8.7)$$

Таблица 8.1

Результаты определения параметров катушки индуктивности

Установлено	Измерено			Рассчитано			
U , В	U_K , В	I_K , А	P_K , Вт	Z_K , Ом	R_K , Ом	X_K , Ом	L_K , Гн
60							

4) Для получения резонанса токов расчетным путем вычислить величину емкости батареи конденсаторов по формуле (8.8), полученное значение занести в таблицу 8.2 (исходные данные для расчета взять из таблицы 8.1).

$$C_1 = \frac{L_K \cdot 10^6}{R_K^2 + 4\pi^2 f^2 L_K^2}, \text{ мкФ.} \quad (8.8)$$

5) Собрать электрическую цепь параллельного резонансного контура, согласно рисунку 8.4.

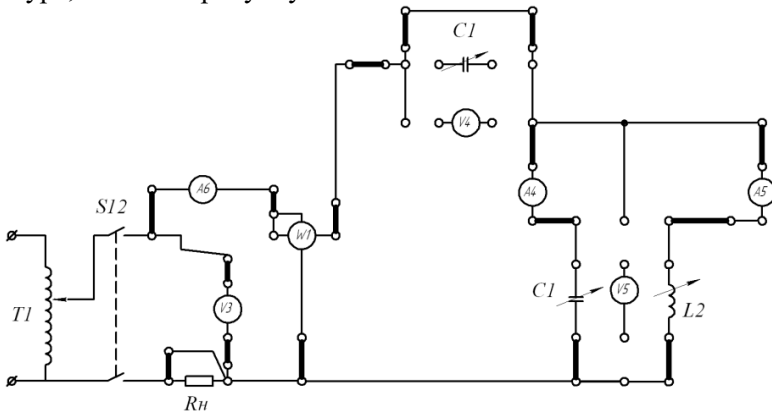


Рис. 8.4. Схема подключения цепи для исследования явления резонанса токов

6) Исследовать явление резонанса токов. Напряжение на входе цепи регулируется ЛАТРом так, чтобы **общий ток в цепи был равен 0,15 А** (по амперметру А6). Тумблерами батареи конденсаторов C_1 установить величину емкости равную расчетной « C_1 ». С помощью ЛАТРа **подкорректировать ток до величины 0,15 А**. Показания приборов занести в таблицу 8.2.

7) Установить величину емкости на 50% ниже « C_1 » и провести измерения. Затем установить величину емкости на 50% выше

« C_1 » и повторить измерения. Полученные данные занести в таблицу 8.2. Выполнить необходимые расчеты параметров исследуемой параллельной цепи.

Таблица 8.2

Результаты исследования явления резонанса напряжений

Установлено		Измерено					Рассчитано						
Емкость, C_1 , мкФ	I , А	U , В	I_c , А	I_L , А	P , Вт	Z , Ом	R , Ом	$\cos \varphi$	g_L , сим	X_C , Ом	X_L , Ом	b_C , сим	b_L , сим
C_1		0,15											
- 50% C_1													
+ 50% C_1													

8) Рассчитать величины « \underline{Y} , \underline{Z} , \dot{I} » в комплексном виде, в показательной или алгебраической форме записи.

9) Построить векторные диаграммы токов и напряжений исследуемого двухполюсника для всех исследованных случаев, проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Дать общее определение резонанса любой системы.
2. Применяется ли в реальных электрических цепях резонанс токов?
3. Каким образом осуществляется компенсация реактивной мощности?
4. Какое значение принимает ток (высокое или низкое) в цепи, при резонансе токов?
5. Возрастает или убывает входное сопротивление параллельного контура электрической цепи при вхождении в режим резонанса токов?

Лабораторная работа № 9

Исследование режимов работы и характеристик линии электропередачи синусоидального тока

Цель работы: изучить характеристики линии электропередачи (ЛЭП) синусоидального тока и исследовать влияние параметров нагрузки на режимы работы ЛЭП.

Линия электропередачи предназначена для транспортирования электрической энергии на необходимое расстояние с необходимым уровнем мощности.

Линия электропередачи (ЛЭП) содержит такие основные элементы, как опоры, изоляторы и подвешенные на них (или крепящиеся к ним) провода, арматуру. Так как провода ЛЭП расположены относительно близко друг к другу и параллельно между собой, то такая конструкция представляет собой сложную систему, обладающую определенной емкостью и индуктивностью.

Вследствие этого электрическое сопротивление содержит кроме активных составляющих еще и реактивные составляющие (емкостную и индуктивную). То есть реальное сопротивление линии больше активного сопротивления ее проводов. Наличие емкости и индуктивности приводит так же к возникновению переходных процессов и искажению синусоидальности тока. Эквивалентная схема замещения ЛЭП низкого напряжения с активно-индуктивной нагрузкой представлена на рисунке 9.1.

Активное сопротивление проводов линии зависит от удельного сопротивления ρ материала, из которого изготовлен провод, его температуры t и величины поперечного сечения провода F . Сопротивление провода ЛЭП составит

$$R = \rho \frac{l}{F}, \text{ Ом}, \quad (9.1)$$

где l – длина провода ЛЭП, м.

Удельное сопротивление ρ зависит от температуры провода и постоянно меняется, вследствие изменения температуры окружающей среды. Поэтому необходима корректировка величины удельного сопротивления провода от температуры:

$$\rho = \rho_{20}(1 + 0,004(t - 20)), \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}, \quad (9.2)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление провода при его температуре равной 20°C , $\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$.

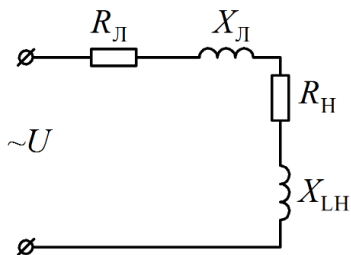


Рис. 9.1. Схема замещения ЛЭП с нагрузкой

Индуктивное сопротивление одной фазы ЛЭП определяется противодействием ЭДС самоиндукции и влиянием ЭДС взаимной индукции соседних фаз. Взаимоиндукция частично компенсирует ЭДС самоиндукции, и, как следствие, результирующее индуктивное сопротивление фазы снижается

$$X = X_L - X_M, \text{ Ом}, \quad (9.3)$$

где X_L и X_M – индуктивные сопротивления само- и взаимной индукции соответственно, Ом.

С увеличением расстояния между фазами взаимная индуктивность ослабевает, т.е. $X_M \rightarrow 0$. Поэтому $X \rightarrow X_L$.

Линии электропередачи имеют, как правило, большую протяженность, поэтому их параметры определяют в погонном выражении (на один километр длины линии). Так погонное индуктивное сопротивление определяется по общей зависимости:

$$x_0 = \omega \left(4,6 \lg \frac{2D_{\text{ср}}}{d} + 0,5 \mu \right) 10^{-4}, \text{ Ом/км}, \quad (9.4)$$

где $\omega = 2\pi f = 314$ – круговая частота, с^{-1} ;

$D_{\text{ср}}$ – среднегеометрическое расстояние между фазами, мм;

d – диаметр провода, мм;

μ – относительная магнитная проницаемость материала провода.

Для проводов из цветных металлов (медь, алюминий) $\mu \approx 1$, поэтому формула (9.4) примет вид

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{2D_{\text{ср}}}{d} + 0,0156, \text{ Ом/км.} \quad (9.5)$$

В конце ЛЭП к ней подключена какая-либо нагрузка. Поэтому, требуемыми параметрами для расчета ЛЭП являются величина напряжения и мощности на нагрузке соответственно $U_{\text{н}}$, $P_{\text{н}}$, а также мощность и напряжение в начале линии, соответственно U и P . Ток на нагрузке равен I .

Параметры нагрузки определяются любым известным расчетным методом.

Получив параметры нагрузки необходимо определить ее коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{н}}$. В том случае если он окажется менее 0,7, его необходимо повысить до некоторого требуемого значения $\cos \varphi_{\text{тр}}$, подключив батарею конденсаторов.

В этом случае суммарный коэффициент мощности цепи повысится (рис. 9.2).

Расчет величины необходимой емкости конденсаторов производится следующим образом.

Если нагрузка имеет некоторую активно-индуктивную мощность P и Q_L , то ее необходимо компенсировать емкостной мощностью Q_C , которая определяется по зависимости:

$$Q_C = \frac{U_{\text{н}}^2}{X_C^2} X_C = \frac{U_{\text{н}}^2}{X_C} = U_{\text{н}}^2 \omega C, \text{ вар.} \quad (9.6)$$

В свою очередь коэффициенты активной и реактивной мощностей соответственно равны:

$$\cos \varphi_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{S_{\text{н}}}, \quad \sin \varphi_{\text{н}} = \frac{Q_{\text{н}}}{S_{\text{н}}}, \quad (9.7)$$

тогда составим выражение тангенса угла сдвига по фазе:

$$\text{tg} \varphi_{\text{н}} = \frac{\sin \varphi_{\text{н}}}{\cos \varphi_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{н}}}{P_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н}}^2}{\omega L P_{\text{н}}}. \quad (9.8)$$

Если необходимо повысить коэффициент мощности до некоторой требуемой величины, то необходимо рассчитать параметры батареи конденсаторов.

Тангенс требуемого угла сдвига по фазе определяется по выражению:

$$\operatorname{tg} \varphi_{\text{ТР}} = \frac{Q_{\text{H}} - Q_{\text{C}}}{P_{\text{H}}} = \frac{Q_{\text{H}}}{P_{\text{H}}} - \frac{Q_{\text{C}}}{P_{\text{H}}} = \operatorname{tg} \varphi_{\text{H}} - \frac{Q_{\text{C}}}{P_{\text{H}}}, \quad (9.9)$$

отсюда получаем величину необходимой емкостной мощности батареи конденсаторов:

$$Q_{\text{C}} = P_{\text{H}}(\operatorname{tg} \varphi_{\text{H}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{ТР}}), \text{ вар.} \quad (9.10)$$

С учетом выражения (9.6) находим величину емкости батареи конденсаторов:

$$C = \frac{P_{\text{H}}}{\omega U_{\text{H}}^2} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{H}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{ТР}}), \text{ Ф.} \quad (9.11)$$

Для удобства расчетов необходимо перейти от тангенсов к коэффициенту мощности. Получим

$$C = \frac{P_{\text{H}}}{\omega U_{\text{H}}^2} \left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{H}}}}{\cos \varphi_{\text{H}}} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{ТР}}}}{\cos \varphi_{\text{ТР}}} \right) \cdot 10^6, \text{ мкФ.} \quad (9.12)$$

Суть процесса повышения коэффициента мощности поясняется векторной диаграммой (рис. 9.2). Падение напряжения на емкостном элементе U_{C} противоположно по направлению падению напряжения на индуктивности нагрузки U_{L} и частично его компенсирует.

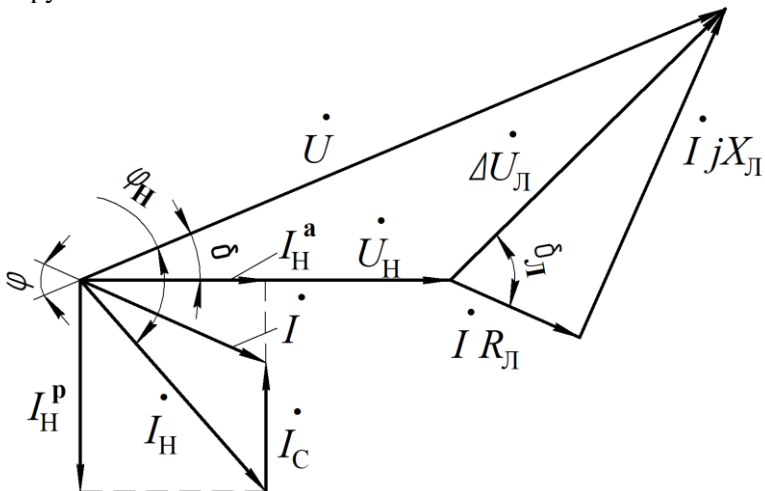


Рис. 9.2. Векторная диаграмма напряжений ЛЭП под нагрузкой

В результате этого величина напряжения в начале линии U снижается, угол φ также уменьшается, а коэффициент мощности $\cos \varphi$ повышается.

Опасным моментом в процессе повышения коэффициента мощности является создание резонанса токов между индуктивным потребителем и емкостным элементом, искусственно подключенным к потребителю. В этом случае реактивные токи, проходящие через емкостные элементы, возрастают, что может привести к их перегреву.

Расчет значения емкости C , при котором в цепи наступит резонанс токов (при условии равенства их реактивных проводимостей $b_L = b_C$) производится по зависимости

$$C = \frac{L_H \cdot 10^6}{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}, \text{ мкФ.} \quad (9.13)$$

Преобладающим характером собственного сопротивления ЛЭП является индуктивное сопротивление. В том случае если емкость конденсаторов окажется выше резонансной емкости, возникает ситуация близкая к резонансу напряжений между емкостью, присоединенной к нагрузке, и индуктивностью самой ЛЭП.

В этом случае реактивное сопротивление нагрузки и ЛЭП резко снижается, а ток в проводах ЛЭП резко возрастает, что негативно сказывается на ее эксплуатационных характеристиках.

В процессе передачи электроэнергии ее часть тратится на тепловые потери в активных сопротивлениях проводов линии, а также индуктивное сопротивление току линии создает некоторую величину падения напряжения на длине линии, в итоге передаваемая мощность снижается. Величина снижения передаваемой мощности характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД) ЛЭП.

КПД линии представляет собой отношение активной мощности в конце ЛЭП к активной мощности в начале ЛЭП. Таким образом получаем

$$\eta = \frac{P_H}{P}, \quad (9.14)$$

где P – мощность в начале линии, Вт.

Активная мощность в конце линии составляет

$$P_H = S_H \cos \varphi_H = U_H I \cos \varphi_H, \text{ Вт.} \quad (9.15)$$

Коэффициент мощности нагрузки, в общем случае, можно определить по зависимости (9.16).

Задание. Изучить схему подключения исследуемой ЛЭП с нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести необходимые расчеты характеристик ЛЭП и нагрузки, а далее построить их совместную векторную диаграмму (в режиме компенсации реактивной мощности).

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему (рис. 9.3) для определения параметров индуктивно-активной нагрузки.

ВНИМАНИЕ! Тумблер SA4 должен находиться в выключенном положении на протяжении всего времени выполнения работы (рычажок – вниз)!

2) Включить лабораторный стенд и испытываемую схему (SA3 в положение вверх). Установить напряжение нагрузки $U_H = 110$ В. Провести замеры параметров нагрузки. Отключить стенд. Полученные значения занести в таблицу 9.1.

3) Рассчитать значения сопротивлений нагрузки X_{LH} , R_H , а также коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_H$ и индуктивность по формулам (9.16). Полученные данные занести в таблицу 9.1.

$$\left. \begin{aligned} R_H &= \frac{P_H}{I_H}, \text{ Ом}, \quad Z_H = \frac{U_H}{I_H}, \text{ Ом}, \quad \cos \varphi_H = \frac{R_H}{Z_H} \\ X_{LH} &= \sqrt{Z_H^2 - R_H^2}, \text{ Ом}, \quad L_H = \frac{X_{LH}}{2\pi f}, \text{ Гн}. \end{aligned} \right\} \quad (9.16)$$

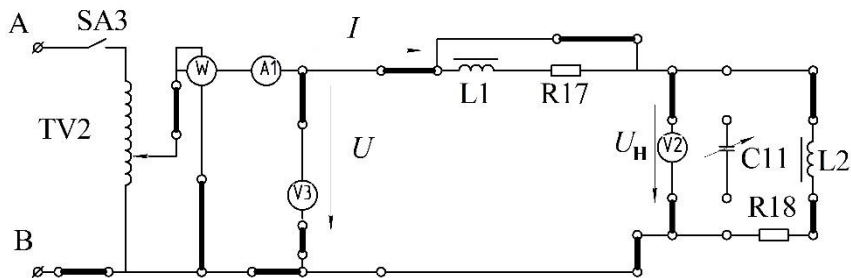


Рис. 9.3. Схема подключения нагрузки для определения ее параметров

4) Определить расчетным путем значение емкости конденсатора $C = C_{11}$ для повышения коэффициента мощности нагрузки до значения $\cos \varphi_{гр}$, заданного преподавателем. Полученные в расчете значения занести в таблицу 9.1.

Таблица 9.1

*Результаты исследования характеристик
активно-индуктивной нагрузки*

Исходные данные		Измерено		Рассчитано					
$U_H, В$	$\cos \varphi_{гр}$	$I_H, А$	$P_H, Вт$	$R_H, Ом$	$Z_H, Ом$	$X_{LH}, Ом$	$L_H, Гн$	$\cos \varphi_H$	$C, мкФ$
110									

Таблица 9.2

Результаты исследования характеристик ЛЭП

Исходные данные		Измерено		Рассчитано			
$U, В$	$I_L, А$	$P_L, Вт$	$R_L, Ом$	$Z_L, Ом$	$X_{LЛ}, Ом$	$L_L, Гн$	$\cos \varphi_L$
110							

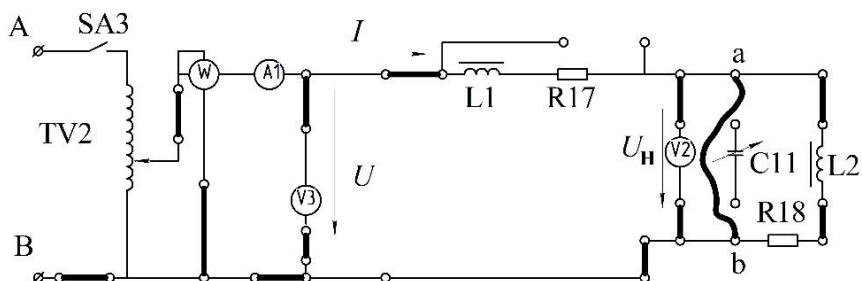


Рис. 9.4. Схема для определения параметров ЛЭП

5) Собрать схему (рис. 9.4) для определения параметров линии электропередачи.

6) Включить лабораторный стенд и испытываемую схему (SA3 в положение вверх). Установить напряжение на входе цепи $U = 50 В$. Провести замеры параметров линии. Отключить стенд. Полученные значения занести в таблицу 9.2.

7) Рассчитать значения сопротивлений линии $X_{LЛ}$, R_L , а также коэффициент мощности ЛЭП $\cos \varphi_L$ и индуктивность по формулам (9.16) (вместо индекса «н» необходимо подставить индекс «л»). Полученные данные занести в таблицу 9.2.

8) Собрать схему подключения активно-индуктивно-емкостной нагрузки через индуктивно-активную ЛЭП (рис. 9.5).

9) Включить лабораторный стенд. Изменяя емкость C_{11} и поддерживая $U_H = 110 \text{ В}$, провести измерения необходимых параметров цепи. Полученные данные занести в таблицу 9.3.

10) Провести необходимые вычисления и заполнить таблицу 9.3 (параметр P_H берется из таблицы 9.1).

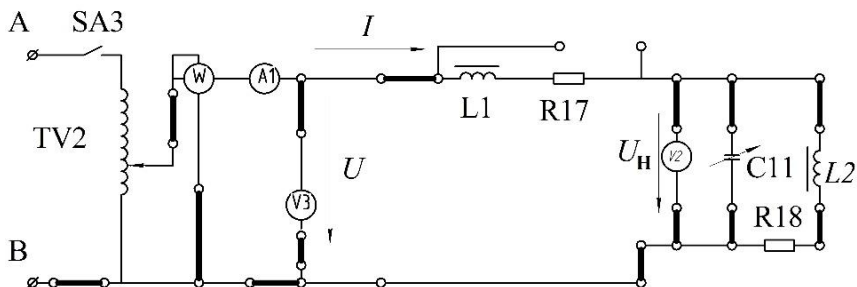


Рис. 9.5. Схема подключения ЛЭП с активно-индуктивной нагрузкой и батареей конденсаторов

Таблица 9.3

Результаты исследования характеристик ЛЭП
с активно-индуктивной нагрузкой

Установлено							
C , мкФ	5	10	15	20	25	30	35
U_H , В	110						
Измерено							
I , А							
U , В							
P , Вт							
Рассчитано							
$P_H = I^2 \cdot R_H$, Вт							
$S_H = U_H \cdot I$, ВА							
$\cos \varphi_H = P_H / S_H$							
$S = U \cdot I$, ВА							
$\cos \varphi = P / S$							
$\eta = P_H / P$							

11) Построить зависимости $I = f(C)$, $U = f(C)$, $P = f(C)$, $\cos \varphi = f(C)$, $\cos \varphi_H = f(C)$, $\eta = f(C)$ (все в одной координатной системе).

12) Построить векторную диаграмму ЛЭП с активно-индуктивной нагрузкой, аналогичную диаграмме приведенной на рисунке 9.2.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислить виды мощностей для цепи переменного тока.
2. Вследствие каких процессов в ЛЭП образуются реактивные токи?
3. Дать определение понятию «коэффициент мощности $\cos \varphi$ ».
4. Дать определение понятию «КПД ЛЭП».
5. Каким способом повысить коэффициент мощности $\cos \varphi$, если нагрузка имеет активно-емкостный характер?

Лабораторная работа №10

Исследование характеристик ЛЭЦ трехфазного тока, соединенной по схеме «звезда» без нулевого провода

Цель работы: исследовать характеристики и режимы работы цепи трехфазного тока при соединении потребителей по схеме «звезда» без нулевого провода при симметричной и несимметричной нагрузках фаз.

Напряжение между началом и концом фазы называется фазным U_{ϕ} . Напряжение между линейными проводами называется линейным $U_{\text{л}}$, например, $U_{\text{AB}}, U_{\text{BC}}, U_{\text{CA}}$, (на потребителе).

При соединении нагрузки по схеме «звезда», линейные и фазные токи равны $I_{\text{л}} = I_{\phi}$, а линейные напряжения представляют собой геометрическую разность фазных напряжений. В комплексной форме выражения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{\text{AB}} &= \dot{U}_{\text{A}} - \dot{U}_{\text{B}}, \\ \dot{U}_{\text{BC}} &= \dot{U}_{\text{B}} - \dot{U}_{\text{C}}, \\ \dot{U}_{\text{CA}} &= \dot{U}_{\text{C}} - \dot{U}_{\text{A}}. \end{aligned} \right\} \quad (10.1)$$

Если при симметричной системе ЭДС генератора, ЭДС в одной фазе (например A) равна \dot{E}_{A} , то

$$\dot{E}_{\text{B}} = \alpha^2 \dot{E}_{\text{A}}, \text{ B}; \quad \dot{E}_{\text{C}} = \alpha \dot{E}_{\text{A}}, \text{ B}, \quad (10.2)$$

где α – оператор трехфазной системы.

Оператор трехфазной системы является комплексным числом, по модулю равным единице.

$$\alpha = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (10.3)$$

Умножение комплексного числа на оператор α , поворачивает вектор данного комплексного числа на угол 120° в положительном направлении (против часовой стрелки). Поэтому данный оператор называют также оператором поворота.

Двойной поворот является, по своей сути, поворотом в отрицательном направлении

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (10.4)$$

Если система симметрична, то ток в нейтральном проводе равен нулю $I_N = 0$. Нейтральный провод можно устранить.

Линейное напряжение при симметричной нагрузке:

$$\dot{U}_L = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_\phi \cdot e^{j30^\circ}. \quad (10.5)$$

В трехфазной системе без нейтрального провода при любой нагрузке справедливо равенство: $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$.

При несимметричной нагрузке между нейтральной точкой генератора N и нейтральной точкой приемника n появляется напряжение

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C}, \quad (10.6)$$

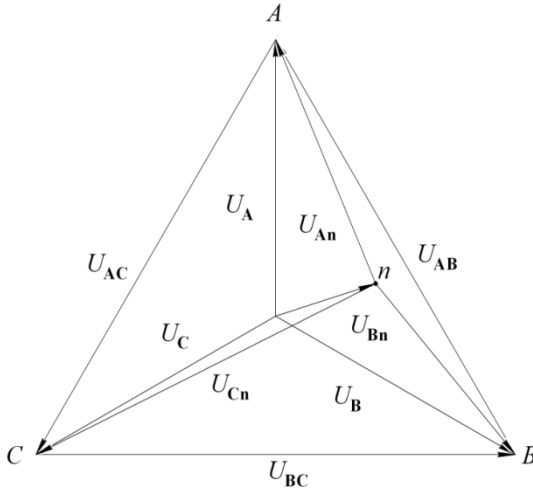


Рис. 10.1. Векторная диаграмма трехфазной системы

Фазные напряжения U_{An} , U_{Bn} , U_{Cn} , не равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на разные углы. Напряжения на фазах приемника равны, соответственно

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn}, \\ \dot{U}_{Bn} &= \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn}, \\ \dot{U}_{Cn} &= \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn}. \end{aligned} \right\} \quad (10.7)$$

Токи в фазах приемника:

$$\dot{I}_A = \underline{Y}_A \cdot \dot{U}_{An}; \quad \dot{I}_B = \underline{Y}_B \cdot \dot{U}_{Bn}; \quad \dot{I}_C = \underline{Y}_C \cdot \dot{U}_{Cn}. \quad (10.8)$$

При отсутствии нейтрального провода в выражении (10.6) необходимо принять $Y_n = 0$.

Задание. Изучить схему подключения исследуемой ЛЭЦ трехфазного тока с различными видами нагрузки. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести необходимые расчеты характеристик исследуемой цепи, а далее построить ее векторную диаграмму (в режиме несимметричной RLC).

Порядок выполнения работы.

1) По схеме, приведенной на рисунке 10.2, собрать электрическую цепь с нагрузкой, соединенной по схеме «звезда» без нейтрального провода.

2) Включить лабораторный стенд. Включить тумблер $S13$. Провести измерения параметров работы цепи по приборам стенда и занести полученные показания в таблицу 10.1.

3) Установить неравномерную активную нагрузку. Для этого убрать переключку «1». Выполнить действия аналогичные пункту 2.

4) Создать неравномерную несимметричную нагрузку убрав переключку «2» и «3». Провести действия согласно пункту 2.

5) Отсоединить одну из фазных переключек (ведущих к тумблеру $S13$). Провести действия согласно пункту 2.

6) Провести опыт короткого замыкания фазы «А». Напряжение между нулевыми точками U_{Nn} измерить тестером. Результаты измерений занести в таблицу 10.1.

7) По данным таблицы 10.1 построить векторные диаграммы напряжений и токов в различных режимах работы цепи.

Таблица 10.1

Результаты эксперимента по определению параметров и характеристик ЛЭЦСТ собранной по схеме «звезда» с нулевым проводом при различных видах нагрузки

№ П/п	Измерено							Вычислено				Характер нагрузки	
	$U_{л. В}$	$U_{л. А}$	$U_{В. В}$	$U_{С. В}$	$I_{А. А}$	$I_{В. А}$	$I_{С. А}$	$U_{Nн. В}$	Р, Вт	S, ВА	$\cos \varphi$		$\frac{U_{л. В}}{U_{А}}$
1.													Равномерная R
2.													Неравномерная R
3.													Неравномерная R, L, C
4.													Обрыв фазы
5.													Короткое замыкание

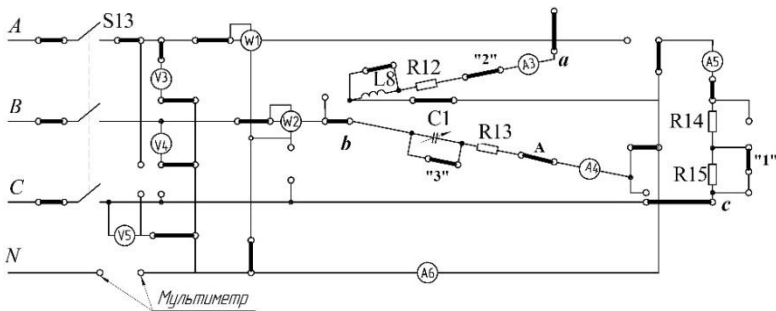


Рис. 10.2. Схема подключения лабораторной установки

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите способы соединения фаз источника ЭДС и нагрузки в трехфазной цепи.
2. Начертите векторные диаграммы симметричных систем напряжений прямой и обратной последовательностей.
3. Поясните назначение нейтрального провода при несимметричной нагрузке.
4. Каковы соотношения между фазными и линейными напряжениями при соединении потребителей по схеме «звезда» при симметричной и несимметричной нагрузках?
5. Как аналитически определить напряжение между нейтральными точками генератора и потребителя?

Лабораторная работа №11

Исследование характеристик ЛЭЦ трехфазного тока, соединенной по схеме «звезда» с нулевым проводом

Цель работы. Исследовать характеристики и режимов работы цепи трехфазного тока при соединении нагрузки по схеме «звезда» с нулевым проводом при симметричной и несимметричной нагрузках фаз.

Если сопротивление нулевого провода в схеме (рис. 11.1) незначительное, то потенциал точки n практически равен потенциалу точки N . Фактически они представляют собой одну общую точку. При этом в схеме можно выделить три независимых (в случае симметричной нагрузки) контура, по которым проходят линейные токи:

$$I_A = \frac{\dot{E}_A}{Z_A}, \quad I_B = \frac{\dot{E}_B}{Z_B}, \quad I_C = \frac{\dot{E}_C}{Z_C}, \quad \text{А.} \quad (11.1)$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа, ток в нулевом проводе равен геометрической сумме токов линейных проводов (они же фазовые токи, в данном случае)

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (11.2)$$

Если нагрузка является *равномерной*, то есть сопротивления фаз равны, как по модулю, так и по углу сдвига по фазе

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C, \quad (11.3)$$

то ток нулевого провода будет равен нулю. Если сопротивление нагрузки не равномерное, то ток нулевого провода не равен нулю и контуры будут являться смежными, через ветвь $N-n$. В этом случае расчет цепи удобнее проводить методом узловых потенциалов.

Напряжение между началом и концом фазы называется фазным U_ϕ . Напряжение между линейными проводами называются линейным U_L . При соединении нагрузки по схеме «звезда», фазные и линейные токи равны $I_L = I_\phi$, а линейные и фазные напряжения различаются в корень из трех раз

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \right\} \quad (11.4)$$

Для удобства расчета трехфазных систем введено понятие оператора трехфазной системы альфа « α ».

Например, если при симметричной системе ЭДС генератора, ЭДС в одной фазе (например фазе А) равна \dot{E}_A , то

$$\dot{E}_B = \alpha^2 \dot{E}_A, \text{ В}; \quad \dot{E}_C = \alpha \dot{E}_A, \text{ В}, \quad (11.5)$$

где α – оператор трехфазной системы.

Оператор трехфазной системы является комплексным числом, по модулю равным единице.

$$\alpha = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\sqrt{\frac{3}{2}}. \quad (11.6)$$

Умножение комплексного числа на оператор α , поворачивает вектор данного комплексного числа на угол 120° в положительном направлении (против часовой стрелки). Поэтому данный оператор называют также оператором поворота.

Двойной поворот является, по своей сути, поворотом в отрицательном направлении

$$\alpha^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (11.7)$$

Таким образом, три вектора -1 , α и α^2 – образуют симметричную систему векторов (трехфазную систему). Геометрическая сумма данных векторов равна нулю:

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0. \quad (11.8)$$

Линейное напряжение при симметричной нагрузке больше фазного в корень из трех раз:

$$U_L = \sqrt{3} U_\Phi, \quad (11.9)$$

Кроме того, линейное напряжение, при симметричной нагрузке, опережает фазное на 30 градусов, поэтому в комплексной форме выражение (11.9) будет иметь вид:

$$\dot{U}_L = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_\phi \cdot e^{j30^\circ}. \quad (11.10)$$

При несимметричной нагрузке между нейтральной точкой генератора N и нейтральной точкой приемника n появляется напряжение (вследствие наличия сопротивления нейтрального провода):

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_A + \dot{E}_B \underline{Y}_B + \dot{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_{Nn}}, \text{ В.} \quad (11.11)$$

Однако при любой нагрузке справедливо равенство:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = 0 \text{ В.} \quad (11.12)$$

При отсутствии нейтрального провода в выражении (10.11) необходимо проводимость нейтрального провода принять $Y_n = 0$.

Фазные напряжения U_{An} , U_{Bn} , U_{Cn} , при несимметричной нагрузке, не равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на разные углы. Напряжения на фазах приемника определяются из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \dot{E}_A - \dot{U}_{Nn}, \text{ В,} \\ \dot{U}_{Bn} &= \dot{E}_B - \dot{U}_{Nn}, \text{ В,} \\ \dot{U}_{Cn} &= \dot{E}_C - \dot{U}_{Nn}, \text{ В.} \end{aligned} \right\} \quad (11.13)$$

Токи в фазах приемника составляют:

$$\dot{I}_A = \underline{Y}_A \cdot \dot{U}_{An}, \text{ А,} \quad \dot{I}_B = \underline{Y}_B \cdot \dot{U}_{Bn}, \text{ А,} \quad \dot{I}_C = \underline{Y}_C \cdot \dot{U}_{Cn}, \text{ А.} \quad (11.14)$$

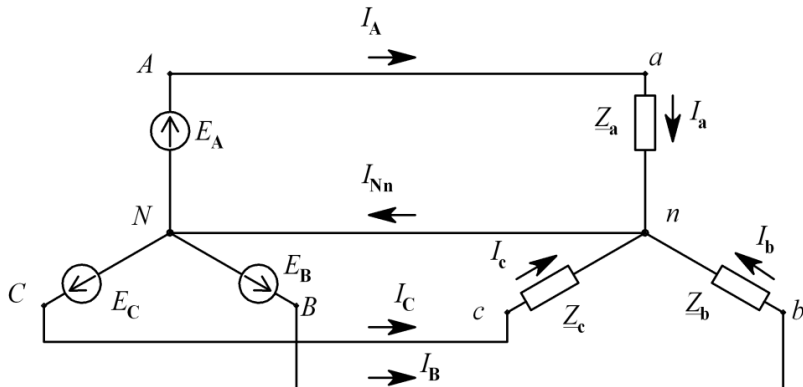


Рис. 11.1. Схема «звезда» с нулевым проводом для соединения трехфазной электрической цепи

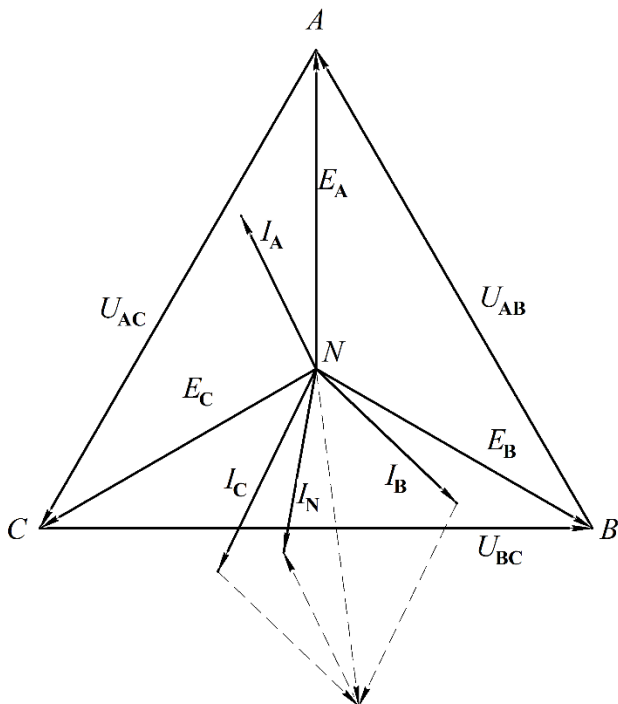


Рис. 11.2. Векторная диаграмма трехфазной системы при неравномерной нагрузке

Задание. Изучить схему подключения исследуемой ЛЭЦ трехфазного тока с различными видами нагрузки. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемой цепи, а далее построить ее векторную диаграмму (в режиме несимметричной *RLC*).

Порядок выполнения работы.

1) По схеме, приведенной на рисунке 11.3, собрать электрическую цепь с нагрузкой, соединенной по схеме «звезда» с нейтральным проводом.

2) Включить лабораторный стенд (тумблером «Сеть»). Включить тумблер *S13*.

3) Провести измерения параметров работы цепи по приборам стенда и занести полученные показания в таблицу 11.1.

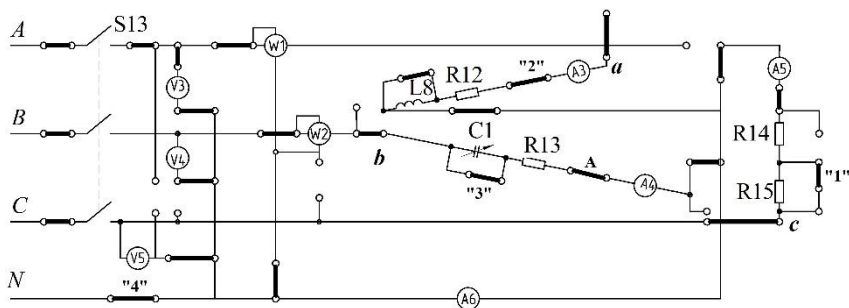


Рис. 11.3. Схема подключения лабораторной установки

4) Установить неравномерную активную нагрузку. Для этого убрать переключку «1». Выполнить действия аналогичные пункту 3.

5) Создать неравномерную несимметричную нагрузку убрав переключки «2» и «3». Величину емкости $C1$ установить по указанию преподавателя. Провести действия согласно пункту 3.

6) Отсоединить одну из фазных переключек (ведущих к тумблеру $S13$). Провести действия согласно пункту 3.

Таблица 11.1

Результаты эксперимента по определению характеристик ЛЭЦСТ, собранной по схеме «звезда» с нулевым проводом

№ п/п	Измерено							Вычислено				Характер нагрузки	
	$U_{л, В}$	$U_{А, В}$	$U_{В, В}$	$U_{С, В}$	$I_{А, А}$	$I_{В, А}$	$I_{С, А}$	$I_{N, А}$	$P, Вт$	$S, ВА$	$\cos \varphi$		$\frac{U_{л}}{U_{А}}$
1.													Равномерная R
2.													Неравномерная R
3.													Неравномерная R, L, C
4.													Обрыв фазы

7) Рассчитать коэффициент мощности трехфазной системы $\cos \varphi$, и усредненное значение угла сдвига по фазе φ :

$$\left. \begin{aligned}
 S &= U_A \cdot I_A + U_B \cdot I_B + U_C \cdot I_C, \text{ ВА}, \\
 \cos \varphi &= \frac{P}{S}, \\
 \varphi &= \arccos \varphi, \text{ град.}
 \end{aligned} \right\} (11.15)$$

8) По данным таблицы 11.1 построить векторные диаграммы напряжений и токов в различных режимах работы цепи.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите способы соединения фаз источника ЭДС и нагрузки в трехфазной цепи.
2. Начертите векторные диаграммы симметричных систем напряжений прямой и обратной последовательностей.
3. Поясните назначение нейтрального провода при несимметричной нагрузке.
4. Каковы соотношения между фазными и линейными напряжениями при соединении потребителей по схеме «звезда» при симметричной и несимметричной нагрузках?
5. Как аналитически определить напряжение между нейтральными точками генератора и потребителя?

Лабораторная работа №12

Исследование характеристик ЛЭЦ трехфазного тока, соединенной по схеме «треугольник»

Цель работы: исследовать характеристики и режимы работы цепи трехфазного тока при соединении нагрузки по схеме «треугольник» при симметричной и несимметричной нагрузках фаз.

При соединении нагрузки по схеме «треугольник» фазные и линейные напряжения одинаковы по модулю $U_{\Phi} = U_{\text{л}}$.

То есть на каждую фазу нагрузки приходится линейное напряжение (рис. 12.1). Поэтому фазные токи рассчитываются по закону Ома:

$$I_{\text{AB}} = \frac{\dot{U}_{\text{AB}}}{Z_{\text{AB}}}, \text{ А}, \quad I_{\text{BC}} = \frac{\dot{U}_{\text{BC}}}{Z_{\text{BC}}}, \text{ А}, \quad I_{\text{CA}} = \frac{\dot{U}_{\text{CA}}}{Z_{\text{CA}}}, \text{ А}. \quad (12.1)$$

Линейные токи определяется суммой фазных токов, сходящихся в тех же узлах, что и искомые соответствующие токи.

Таким образом, линейные токи определяются на основании первого закона Кирхгофа, а именно:

$$\begin{cases} I_{\text{A}} = I_{\text{AB}} - I_{\text{CA}}, \text{ А}, \\ I_{\text{B}} = I_{\text{BC}} - I_{\text{AB}}, \text{ А}, \\ I_{\text{C}} = I_{\text{CA}} - I_{\text{BC}}, \text{ А}. \end{cases} \quad (12.2)$$

При равномерной нагрузке фаз (рис. 12.1) модули линейных токов больше модулей фазных токов, а система симметрична (рис. 12.2). Например, при равномерной активной нагрузке, фазные токи совпадают по фазе с линейными напряжениями, а линейные токи опережают линейные напряжения на угол в 30° :

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\Phi}, \text{ А}. \quad (12.3)$$

В том случае, если нагрузка не симметрична ($\varphi_{\text{AB}} \neq \varphi_{\text{BC}} \neq \varphi_{\text{CA}}$),

то вся система трехфазных токов становится несимметричной (рис. 12.3). При обрыве одного из линейных проводов трехфазная система превращается в однофазную.

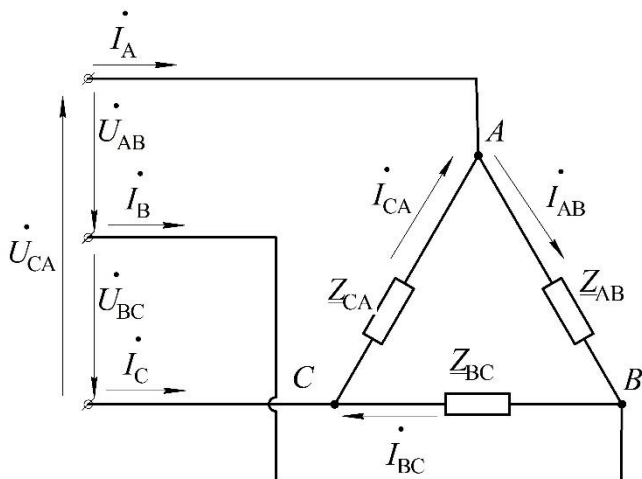


Рис. 12.1. Соединение нагрузки по схеме треугольник

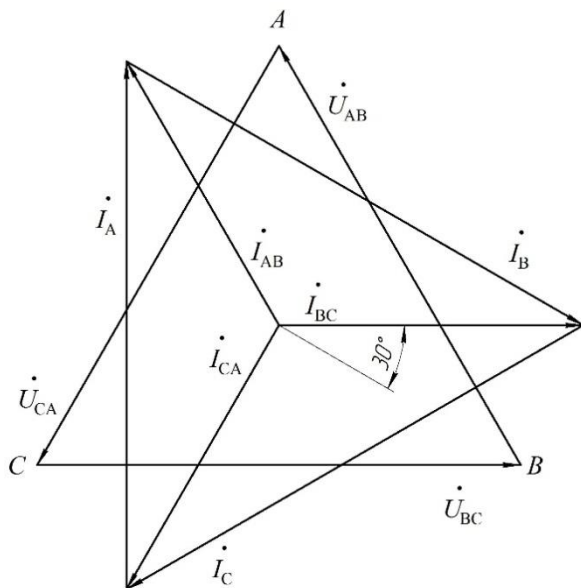


Рис. 12.2. Векторная диаграмма напряжений и токов при соединении

симметричной нагрузки по схеме «треугольник»

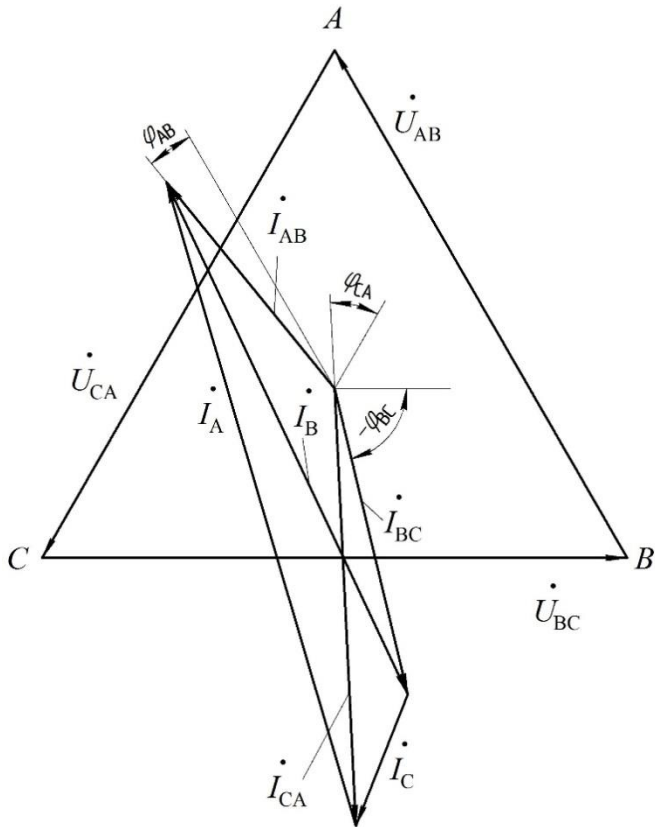


Рис. 12.3. Векторная диаграмма напряжений и токов при соединении несимметричной нагрузки по схеме «треугольник»

Короткое замыкание одной из фаз потребителя приводит к резкому увеличению фазного и линейных токов и является аварийным режимом.

Задание. Изучить схему подключения исследуемой ЛЭЦ трехфазного тока с различными видами нагрузки. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемой цепи, построить ее векторную диаграмму (в режиме несимметричной *RLC*).

Порядок выполнения работы.

1) По схеме (рис. 12.4) собрать электрическую цепь. Установить галетник $L2$ в поз. «2».

2) Включить лабораторный стенд тумблером «Сеть». Включить тумблер $S13$.

3) Провести измерение фазных токов, линейных напряжений и мощности по приборам стенда. Показания занести в таблицу 12.1.

4) Убрать переключку «1», создав тем самым неравномерную активную нагрузку. Выполнить действия аналогичные действиям, указанным в п. 3.

5) Убрать переключки «2» и «3», создав тем самым неравномерную несимметричную нагрузку типа RLC .

Выполнить действия аналогичные действиям, указанным в п. 3.

6) Убрать одну из линейных переключек, ведущих к тумблеру $S13$. Выполнить действия аналогичные действиям, указанным в п. 3.

7) Выполнить расчеты линейных токов по формулам (12.2). Показания занести в таблицу 12.1.

8) Выполнить расчеты полной мощности S трехфазной системы и коэффициента мощности $\cos \varphi$. Показания занести в таблицу 12.1.

9) Построить векторную диаграмму напряжений и токов для неравномерной нагрузки (третья строчка таблицы 12.1).

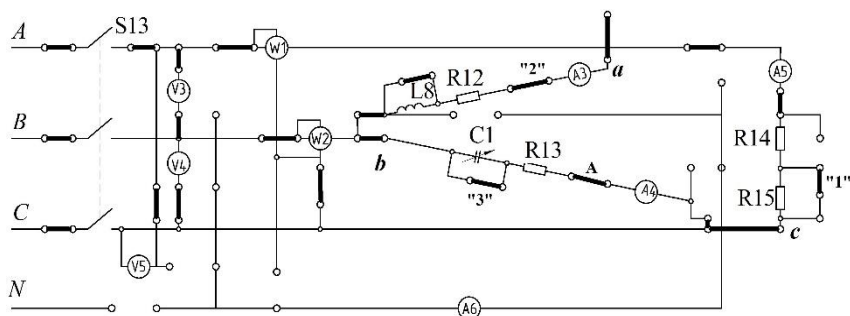


Рис. 12.4. Схема лабораторной установки

Таблица 12.1

Результаты исследования характеристик трехфазной системы с нагрузкой, соединенной по схеме «треугольник»

Характер нагрузки	Измерено						Вычислено					
	фазные токи			линейные напряжения			линейные токи			мощности		коэффициент
	$I_{AB},$ А	$I_{BC},$ А	$I_{CA},$ А	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P,$ Вт	$S,$ ВА	$\cos \varphi$
1. Равномерная R												
2. Неравномерная R												
3. Неравномерная R, L, C												
4. Обрыв фазы												

Вопросы для самоконтроля

1. Напишите соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при соединении потребителей треугольником.
2. Чем опасно короткое замыкание фазы при соединении нагрузки треугольником?
3. Какое влияние оказывает обрыв фазы источника на режим работы цепи?
4. Как распределяются токи в фазных и линейных проводах при обрыве фазного провода, линейного провода?
5. Оказывает ли влияние характер фазных нагрузок на величину и угол сдвига по фазе линейных токов?

Лабораторная работа №13

Исследование влияния характера фазных нагрузок на ток нулевого провода

Цель работы: исследовать влияние характера несимметричной нагрузки на ток нулевого провода и симметрию линейных токов.

При соединении нагрузки по схеме «звезда» линейные и фазные токи равны $I_L = I_\phi$, а линейные напряжения представляют собой геометрическую разность фазных напряжений. В комплексной форме выражения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \right\} \quad (13.1)$$

Для упрощения расчетов, часто применяют оператор трехфазной системы, например, если при симметричной системе ЭДС генератора, ЭДС в одной фазе (например A) равна \dot{E}_A , то

$$\dot{E}_B = \alpha^2 \dot{E}_A, \text{ B}; \quad \dot{E}_C = \alpha \dot{E}_A, \text{ B}, \quad (13.2)$$

где α – оператор трехфазной системы.

Оператор трехфазной системы является комплексным числом, по модулю равным единице.

Умножение комплексного числа на оператор α , поворачивает вектор данного комплексного числа на угол 120° в положительном направлении (против часовой стрелки).

Если система симметрична, то ток в нейтральном проводе равен нулю $I_N = 0$. Нейтральный провод можно устранить.

Линейное напряжение при симметричной нагрузке определяют по формуле

$$\dot{U}_L = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_\phi \cdot e^{j30^\circ}. \quad (13.3)$$

В трехфазной системе без нейтрального провода при любой нагрузке справедливо равенство: $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$.

В трехфазной системе с нейтральным проводом (рис. 13.1), в соответствии с первым законом Кирхгофа, ток в нулевом проводе равен геометрической сумме токов линейных проводов (они же фазовые токи, в данном случае)

$$i_0 = i_A + i_B + i_C. \quad (13.4)$$

Если нагрузка является *равномерной*, то есть сопротивления фаз равны как по модулю, так и по углу сдвига по фазе, то ток нулевого провода будет равен нулю. Если сопротивление нагрузки не равномерное, то ток нулевого провода не равен нулю и контуры будут являться смежными, через ветвь *N-n*. В этом случае расчет цепи удобнее проводить методом узловых потенциалов.

В данном случае, при любой нагрузке справедливо равенство:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = 0 \text{ В}. \quad (13.5)$$

Токи в фазах приемника определяются по формулам:

$$\dot{i}_A = \underline{Y}_A \cdot \dot{U}_{An}, \text{ А}; \quad \dot{i}_B = \underline{Y}_B \cdot \dot{U}_{Bn}, \text{ А}; \quad \dot{i}_C = \underline{Y}_C \cdot \dot{U}_{Cn}, \text{ А}. \quad (13.6)$$

При соединении нагрузки треугольником фазные и линейные напряжения одинаковы по модулю $U_\Phi = U_L$.

То есть на каждую фазу нагрузки приходится линейное напряжение. Поэтому фазные токи рассчитываются по закону Ома:

$$\dot{i}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \text{ А}; \quad \dot{i}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \text{ А}; \quad \dot{i}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \text{ А}. \quad (13.7)$$

Линейные токи определяется суммой фазных токов, сходящихся в тех же узлах, что и искомые соответствующие токи.

Основной проблемой при подключении несимметричной нагрузки по схеме «звезда» с нулевым проводом является несимметрия как линейных токов, так и существенная зависимость тока нулевого провода от несимметрии сопротивлений.

Высокие токи нулевого провода приводят к перегреву проводов и кабелей, а иногда и к прогоранию изоляции.

Рассмотрим несимметричную схему (рис. 13.2). Если в фазе *B* разместить индуктивность, а в фазе *C* емкость то получим векторную диаграмму, показанную на рисунке 13.3.

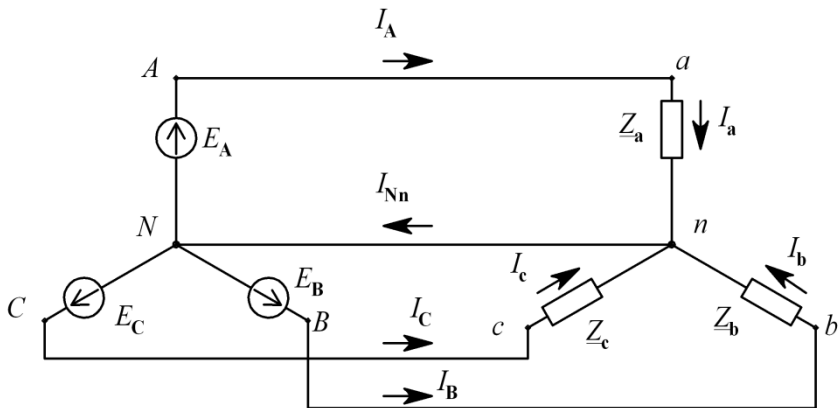


Рис. 13.1. Схема «звезда» с нулевым проводом

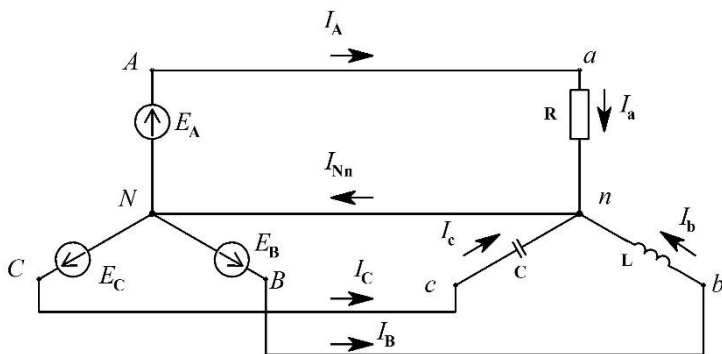


Рис.13.2. Схема «звезда» с нулевым проводом с нагрузкой типа RLC

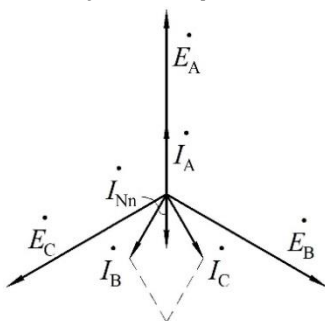


Рис. 13.3. Векторная диаграмма ЭДС и токов при нагрузке RLC

Если поменять местами элементы L и C в фазах приемника (рис. 13.4), то распределение токов существенно изменится.

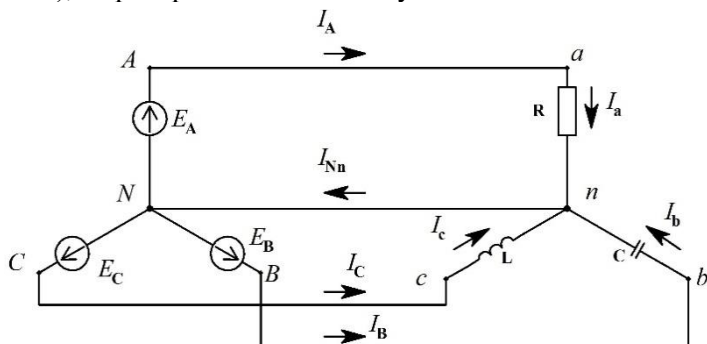


Рис. 13.4. Схема «звезда» с нулевым проводом с нагрузкой типа RCL

В этом случае ток в фазе B будет опережать ЭДС E_B , а в фазе C – отставать от E_C . Получим векторную диаграмму, изображенную на рисунке 13.5.

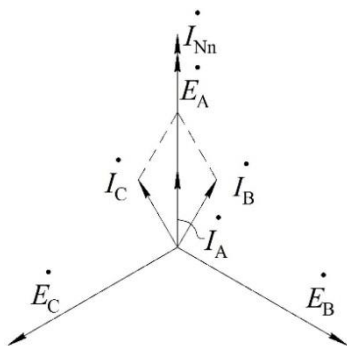


Рис. 13.5. Векторная диаграмма ЭДС и токов при нагрузке RCL

По диаграмме (рис. 13.5) видно, что ток нулевого провода почти в три раза больше любого из линейных токов.

Такое распределение токов приводит к выходу из строя электропроводки или кабеля.

Задание. Изучить схемы подключения исследуемых ЛЭЦ трехфазного тока с различными видами нагрузки. Провести необ-

ходимые измерения параметров исследуемых схем. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемых цепей, а далее построить их векторные диаграммы.

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать электрическую цепь согласно рисунку 13.6.
- 2) Включить стенд. Включить тумблер *S13*.
- 3) Провести измерения фазных напряжений, линейных токов и мощностей. Показания занести в таблицу 13.1. Отключить тумблер *S13*.
- 4) Собрать электрическую цепь согласно рисунку 13.7.
- 5) Включить стенд. Включить тумблер *S13*.
- 6) Провести измерения фазных напряжений, линейных токов и мощностей. Показания занести в таблицу 13.1. Отключить тумблер *S13*. Отключить стенд.

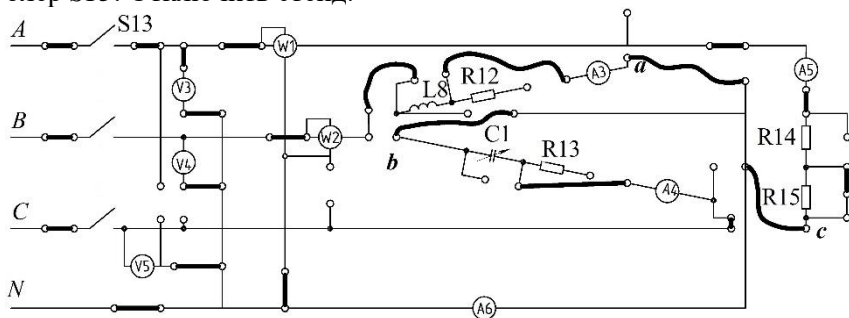


Рис. 13.6. Схема «звезда» с нулевым проводом и нагрузкой типа RLC

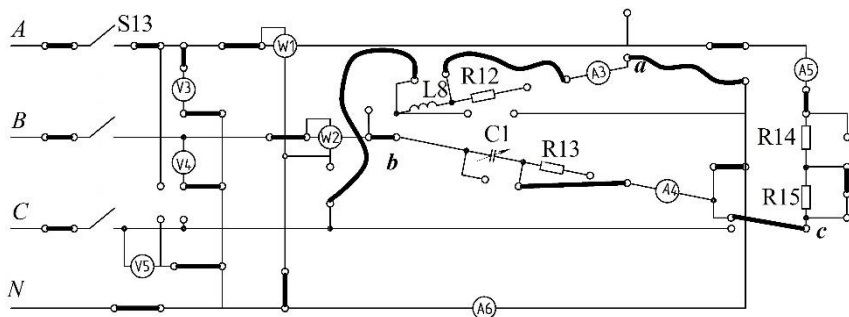


Рис. 13.7. Схема «звезда» с нулевым проводом и нагрузкой типа RCL

Таблица 13.1

Результаты измерений параметров несимметричной системы

Тип нагрузки	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_N, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$
RLC										
RCL										

Таблица 13.2

Результаты расчета параметров несимметричной системы

Тип нагрузки	$S_A, ВА$	$S_B, ВА$	$S_C, ВА$	$\cos \varphi_A$	$\cos \varphi_B$	$\cos \varphi_C$	$P_{\Sigma}, Вт$	$S_{\Sigma}, ВА$	$\cos \varphi_{\Sigma}$	$\underline{Z}_A, Ом$	$\underline{Z}_B, Ом$	$\underline{Z}_C, Ом$
RLC												
RCL												

Таблица 13.3

Результаты перевода в комплексную форму

$\dot{U}_A, В$	$\dot{U}_B, В$	$\dot{U}_C, В$	$\dot{I}_A, В$	$\dot{I}_B, В$	$\dot{I}_C, В$

7) Провести расчеты необходимых параметров в соответствии с данными таблиц 13.2 и 13.3.

8) Построить векторные диаграммы напряжений и токов для обоих исследованных случаев. Сделать выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. От каких параметров цепи зависит ток нулевого провода?
2. Каким образом необходимо распределить нагрузку по фазам, что бы ток нулевого провода имел минимальное значение?
3. Каким образом характер фазных нагрузок влияет на величины линейных токов при соединении нагрузки по схеме «треугольник»?
4. Возможно ли такое, чтобы при подключении нагрузки по схеме «треугольник» линейные токи были меньше фазных?
5. Возможно ли снизить ток нулевого провода, если невозможно изменить характер фазных нагрузок?

Лабораторная работа №14

Изучение методики анализа несимметричных систем методом симметричных составляющих

Цель работы: изучить методику анализа несимметричных систем и проанализировать, разложив полученные несимметричные системы трехфазных токов и напряжений, на три симметричные составляющие.

Несимметричные системы (напряжений или токов) представляют определенную сложность и неудобство при расчетах. Кроме того, представление несимметричных систем в комплексном виде не дает представление о сути процессов, происходящих при этом в самой трехфазной системе.

Поэтому, в соответствии с принципом наложения токов, несимметричные системы возможно «расслоить» на отдельные, симметричные составляющие.

Любую несимметричную систему трех напряжений, токов, магнитных потоков, возможно представить в виде трех систем: прямой, обратной и нулевой последовательностей чередования фаз.

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C \\ \dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C \end{pmatrix}, \quad (14.1)$$

Рассмотрим процедуру разложения на симметричные составляющие на примере напряжений.

Система прямой последовательности (рис. 14.1) состоит из трех векторов $\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}$, равных по модулю и сдвинутых по фазе относительно друг друга на угол 120° . Причем \dot{U}_{B1} отстает от \dot{U}_{A1} , а \dot{U}_{C1} отстает от \dot{U}_{B1} . С учетом оператора поворота α можно записать:

$$\dot{U}_{B1} = \alpha^2 \dot{U}_{A1}, \quad \text{В}, \quad (14.2)$$

$$\dot{U}_{C1} = \alpha \dot{U}_{A1}, \quad \text{В}. \quad (14.3)$$

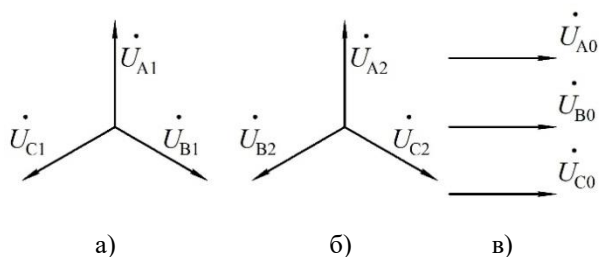


Рис. 14.1. Векторные диаграммы симметричных составляющих:
 а – прямой последовательности; б – обратной последовательности;
 в – нулевой последовательности

Система обратной последовательности (рис. 14.1, б) состоит из векторов $\dot{U}_{A2}, \dot{U}_{B2}, \dot{U}_{C2}$. Причем \dot{U}_{B2} опережает \dot{U}_{A2} , а \dot{U}_{C2} опережает \dot{U}_{B2} . С учетом оператора поворота α , можно записать:

$$\dot{U}_{B2} = \alpha \dot{U}_{A2}, \text{ В}, \quad (14.4)$$

$$\dot{U}_{C2} = \alpha^2 \dot{U}_{A2}, \text{ В}. \quad (14.5)$$

Система нулевой последовательности (рис. 14.1, в) представляет собой три вектора, одинаковые по модулю и совпадающие по фазе:

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_{B0} = \dot{U}_{C0}, \text{ В}. \quad (14.6)$$

На основании полученного, исходную систему векторов $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ можно представить в виде суммы соответствующих векторов симметричных систем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2}, \text{ В}, \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B0} + \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2}, \text{ В}, \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C0} + \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2}, \text{ В}. \end{aligned} \right\} \quad (14.7)$$

В уравнения (14.7) необходимо подставить величины, полученные по выражениям (14.2-14.5):

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2}, \text{ В}, \quad (14.8)$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B0} + \alpha^2 \dot{U}_{A1} + \alpha \dot{U}_{A2}, \text{ В}, \quad (14.9)$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C0} + \alpha \dot{U}_{A1} + \alpha^2 \dot{U}_{A2}, \text{ В}. \quad (14.10)$$

Из системы уравнений (14.8-14.10) найдем векторы \dot{U}_{A0} , \dot{U}_{A1} , \dot{U}_{A2} через исходные векторы \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C .

Для расчета \dot{U}_{A0} необходимо сложить уравнения (14.8), (14.9) и (14.10) и сократить с учетом оператора α ($1+\alpha^2 + \alpha = 0$). Тогда получим

$$\dot{U}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), \text{ В.} \quad (14.11)$$

Таким образом, для нахождения векторов нулевой последовательности необходимо геометрически сложить три исходных вектора и разделить на три.

Для нахождения векторов прямой последовательности необходимо геометрически сложить векторы (14.8), (14.9) и (14.10), при этом уравнение (14.9) необходимо предварительно умножить на α , а уравнение (14.10) – на α^2 :

$$\dot{U}_{A1} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha\dot{U}_B + \alpha^2\dot{U}_C), \text{ В.} \quad (14.12)$$

То есть, для определения векторов прямой последовательности необходимо геометрически сложить исходные векторы, при этом вектор \dot{U}_B , необходимо повернуть вправо на 120° , а вектор \dot{U}_C – влево на 120° (или вправо на 240°). Полученный результат поделить на три.

Для расчета векторов обратной последовательности необходимо геометрически сложить векторы (14.8), (14.9) и (14.10), при этом уравнение (14.9) необходимо предварительно умножить на α^2 , а уравнение (14.10) – на α . Тогда получим:

$$\dot{U}_{A2} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha^2\dot{U}_B + \alpha\dot{U}_C), \text{ В.} \quad (14.13)$$

То есть, для определения векторов обратной последовательности необходимо геометрически сложить исходные векторы, при этом вектор \dot{U}_B необходимо повернуть влево на 120° , а вектор \dot{U}_C – вправо на 120° (или влево на 240°). Полученный результат поделить на три.

Необходимость анализа и расчета параметров несимметричных систем заключается в том, что они оказывают существенное влияние на процесс работы различного электрооборудования.

Например, магнитные потоки нулевой последовательности (генерируемые токами нулевой последовательности) фаз проходят

через статор двигателя, минуя ротор, а потоки прямой и обратной последовательностей фаз проходят через ротор.

При одном и том же токе прямой и нулевой последовательности соответствующие им магнитные потоки различны. Поэтому для асинхронного электродвигателя $Z_{0д} \neq Z_{1д} \neq Z_{2д}$.

Расчет методом симметричных составляющих состоит в том, что на основании принципа наложения токов, исходный несимметричный режим работы представляют как результат наложения трех симметричных режимов.

В первом симметричном режиме все токи, ЭДС и напряжения содержат только составляющие прямой последовательности фаз, а линии передачи, вращающиеся электромашины и трехфазные трансформаторы представлены на схемах их сопротивлениями для прямой последовательности.

Во втором симметричном режиме все токи, ЭДС и напряжения содержат составляющие только обратной последовательности, а машины и трансформаторы представлены их сопротивлениями обратной последовательности.

В третьем симметричном режиме все токи, ЭДС и напряжения содержат только составляющие нулевой последовательности, а машины и трансформаторы представлены соответствующими сопротивлениями нулевой последовательности.

Задание. Изучить схему подключения исследуемой ЛЭЦ трехфазного тока (подключение нагрузки по схеме «звезда» без нулевого провода) с несимметричной нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты симметричных составляющих исследуемой цепи, построить ее векторные диаграммы: несимметричных напряжения и тока, симметричных составляющих напряжений и токов.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать электрическую цепь по схеме «звезда» без нулевого провода (рис. 14.2).

2) Включить стенд. Включить тумблер $S13$.

3) Провести измерения фазных и линейных токов, напряжений и мощностей. Результаты занести в таблицу 14.1.

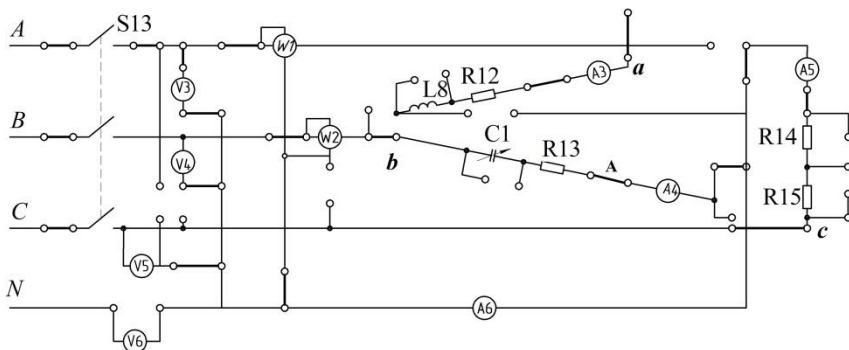


Рис. 14.2. Схема подключения лабораторной установки

Таблица 14.1

Результаты измерений параметров несимметричной системы

$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$U_N,$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт

Таблица 14.2

Результаты расчета параметров несимметричной системы

$S_A,$ ВА	$S_B,$ ВА	$S_C,$ ВА	$\cos \varphi_A$	$\cos \varphi_B$	$\cos \varphi_C$	$P_\Sigma,$ Вт	$S_\Sigma,$ ВА	$\cos \varphi_\Sigma$	$Z_A,$ Ом	$Z_B,$ Ом	$Z_C,$ Ом

4) Провести расчет параметров несимметричной системы напряжений и токов. Результаты занести в таблицу 14.2.

5) Провести расчет параметров симметричных составляющих токов и напряжений. Результаты занести в таблицы 14.3 и 14.4.

Таблица 14.3

Результаты расчета симметричных систем напряжений

$\dot{U}_{A, B}$	$\dot{U}_{B, B}$	$\dot{U}_{C, B}$	$\dot{U}_{A0, B}$	$\dot{U}_{A1, B}$	$\dot{U}_{B1, B}$	$\dot{U}_{C1, B}$	$\dot{U}_{A2, B}$	$\dot{U}_{B2, B}$	$\dot{U}_{C2, B}$

Таблица 14.4

Результаты расчета симметричных систем токов

$\dot{I}_{A, A}$	$\dot{I}_{B, A}$	$\dot{I}_{C, A}$	$\dot{I}_{A0, A}$	$\dot{I}_{A1, A}$	$\dot{I}_{B1, A}$	$\dot{I}_{C1, A}$	$\dot{I}_{A2, A}$	$\dot{I}_{B2, A}$	$\dot{I}_{C2, a}$

б) Построить векторные диаграммы напряжений и токов несимметричной системы, и симметричных составляющих.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем суть метода симметричных составляющих?
2. Перечислить применяемые симметричные системы.
3. От каких факторов зависит угол фазы нулевой последовательности?
4. Каково влияние обратной последовательности на работу асинхронного электродвигателя?
5. Каково влияние нулевой последовательности на работу трехфазного трансформатора?

Лабораторная работа № 15

Исследование характеристик индуктивно-связанных цепей

Цель работы: исследовать характеристики индуктивно-связанных цепей и освоить методику экспериментального определения параметров их индуктивной связи.

При прохождении электрического тока через витки катушки в ее сердечнике возникает магнитный поток. В том случае если катушки расположены на одном сердечнике (даже если сердечник не стальной) их магнитные потоки взаимодействуют. Магнитный поток каждой из катушек вызывает ЭДС индуцируемую в витках соседней катушки. Это явление получило название индуктивной связи электромагнитных катушек.

Магнитный поток в сердечнике обусловлен током в витках катушки и определяется зависимостью:

$$\Phi = \frac{wI}{R_{\text{маг}}}, \text{ Вб.} \quad (15.1)$$

На рисунке 15.1 показаны магнитные потоки индуктивно-связанных катушек: Φ_{21} и Φ_{12} – потоки взаимной индукции; Φ_{S1} , Φ_{S2} – потоки рассеяния.

Полный магнитный поток, создаваемый током каждой катушки, состоит из потока рассеяния (в том случае если катушка не бронирована) и потока взаимной индукции. Совместно они образуют поток самоиндукции. Для первой катушки $\Phi_{11} = \Phi_{S1} + \Phi_{21}$, для второй катушки $\Phi_{22} = \Phi_{S2} + \Phi_{12}$.

Эти потоки определяют величины собственных индуктивностей L_1 и L_2 катушек.

Связь потокоцепления взаимной индукции одной электрической цепи с током другой характеризуется взаимной индуктивностью M . Если потокоцепление Ψ_{12} первой катушки обусловлено током i_2 второй катушки, то взаимная индуктивность определяется как:

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} = \frac{W_1 \Phi_{12}}{i_2}, \text{ Гн,} \quad (15.2)$$

аналогично для второй катушки:

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{W_2 \Phi_{21}}{i_1}, \text{ Гн.} \quad (15.3)$$

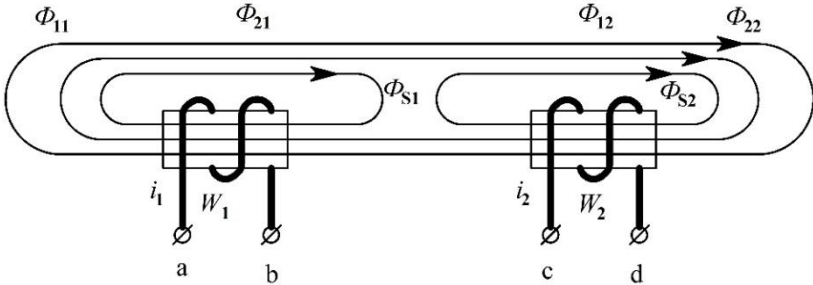


Рис. 15.1. Схема магнитных потоков индуктивно-связанных катушек

Для линейных электрических цепей взаимная индуктивность $M_{12} = M_{21} = M$ и зависит от геометрических размеров, числа витков и взаимного расположения катушек.

Если токи в катушках изменяются по синусоидальному закону, то действующие значения ЭДС взаимной индукции определяются зависимостями

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1M} = -j\omega M I_2 = -jX_M I_2 \\ E_{2M} = -j\omega M I_1 = -jX_M I_1 \end{array} \right\} \quad (15.4)$$

Степень индуктивной связи двух элементов характеризуется коэффициентом связи:

$$K = \sqrt{\frac{\Phi_{21} \cdot \Phi_{12}}{\Phi_1 \cdot \Phi_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (15.5)$$

Важное значение имеет то, как между собой подключены катушки – встречно или согласно.

Тип соединения определяется направлением навивки обмоток в катушках и взаимным расположением катушек. На рисунке 15.2

показана методика изображения направления соединения катушек, в зависимости от направления навивки обмоток. При согласном соединении жирные точки ставятся возле одноименных выводов катушек, при встречном – возле разноименных.

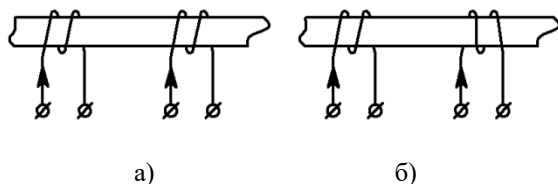


Рис. 15.2. Схемы включения индуктивно-связанных катушек:
а – согласное включение; б – встречное включение

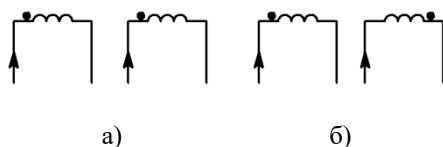


Рис. 15.3. Условные обозначения на схемах соединения индуктивно-связанных катушек:
а – согласное включение; б – встречное включение

При согласном соединении ($M > 0$) и $(\Psi_1 - \Psi_2) \leq \pi$. Следовательно $P_{1M} > 0$, $P_{2M} < 0$, т.е. в первую катушку поступает мощность P_1 , которая больше мощности, расходуемой в первой катушке на тепловые потери на величину мощности P_{1M} , передаваемой из первой катушки во вторую. Во вторую катушку сеть поставляет мощность на величину P_{2M} меньшую, чем мощность тепловых потерь во второй катушке.

При встречном соединении ($M < 0$) и $(\Psi_1 - \Psi_2) \leq \pi/2$, $P_{1M} < 0$, а $P_{2M} > 0$ – мощность передается из второй катушки в первую.

Экспериментальное определение взаимной индуктивности M можно произвести двумя способами:

1) По величине реактивного сопротивления цепи при последовательном соединении катушек в случаях согласного и встречного включений (метод сопротивлений). В этом случае получаем

$$X_{\text{согл}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M), \text{ Ом}; \quad (15.6)$$

$$X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M), \text{ Ом}. \quad (15.7)$$

Если составить разность данных выражений, то получим

$$X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M - L_1 - L_2 + 2M) = 4\omega M, \text{ Ом.} \quad (15.8)$$

Отсюда получаем выражение для определения взаимной индуктивности:

$$M_1 = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4\omega}, \text{ Гн.} \quad (15.9)$$

2) Первая катушка подключается к источнику синусоидальной ЭДС через амперметр, а к зажимам второй подключается вольтметр с высоким внутренним сопротивлением (рис. 15.4). Таким образом данная схема представляет собой воздушный трансформатор (без стального сердечника), вторичная обмотка которого работает в режиме холостого хода.

При таком способе величина взаимной индукции определяется по зависимости:

$$M_2 = \frac{U_3}{\omega I_3}, \text{ Гн.} \quad (15.10)$$

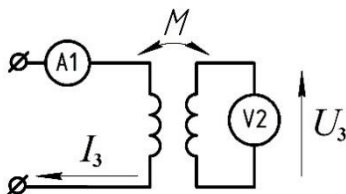


Рис. 15.4. Трансформаторная схема подключения катушек

Задание. Изучить схемы подключения исследуемых индуктивно-связанных цепей при согласном и встречном соединении катушек. Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемых цепей, а далее построить их векторные диаграммы (для согласного и встречного подключений).

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать исследуемую цепь для определения параметров катушек согласно рисунку 15.5.
- 2) Установить необходимое напряжение на входе цепи так,

чтобы ток в цепи был равен 0,4 А. Измерить напряжение и мощность. Полученные данные занести в таблицу 15.1.

3) Далее отключить первую катушку и подключить вторую (перемычки переустановить из позиций «1-1», «2-1» и «3-1», в позиции «1-2», «2-2» и «3-2» (рис. 15.5)). Установить значение тока в цепи равное 0,4 А. Провести измерения аналогичные пункту 2. Результаты занести в таблицу 15.1.

4) По данным измерений вычислить параметры катушек по формулам (15.11). Результаты измерений и расчетов записать в таблицу 15.1.

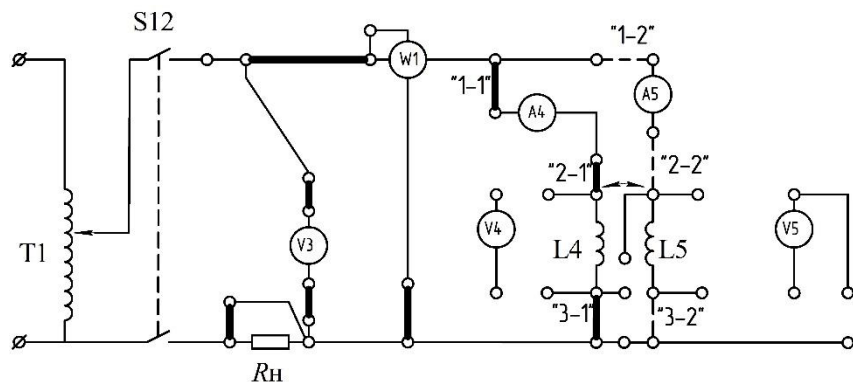


Рис. 15.5. Схема поочередного подключения катушек для экспериментального определения их параметров

Таблица 15.1

Результаты определения параметров катушки индуктивности

Номер катушки	Измерено			Рассчитано				
	$U_K, В$	$I_K, А$	$P_K, Вт$	$Z_K, Ом$	$R_K, Ом$	$X_K, Ом$	$L_K, Гн$	$R_{K\Sigma}, Ом$
1								
2								

$$\left. \begin{aligned}
 R_K &= \frac{P_K}{I_K}, \text{ Ом}, \quad Z_K = \frac{U_K}{I_K}, \text{ Ом}, \\
 X_K &= \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \text{ Ом}, \quad L_K = \frac{X_K}{2\pi f}, \text{ Гн}.
 \end{aligned} \right\} (15.11)$$

5) По схеме (рис. 15.6) собрать электрическую цепь для исследования последовательного соединения индуктивно-связанных катушек методом сопротивлений при согласном включении.

6) Включить стенд и установить напряжение на первой катушке $U_1 = 24 \text{ В}$ (по вольтметру V_4). Измерить ток, мощность и напряжения для согласного включения катушек. Показания занести в таблицу 15.2.

7) Далее не меняя входное напряжение (**регулировку ЛАТРа не изменять!**) переключить соединение катушек с согласного на встречное (согласно схеме, представленной на рисунке 15.7). Для переключения схем достаточно отключить тумблер $S12$. Произвести замеры (см. п. 6). Результаты занести в таблицу 15.2.

8) На основании полученных данных провести необходимые расчеты по формулам (15.12) и заполнить таблицу 15.3.

$$\left[\begin{array}{l} Z_1 = \frac{U_1}{I}, \text{ Ом}, \quad Z_2 = \frac{U_2}{I}, \text{ Ом}, \quad Z_3 = \frac{U}{I}, \text{ Ом}, \\ X_1 = \omega L_1, \text{ Ом}, \quad X_2 = \omega L_2, \text{ Ом}, \quad X_3 = \sqrt{Z_3^2 - R_2^2}, \text{ Ом}, \\ \cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}, \quad \varphi = \arccos \varphi, \text{ град.} \end{array} \right] \quad (15.12)$$

9) Для определения величины взаимной индуктивности методом трансформации собрать цепь по рисунку 15.8.

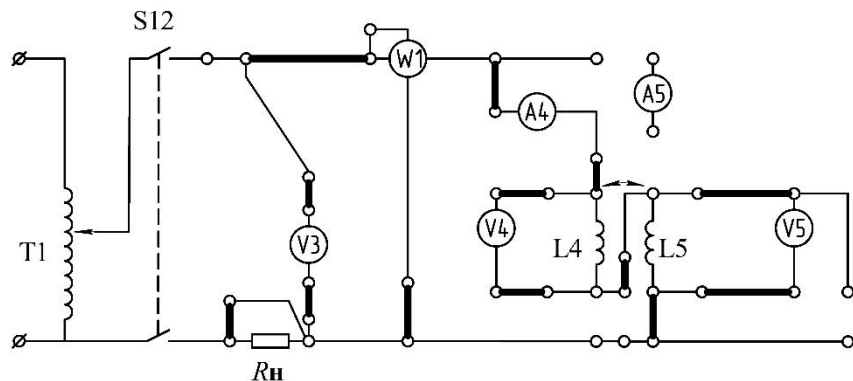


Рис. 15.6. Схема согласного подключения катушек

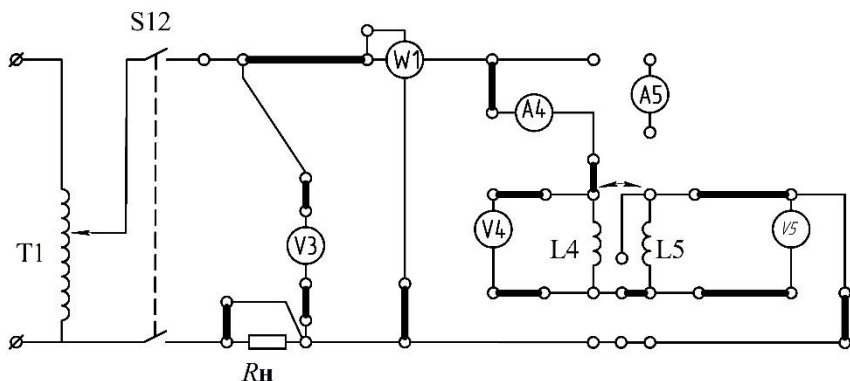


Рис. 15.7. Схема встречного подключения катушек

Таблица 15.2

Результаты эксперимента по определению взаимной индуктивности катушек методом сопротивлений

Метод соединения	U , В	I , А	U_1 , В	U_2 , В	P , Вт
Согласное					
Встречное					

10) Включить тумблер $S12$ и установить величину тока первой катушки $I_3 = 0,5$ А. Замерить величину напряжения на второй катушке U_3 и занести полученные данные в таблицу 15.4. Провести расчеты величины взаимной индуктивности M по формуле (15.10) и суммарной погрешности измерений и расчетов ΔM . По величине погрешности сделать вывод о сопоставимости или несопоставимости данных методов.

Таблица 15.3

Результаты расчетов по определению взаимной индуктивности катушек

Метод соединения	Z_1 , Ом	Z_2 , Ом	Z_3 , Ом	R_Σ , Ом	X_1 , Ом	X_2 , Ом	X_3 , Ом	$\cos \varphi$	φ , град.	M_1 , Гн	K
Согласное											
Встречное											

11) Используя полученные данные построить векторные диаграммы токов и напряжений для схем согласного и встречного включения катушек.

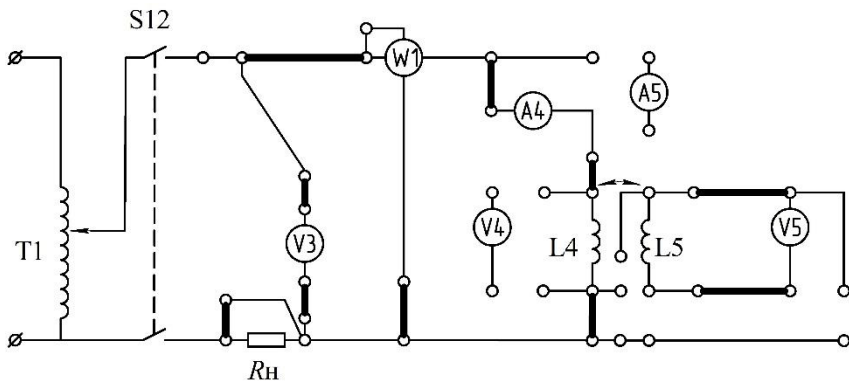


Рис. 15.8. Схема соединения индуктивно-связанных катушек по методу трансформации

Таблица 15.4

Результаты эксперимента по определению взаимной индуктивности катушек методом трансформации

Установлено	Измерено	Рассчитано	Погрешность
I_3, A	U_3, B	$M_2, \text{Гн}$	$\Delta M = \frac{M_1 - M_2}{M_1}$
0,5			

Вопросы для самоконтроля

1. В чем отличие согласного включения индуктивно-связанных катушек от встречного, с точки зрения электромагнитных процессов?
2. Что понимают под взаимной индуктивностью?
3. От каких факторов зависит величина взаимной индуктивности двух катушек?
4. Если токи катушек не совпадают друг с другом по фазе, возникнет ли явление взаимной индуктивности?
5. Как влияет индуктивная связь на эквивалентные реактивные сопротивления катушек при согласном и встречном включении?

Лабораторная работа № 16

Исследование характеристик трансформатора без стального сердечника

Цель работы: исследовать характеристики однофазного двух обмоточного трансформатора, не имеющего стального сердечника.

Трансформатор представляет собой статическое устройство, предназначенное для преобразования числового значения переменного напряжения, а также для электрического разделения цепей и преобразования числовых значений сопротивлений.

Передача энергии из одной цепи (первичной) в другую (вторичную) производится трансформатором за счет явления взаимной индукции.

Трансформатор имеет как минимум две обмотки, находящиеся на общем сердечнике. В «воздушном» трансформаторе сердечник выполнен не из электротехнической стали, а из какого-либо конструкционного материала, не обладающего ферромагнитными свойствами. Такой сердечник играет роль каркаса, удерживающего установленные на нем электромагнитные катушки.

Магнитная проницаемость такого сердечника постоянна (примерно равна единице).

Первичная обмотка характеризуется параметрами R_1 и L_1 , вторичная, соответственно R_2 и L_2 ; величина их взаимной индуктивности – M (рис. 16.1).

Если ко вторичной цепи подключена нагрузка, то ее сопротивление можно обозначить Z_H .

Направления токов в первичной и вторичной цепях нужно выбрать таким образом, чтобы катушки были включены согласно. Тогда возможно составить уравнения для обоих контуров по второму закону Кирхгофа. Получим уравнения в комплексной форме записи:

– для первичной цепи:

$$I_1 R_1 + j\omega I_1 L_1 + j\omega I_2 M = E; \quad (16.1)$$

– для вторичной цепи:

$$\dot{I}_2 R_2 + j\omega \dot{I}_2 L_2 + j\omega \dot{I}_1 M + \dot{U}_H = 0. \quad (16.2)$$

Необходимо построить векторную диаграмму трансформатора (рис. 16.2). Предположим, что нагрузка имеет активно-индуктивный характер (в подавляющем большинстве так и есть), то есть

$$\underline{Z}_H = Z_H e^{j\varphi_H}, \text{ Ом.} \quad (16.3)$$

Для начала построения диаграммы, совместим ток, проходящий через нагрузку \dot{I}_2 , с вещественной осью диаграммы.

Падение напряжения на нагрузке \dot{U}_H опережает ток \dot{I}_2 на угол φ_H . Падение напряжения на активном элементе $\dot{I}_2 R_2$ совпадает с направлением тока \dot{I}_2 .

Вектор индуктивного падения напряжения $j\omega \dot{I}_2 L_2$ опережает вектор тока \dot{I}_2 на угол 90° . В соответствии с уравнением (16.2) вектор падения напряжения от сопротивления самоиндукции $j\omega \dot{I}_1 M$ необходимо провести так, чтобы геометрическая сумма падений напряжений во вторичной цепи была равна нулю.

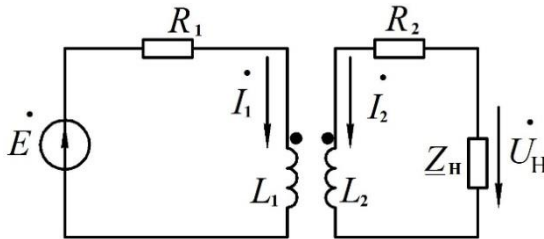


Рис. 16.1. Схема трансформатора без стального сердечника (воздушного)

Далее строят контур векторов для первичной цепи трансформатора.

Вектор тока \dot{I}_1 отстает от вектора падения напряжения $j\omega \dot{I}_1 M$ на 90° . Вектор падения напряжения на активном сопротивлении первичной цепи $\dot{I}_1 R_1$ совпадает по фазе с вектором тока \dot{I}_1 , а вектор падения напряжения от сопротивления самоиндукции $j\omega \dot{I}_1 L_1$ опережает вектор тока \dot{I}_1 на 90° .

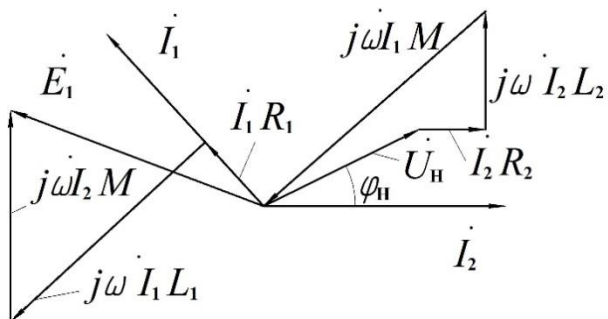


Рис. 16.2. Векторная диаграмма трансформатора

Вектор падения напряжения от взаимной индуктивности $j\omega\dot{I}_2M$ опережает вектор тока \dot{I}_2 на 90° .

В соответствии с уравнением (16.1) геометрическая сумма построенных векторов первичного контура равна \dot{E} .

Далее для расчета параметров трансформатора необходимо решить систему уравнений (16.1) и (16.2). При этом, предварительно, в уравнение (16.2) необходимо подставить значение падения напряжения на нагрузке

$$\dot{U}_H = \dot{I}_2 \underline{Z}_H = \dot{I}_2 (R_H + jX_H), \text{ В.} \quad (16.4)$$

Решив данные уравнения относительно неизвестного тока \dot{I}_1 , получим:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{(R_1 + R_{\text{вн}}) + j(X_1 - X_{\text{вн}})}, \text{ А,} \quad (16.5)$$

где $R_{\text{вн}}$ и $X_{\text{вн}}$ – вносимые из вторичного контура в первичный активное и реактивное сопротивления, Ом.

Полученные вносимые сопротивления (из данного же решения) соответственно равны:

$$R_{\text{вн}} = \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_H)^2 + (\omega L_2 + X_H)^2} (R_2 + R_H), \text{ Ом,} \quad (16.6)$$

$$X_{\text{вн}} = \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_H)^2 + (\omega L_2 + X_H)^2} (\omega L_2 + X_H), \text{ Ом.} \quad (16.7)$$

Вносимые сопротивления (рис. 16.3) представляют собой такие сопротивления, которые следовало бы «внести» в первичную цепь, то есть включить последовательно с R_1 и X_1 , чтобы учесть влияние нагрузки вторичной цепи трансформатора на ток в его первичной цепи (рис. 16.3).

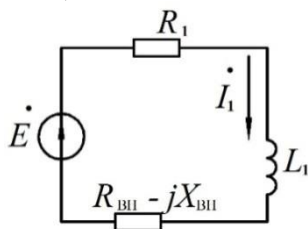


Рис. 16.3. Приведенная схема трансформатора с комплексным вносимым сопротивлением

Связь потокосцепления взаимной индукции одной электрической цепи с током другой характеризуется взаимной индуктивностью M . Если потокосцепление Ψ_{12} первой катушки обусловлено током i_2 второй катушки, то взаимная индуктивность определяется по формуле

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} = \frac{W_1 \Phi_{12}}{i_2}, \text{ Гн}, \quad (16.8)$$

аналогично для второй катушки:

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{W_2 \Phi_{21}}{i_1}, \text{ Гн}. \quad (16.9)$$

Для линейных электрических цепей взаимная индуктивность $M_{12} = M_{21} = M$ и зависит от геометрических размеров, числа витков и взаимного расположения катушек.

Степень индуктивной связи двух элементов характеризуется коэффициентом связи:

$$K = \sqrt{\frac{\Phi_{21} \cdot \Phi_{12}}{\Phi_1 \cdot \Phi_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (16.10)$$

Задание. Изучить схемы подключения исследуемых индуктивно-связанных катушек (воздушного трансформатора).

Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемой цепи, а далее построить ее векторные диаграммы (для режимов холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой).

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схемы испытуемого воздушного трансформатора (без стального сердечника) согласно рисунку 16.4.

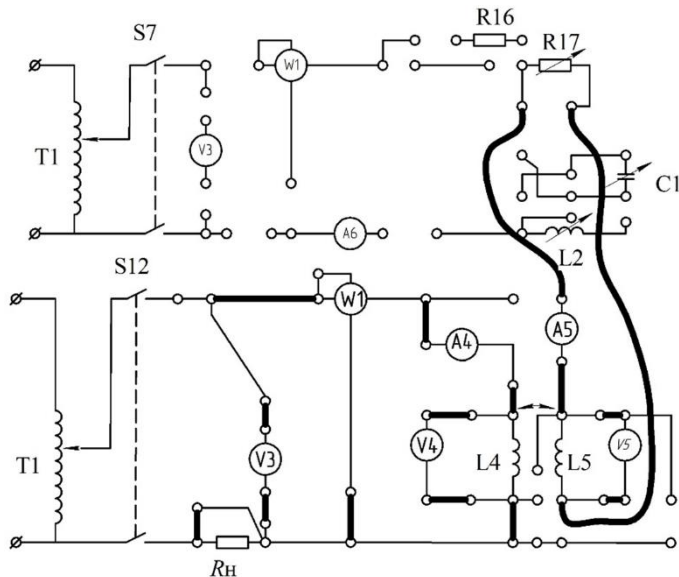


Рис. 16.4. Схема подключения испытуемого трансформатора

2) Включить стенд. Включить тумблер S12. Временно отсоединить одну из перемычек, идущих от катушки L5 к сопротивлению R17 создав, тем самым, режим холостого хода.

3) Изменяя напряжение на входе цепи добиться, чтобы ток в цепи первичной катушки I1 составил 0,5 А.

4) Провести измерения напряжения и мощности первичной катушки. Полученные данные занести в таблицу 16.1.

5) Не меняя входное напряжение, установить на место временно отсоединенную перемычку. Сопротивление R17 установить равным 100 Ом.

6) Провести измерения напряжений, токов и мощности в обеих катушках трансформатора. Показания занести в таблицу 16.1.

7) Сопротивление R_{17} установить равным 80 Ом. Провести измерения согласно пункту 6. Выполняя аналогичные действия, заполнить таблицу.

8) Провести расчеты всех требуемых параметров исследуемой цепи и заполнить таблицу 16.1.

Таблица 16.1

Результаты испытания воздушного трансформатора

$R_{17}, \text{ Ом}$	Измерено					Рассчитано			
	$U_1, \text{ В}$	$I_1, \text{ А}$	$P_1, \text{ Вт}$	$U_2, \text{ В}$	$I_2, \text{ А}$	$S_1, \text{ ВА}$	$\cos \varphi$	$P_2, \text{ Вт}$	η
х.х.					0			0	0
100									
80									
60									
40									
20									
0 (к.з.)				0					

9) По результатам эксперимента и согласно проведенным расчетам построить векторные диаграммы трансформатора для режимов холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой.

10) Построить нагрузочные характеристики трансформатора: $I_1 = f(I_2)$, А, $P_1 = f(I_2)$, Вт, $U_2 = f(I_2)$, В, $P_2 = f(I_2)$, Вт, $\eta = f(I_2)$. Все графики построить в одних координатных осях.

Проанализировать полученные результаты, сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение понятию «трансформатор».
2. Перечислить режимы работы трансформатора.
3. На каком явлении основан принцип работы трансформатора?
4. Каково назначение и области применения трансформаторов?
5. Под влиянием каких факторов происходит сдвиг по фазе вторичного напряжения трансформатора относительно первичного?

Лабораторная работа № 17

Исследование характеристик пассивного взаимного четырёхполюсника

Цель работы: освоить методику и исследовать характеристики линейного взаимного пассивного четырёхполюсника в цепи синусоидального тока, а также методику расчёта и построения его схем замещения.

Четырёхполюсником называется обобщенная часть электрической цепи, рассматриваемая относительно четырех ее зажимов.

Примерами четырёхполюсников могут быть трансформаторы, линии электропередачи, транзисторы.

Четырёхполюсник изображается в виде прямоугольника с четырьмя выводами, в виде зажимов (рис. 17.1).

Если четырёхполюсник активный (то есть содержит в своем составе источники энергии), то в прямоугольнике проставляется буква «А», если стоит буква «П» или нет буквы, то четырёхполюсник – пассивный.

Пассивные четырёхполюсники подразделяются, в свою очередь, на пассивные самостоятельные (способные усиливать входной сигнал за счет внешних источников энергии) и пассивные не-самостоятельные (неспособные усиливать сигнал по мощности).

Иногда четырёхполюсники имеют не четыре вывода, а шесть. Например, ab , cd и ac (рис. 17.1). В этом случае принципы работы не меняются.

Как правило большинство четырёхполюсников являются проходными, т.е. одна пара выводов является входной, например ab , а другая, например cd , – выходной.

Входные параметры имеют индекс «1», выходные – индекс «2».

В данном случае четырёхполюсник является передаточным звеном между источником питания и нагрузкой. К зажимам ab подключен внешний источник энергии, а к зажимам cd – нагрузка.

Важным условием работы четырёхполюсника является неизменность его характеристических параметров. То есть, входные

и выходные токи и напряжения могут меняться, но схемы внутренних соединений и величины сопротивлений должны оставаться неизменными.

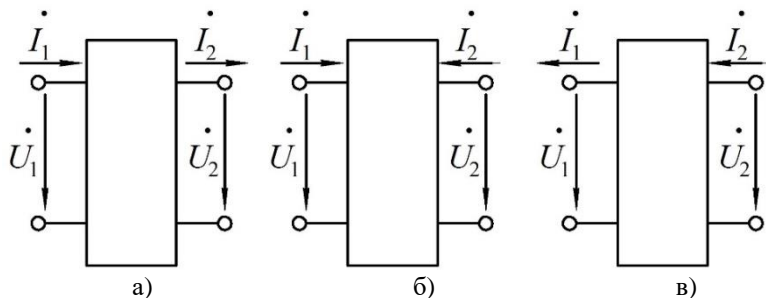


Рис. 17.1. Схемы двухполюсников для различных форм записи уравнений:

а - схема А-формы; б - схема Z-, Y-, H- и G-форм; в - схема В-формы

Четырехполюсник характеризуется двумя парами напряжений и токов, а так как число возможных сочетаний из четырех по два равно шести, соответственно, возможны шесть форм записи уравнений четырехполюсника:

А-форма:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2, \end{cases} \quad (17.1)$$

А-форме соответствует схема, представленная на рисунке 17.1, а. Существуют также Z-, Y-, H- и G-формы (рис. 17.1, б) и В-форма (рис. 17.1, в). Отличие данных схем в направлении токов первичных и вторичных цепей.

Коэффициенты четырехполюсника являются комплексными числами. Их параметры зависят от величин сопротивлений схемы четырехполюсника, наличия реактивных сопротивлений и частоты. Данные коэффициенты можно определить расчетным или опытным путем. Для расчетного определения коэффициентов необходимо знать внутреннюю схему четырехполюсника и параметры его элементов. Для взаимных четырехполюсников соблюдается условие взаимности:

$$AD - BC = 1. \quad (17.2)$$

Рассмотри пример расчета коэффициентов А-формы. Для это-

го ко входным зажимам ab подключим источник ЭДС, а к зажимам cd нагрузку \underline{Z}_H (рис. 17.2, а). При этом должно соблюдаться условие

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_{ab} = \dot{U}_1, \text{ В.} \quad (17.3)$$

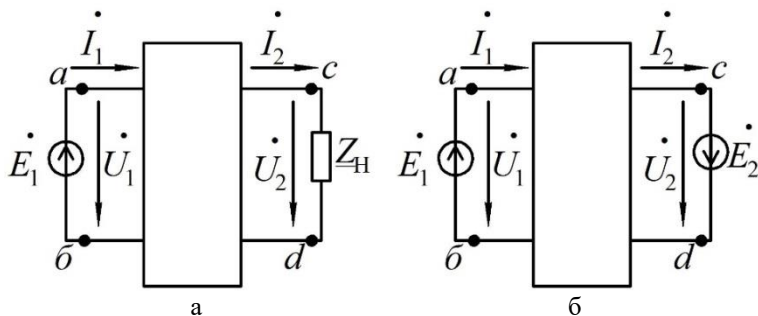


Рис. 17.2. Схема нагруженного двухполюсника

Величина падения напряжения на нагрузке составит:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_H = \dot{U}_{cd}, \text{ В.} \quad (17.4)$$

Согласно теореме компенсации нагрузке возможно заменить источником ЭДС, включенным встречно току I_2 с соблюдением условия:

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2, \text{ В.} \quad (17.5)$$

Тогда получим схему, представленную на рисунке 17.2, б.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа и теоремой взаимности можно получить уравнения для токов ветвей \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , через параметры источников ЭДС \dot{E}_1 , \dot{E}_2 и комплексных проводимостей \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{12} , \underline{Y}_{21} , \underline{Y}_{22} .

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_1 \underline{Y}_{11} - \dot{E}_2 \underline{Y}_{12}, \text{ А,} \quad (17.6)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{E}_1 \underline{Y}_{21} - \dot{E}_2 \underline{Y}_{22}, \text{ А,} \quad (17.7)$$

Для линейных взаимных четырехполюсников, согласно принципу взаимности $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$, из уравнения (17.7) получим:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} + \dot{I}_2 \frac{1}{\underline{Y}_{21}}, \text{ В.} \quad (17.8)$$

Если подставить полученное уравнение (17.8) в уравнение

(17.6) и реши его относительно тока, получим:

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_2 \frac{Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{21}} + \dot{I}_2 \frac{Y_{11}}{Y_{21}}, \text{ В.} \quad (17.9)$$

Сопоставив пары уравнений (17.8) и (17.9) с (17.6) и (17.7) и заменив величины \dot{E}_1 на \dot{U}_1 , а \dot{E}_2 на \dot{U}_2 , получим величины коэффициентов уравнений четырехполюсника:

$$A = \frac{Y_{22}}{Y_{21}}, \quad (17.10)$$

$$B = \frac{1}{Y_{21}}, \text{ Ом,} \quad (17.11)$$

$$C = \frac{Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{21}}, \text{ сим,} \quad (17.12)$$

$$D = \frac{Y_{11}}{Y_{21}}. \quad (17.13)$$

Если поменять местами источник ЭДС и нагрузку, не меняя при этом параметры четырехполюсника (обозначения ветвей не меняются), то получим новую схему (рис. 17.3, а). такая схема называется схемой обратного подключения четырехполюсника. Аналогично предыдущему случаю заменим сопротивление источником ЭДС. Тогда получим схему, представленную на рисунке 17.3, б.

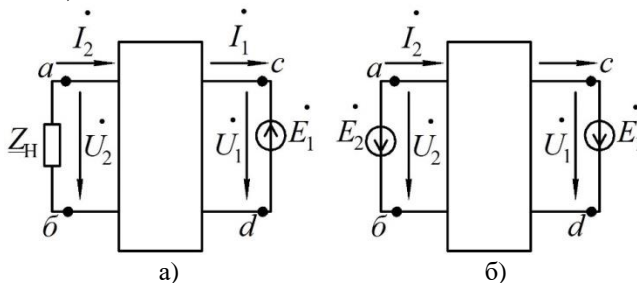


Рис. 17.3. Схема обратного подключения двухполюсника

Проведя аналогичные выкладки получим уравнения:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \frac{Y_{11}}{Y_{21}} + \dot{i}_2 \frac{1}{Y_{21}}, \text{ В.} \quad (17.14)$$

$$\dot{i}_1 = \dot{E}_2 \frac{Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{21}} + \dot{i}_2 \frac{Y_{22}}{Y_{21}}, \text{ В.} \quad (17.15)$$

Из данных уравнений видно, что коэффициенты A и D поменялись местами, однако по модулю они остались равны друг другу.

Если схема соединений четырехполюсника или параметры его элементов неизвестны, то коэффициенты определяются экспериментально. Для этого четырехполюсник испытывают в трех режимах работы поочередно.

1) Холостой ход при прямом подключении (вторичная ветвь разомкнута). Ток вторичной цепи $\dot{i}_{2x} = 0$ А равен нулю. Необходимо определить входное сопротивление:

$$\underline{Z}_{1x} = \frac{\dot{U}_{1x}}{\dot{i}_{1x}} = z_{1x} e^{j\varphi_{1x}} = \frac{A}{C}, \text{ Ом.} \quad (17.16)$$

2) Короткое замыкание при прямом подключении (вторичная ветвь замкнута). В данном случае напряжение вторичной цепи равно нулю $\dot{U}_{2к} = 0$ В. Необходимо определить входное сопротивление:

$$\underline{Z}_{1к} = \frac{\dot{U}_{1к}}{\dot{i}_{1к}} = z_{1к} e^{j\varphi_{1к}} = \frac{B}{D}, \text{ Ом.} \quad (17.17)$$

3) Короткое замыкание при обратном подключении (первичная цепь замкнута). Необходимо помнить, что напряжения и токи меняются местами, но параметры ветвей не меняются. В данном случае напряжение вторичной цепи равно нулю $\dot{U}_{1к} = 0$ В. Необходимо определить входное сопротивление:

$$\underline{Z}_{2к} = \frac{\dot{U}_{2к}}{\dot{i}_{2к}} = z_{2к} e^{j\varphi_{2к}} = \frac{B}{A}, \text{ Ом.} \quad (17.18)$$

Четвертым уравнением является условие взаимности, выражение (17.2). Далее решая совместно систему четырех уравнений (17.2), (17.16) по (17.18), определим коэффициент A :

$$A = \sqrt{\frac{Z_{1x} \cdot Z_{1к}}{Z_{2к}(Z_{1x} - Z_{1к})}}. \quad (17.19)$$

Рассчитав данный коэффициент (он является безразмерным) и воспользовавшись формулами (17.16) по (17.18) легко определяются все остальные коэффициенты B , C и D .

На практике, как правило нет необходимости знать схему четырехполюсника и параметры его элементов. В этом случае по найденным коэффициентам строится эквивалентная схема и определяются параметры ее элементов.

В электротехнике используются T - и Π -схемы замещений (рис. 17.4).

В электротехническом плане обе схемы замещения эквивалентны друг другу, но для замещения линий электропередачи используется, как правило, Π -схема, а для трансформаторов – T -схема.

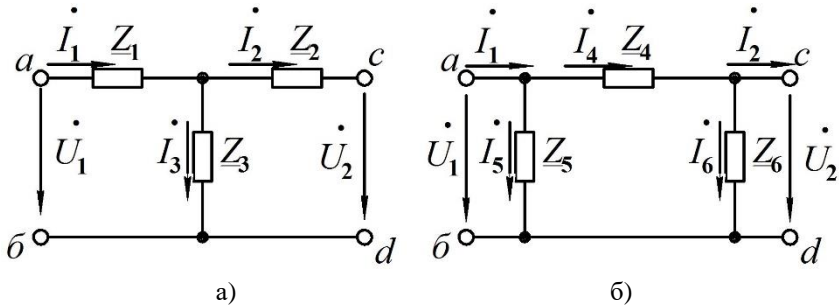


Рис. 17.4. Эквивалентные схемы четырехполюсников:
а – T -схема; б – Π -схема

Главной задачей в этом случае является расчет параметров данных схем. То есть сопротивлений Z_1 по Z_6 .

Рассмотрим процесс такого расчета на примере T -схемы (рис. 17.4, а). Для этого необходимо выразить входные (первичные) параметры схемы через выходные (вторичные), с помощью закона Ома получим:

$$I_1 = I_3 + \frac{U_2 + I_2 \cdot Z_2}{Z_3} = U_2 \frac{1}{Z_3} + I_2 \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right), \text{ А}; \quad (17.20)$$

$$U_1 = U_2 + I_1 \cdot Z_1 + I_2 \cdot Z_2 =$$

$$= \dot{U}_2 \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right) + \dot{I}_2 \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3} \right), \text{ В.} \quad (17.21)$$

Выражение (17.21) получено с учетом выражения (17.20). Сопоставив однотипные выражения (17.21) с (17.1), а (17.20) с (17.2), нетрудно получить искомые коэффициенты четырехполосника:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right), B = \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3} \right), \text{ Ом} \\ C = \frac{1}{Z_3}, \text{ сим, } D = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right). \end{array} \right\} \quad (17.22)$$

Соответственно, из полученных выражений находим величины комплексных сопротивлений схемы замещения:

$$\left. \begin{array}{l} \underline{Z}_3 = \frac{1}{C}, \text{ Ом,} \\ \underline{Z}_1 = \frac{A - 1}{C}, \text{ Ом,} \\ \underline{Z}_2 = \frac{D - 1}{C}, \text{ Ом.} \end{array} \right\} \quad (17.23)$$

Параметры элементов Π -схемы замещения рассчитываются аналогично.

Таким образом возможно определить сначала комплексные коэффициенты четырехполосника, а затем параметры элементов его схемы замещения.

Задание. Изучить схемы подключения исследуемой цепи четырехполосника с активно-реактивной нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров в режимах холостого хода и короткого замыкания. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик четырехполосника и его T -схемы замещения, а далее построить его векторную диаграмму.

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать испытуемую схему четырехполосника (рис. 17.5).
- 2) Включить стенд.
- 3) Провести опыт холостого хода. Для этого включить схему

и установить необходимое входное напряжение.

4) Снять показания приборов (токи и напряжения) и занести их в таблицу 17.1.

5) Отключить схему и для проведения опыта короткого замыкания собрать следующую схему (рис. 17.6).

6) Провести опыт короткого замыкания. Для этого включить схему и установить необходимое входное напряжение.

7) Снять показания приборов (токи и напряжения) и занести их в таблицу 17.1.

8) Отключить цепь и для проведения опыта короткого замыкания, при обратном подключении четырехполосника, собрать следующую схему (рис. 17.7).

9) Провести опыт короткого замыкания в обратном направлении. Для этого включить схему и установить необходимое входное напряжение.

10) Снять показания приборов (токи и напряжения) и занести их в таблицу 17.1.

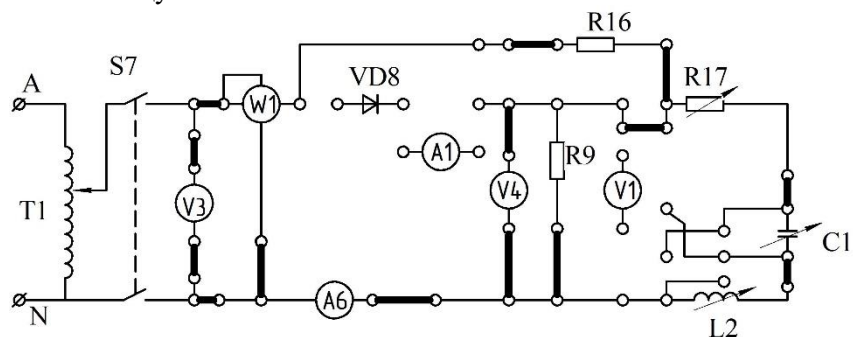


Рис. 17.5. Схема холостого хода при прямом подключении

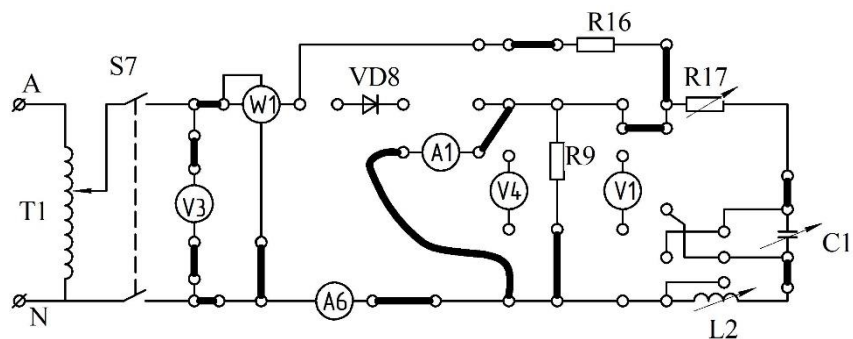


Рис. 17.6. Схема короткого замыкания при прямом подключении

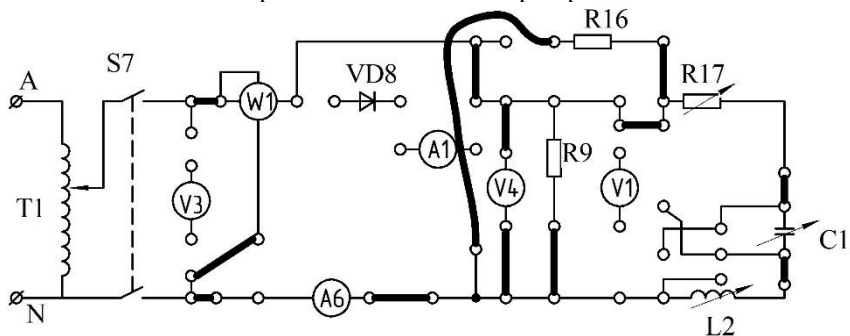


Рис. 17.7. Схема короткого замыкания при обратном подключении

11) Провести расчет параметров четырехполюсника: Z_{1x} , $Z_{1к}$, $Z_{2к}$ по формулам (17.16) по (17.18), а также коэффициенты мощности и занести в таблицу 17.2.

12) Коэффициенты четырехполюсника необходимо рассчитать по формуле (17.19), а затем выполнить вычисления, используя формулы (17.16), (17.17) и (17.18). Показания занести в таблицу 17.3.

13) По формулам (17.23) провести расчет комплексных сопротивлений эквивалентной схемы и построить ее. Результаты занести в таблицу 17.3.

Таблица 17.1

Результаты измерений параметров четырехполюсника

U_{1x} , В	I_{1x} , А	P_{1x} , Вт	$U_{1к}$, В	$I_{1к}$, В	$P_{1к}$, Вт	$U_{2к}$, В	$I_{2к}$, А	$P_{2к}$, Вт
V3	A6	W1	V3	A6	W1	V4	A6	W1

Таблица 17.2

Результаты расчетов параметров четырехполюсника

$\cos \varphi_{1x}$	$\cos \varphi_{1к}$	$\cos \varphi_{2к}$	φ_{1x} , Град.	$\varphi_{1к}$, Град.	$\varphi_{2к}$, Град.	Z_{1x} , Ом	$Z_{1к}$, Ом	$Z_{2к}$, Ом

Таблица 17.3

Результаты расчетов параметров элементов схемы замещения

A	B, Ом	C, сим	D	Z_1 , Ом	Z_2 , Ом	Z_3 , Ом

--	--	--	--	--	--	--

14) По результатам измерений и расчетов построить векторные диаграммы для каждого опыта. Сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какое устройство называют четырехполосником?
2. Привести классификацию четырехполосников.
3. Каким образом рассчитать коэффициенты четырехполосника?
4. Какие еще известны формы записи четырехполосников?
5. Для каких устройств, какие схемы замещения используют?

Лабораторная работа № 18

Исследование характеристик ЛЭЦ периодического несинусоидального тока

Цель работы: исследовать характеристики линейных электрических цепей периодических несинусоидальных токов, а также изучить влияние наличия в цепи линейных индуктивных катушек и конденсаторов на форму кривой несинусоидального тока.

Несинусоидальным называется ток, который изменяется во времени по несинусоидальному закону.

Существует 5 причин возникновения несинусоидальных токов в электрической цепи:

1) Если источники ЭДС (тока) выдают в цепь несинусоидальную ЭДС (ток), а все элементы цепи линейные.

2) Если источники ЭДС (тока) выдают в цепь синусоидальную ЭДС (ток) но в цепи присутствуют один или несколько нелинейных элементов.

3) Если источники ЭДС (тока) выдают в цепь несинусоидальную ЭДС (ток) и в цепи присутствуют один или несколько нелинейных элементов.

4) Если источники ЭДС (тока) выдают в цепь синусоидальную или постоянную ЭДС (ток), а один или несколько элементов цепи периодически меняют свои параметры.

5) Если в цепи присутствуют источники ЭДС (тока), выдающие синусоидальные ЭДС (токи) различных частот относительно друг друга.

Расчет линейной цепи несинусоидального тока производится методом наложения. Для этого периодическую несинусоидальную ЭДС представляют в виде последовательного соединения нескольких ЭДС кратных частот. Амплитуда и начальные фазы этих ЭДС находятся путем разложения в тригонометрический ряд Фурье, так как несинусоидальные функции ЭДС и токов в электрических цепях удовлетворяют условиям Дирихле. Ряд Фурье может быть представлен в виде суммы гармоник:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \Psi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \Psi_2) + \dots \\ \dots + A_k \sin(k\omega t + \Psi_k), \quad (18.1)$$

Или в виде суммы синусных и косинусных составляющих этих гармоник

$$f(t) = A_0 + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + \dots + C_1 \cos \omega t + C_2 \cos 2\omega t, \quad (18.2)$$

где A_0 – постоянная составляющая;

$A_1 \sin(\omega t + \Psi_1)$ – первая или основная гармоника;

$A_k \sin(k\omega t + \Psi_k)$ – высшая гармоника порядка k ;

A_k – амплитуда гармоники (ЭДС, тока или напряжения);

$\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_k$ – начальные фазы гармоник.

$$\operatorname{tg} \Psi_k = \frac{C_k}{B_k}. \quad (18.3)$$

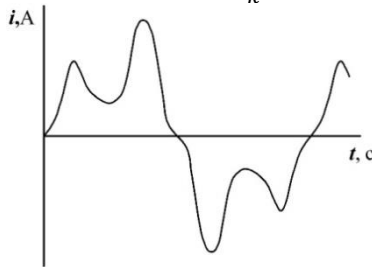


Рис. 18.1. Пример кривой несинусоидального тока, полученной методом наложения двух синусоид с трехкратным различием по частоте

Расчет токов в цепи производится для каждой из гармоник в отдельности с учетом того, что сопротивление цепи определяется номером гармоники.

$$X_L = k\omega L, \text{ Ом}; \quad X_C = \frac{1}{k\omega C}, \text{ Ом}. \quad (18.4)$$

Следует учитывать, что нельзя суммировать комплексные значения токов и напряжений отдельных гармоник, так как их частоты различны.

Для определения действующих значений измеряемых величин применяют приборы электромагнитной, электродинамической и тепловой систем.

Приборы магнитоэлектрической системы реагируют на среднее значение тока или напряжения за период. Магнитоэлектрические с выпрямлением – на среднее значение за половину периода; амплитудные электронные вольтметры (мультиметры) – на максимальное значение, с дальнейшим вычислением действующего значения величины по алгоритму, рассчитанному на синусоидальный ток, то есть с соотношением $I_m/I = \sqrt{2}$. Вследствие этого, при измерении несинусоидальных величин, цифровые мультиметры обладают высокой погрешностью и использовать их недопустимо.

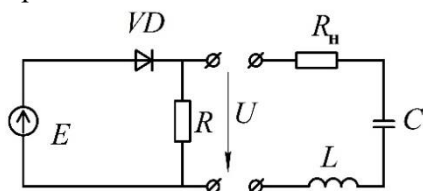


Рис. 18.2. Схема простейшего источника несинусоидального напряжения

Для характеристики несинусоидальных кривых вводятся следующие коэффициенты:

- коэффициент формы:

$$k_{\phi} = \frac{I}{I_{\text{cp}}} ; \quad (18.5)$$

- коэффициент искажения:

$$k_u = \frac{I_1}{I} ; \quad (18.6)$$

- коэффициент амплитуды:

$$k_a = \frac{I_m}{I} . \quad (18.7)$$

Задание 1. Изучить схемы подключения исследуемых цепей несинусоидального тока, при наличии и отсутствии реактивных элементов. Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемых цепей, а далее построить их осциллограммы (для всех исследованных случаев).

Задание 2. Изучить схемы подключения исследуемых цепей несинусоидального тока с активной и активно-реактивной нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров исследуемых

схем. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемых цепей, а далее построить их осциллограммы (для обоих случаев).

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 18.3).
- 2) Включить стенд, исследовать форму кривых тока и напряжения источника несинусоидального напряжения. Входное напряжение установить равным 100 В.

Осциллограмма напряжения U_m исследуемого источника должна быть зарисована с экрана ЭО (электронный осциллограф) в тетрадь. Она служит для определения амплитуды напряжения U_m .

- 3) Провести измерения необходимых характеристик цепи и занести их в таблицу 18.1. Рассчитать коэффициенты k_a и k_ϕ . Результаты занести в таблицу 18.1.

4) После проведения опыта осциллограф должен быть градуирован. Для этого, не изменяя коэффициент вертикального усиления, осциллограф нужно подключить к известному синусоидальному напряжению, амплитуда которого A_m измеряется по осциллограмме в миллиметрах.

Если в последующих экспериментах коэффициент усиления осциллографа по оси «у» не изменяется, то повторная градуировка не нужна.

Масштаб напряжения на осциллограммах определяется по зависимости:

$$m_U = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{A_m}, \frac{\text{В}}{\text{мм}}. \quad (18.8)$$

где A_m – амплитудное значение осциллограммы, мм.

Масштаб тока определяется по следующей зависимости:

$$m_I = \frac{m_U}{R}, \frac{\text{А}}{\text{мм}}. \quad (18.9)$$

где R – сопротивление, к которому подключен осциллограф, Ом.

- 5) Далее подключить реактивные элементы параллельно резистору R_9 (рис. 18.4). Вследствие сдвига фаз на реактивных элементах ток, бывший пульсирующим, еще более исказится. Необходимо зарисовать полученную осциллограмму и проанализировать ее.

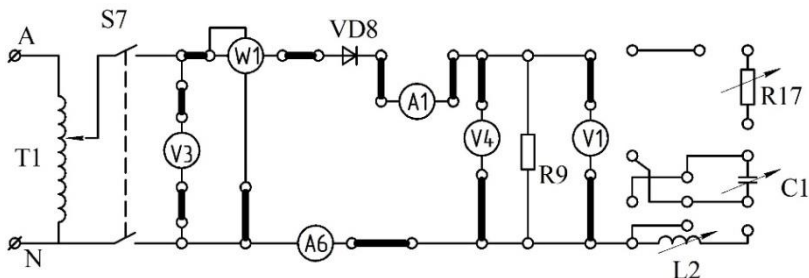


Рис. 18.3. Схема подключения несинусоидального источника ЭДС

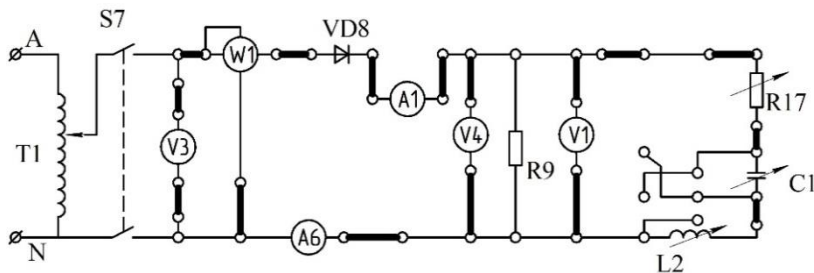


Рис. 18.4. Схема подключения несинусоидального источника ЭДС с реактивной нагрузкой

Таблица 18.1

Результаты исследования параметров
несинусоидального тока

Прибор	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Величина
Измерено				
A6	Действующее значение несинусоидального тока	I	A	
A1	Среднее значение несинусоидального тока	I_{cp}	A	
V3	Действующее значение напряжения на входе цепи	$U_{вх}$	B	
V1	Среднее значение несинусоидального напряжения	U_{cp}	B	
V4	Действующее значение несинусоидального напряжения	U	B	
W1	Активная мощность тока	P	Bт	
ОЭ	Амплитуда напряжения	U_m	B	
Вычислено				
	Масштаб напряжения	m_u	B/мм	
	Масштаб тока	m_i	A/мм	
	Коэффициент формы	k_f	-	
	Коэффициент амплитуды	k_a	-	
	Сопротивление	$R_9 = U/I$	Ом	
	Входное сопротивление	$R_{вх} = U_{вх}/I$	Ом	
	Амплитуда тока	$I_m = U_m/R_9$	A	
	Коэффициент мощности	$\cos \varphi = P/U \cdot I$	-	

б) Выполнить расчеты всех необходимых параметров и заполнить таблицу 18.2.

Вопросы для самоконтроля

1. Как определить амплитуду напряжения, если имеется его изображение на экране осциллографа и масштаб m_u ?
2. Записать общие формулы разложения несинусоидальной функции в ряд Фурье, в тригонометрической и в комплексной форме записи.
3. Пояснить, как влияют параметры R , L , C цепи на форму кривой несинусоидального тока.
4. Пояснить, приборами каких систем возможно производить измерения параметров несинусоидальных токов, почему.
5. Каковы особенности разложения симметричных кривых в ряд Фурье?

Лабораторная работа №19

Исследование характеристик переходных процессов в ЛЭЦ

Цель работы: экспериментально исследовать характеристики переходных процессов, возникающих при подаче L -образного сигнала в ЛЭЦ с последовательным соединением активно-реактивных элементов.

При коммутациях или авариях в электрической цепи имеют место переходные процессы – процессы перехода цепи из одного установившегося режима работы в другой, отличающийся, чем-либо от предыдущего, например амплитудой, величиной ЭДС, частотой, конфигурацией цепи.

Периодическими являются режимы синусоидального и постоянного токов, а также отсутствия тока в цепи.

Переходные процессы вызываются коммутацией в цепи. Коммутация – это процесс замыкания и размыкания выключателей (рис. 19.1).

Переходные процессы обычно являются быстро протекающими. Длительность переходных процессов составляет, как правило от 10^{-9} до 10^{-1} с, и крайне редко могут достигать 10^2 с.

В цепях с реактивными элементами L и C за время переходного процесса происходит перераспределение энергии, запасенной в конденсаторе в форме электрического поля:

$$W_C = \frac{CU^2}{2}, \text{ Дж}, \quad (19.1)$$

а в индуктивной катушке в форме магнитного поля:

$$W_L = \frac{LI^2}{2}, \text{ Дж}. \quad (19.2)$$

Составим уравнения по второму закону Кирхгофа для схемы (19.1) при замкнутом ключе.

Сумма падений напряжений на активном и реактивном элементах равна ЭДС:

$$u_L + Ri = E, \quad (19.3)$$

или

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E. \quad (19.4)$$

Таким образом, уравнение (19.4) представляет собой дифференциальное уравнение переходного процесса.

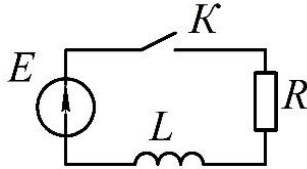


Рис. 19.1. Схема для коммутации переходного процесса

Общий интеграл линейного дифференциального уравнения равен сумме частного решения неоднородного уравнения и общего решения однородного уравнения.

Частное решение уравнения (19.4) равно:

$$i = \frac{E}{R}. \quad (19.5)$$

Решением однородного уравнения является показательная функция вида $A \cdot e^{pt}$.

Постоянные коэффициенты A и p не зависят от времени. В нашем случае они составляют:

$$A = -\frac{E}{R}, \quad A, \quad p = -\frac{R}{L}, \quad \text{с}^{-1}. \quad (19.6)$$

Следовательно, решение уравнения (19.4) будет иметь вид:

$$i = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}, \quad A. \quad (19.7)$$

Частное решение неоднородного уравнения называется принужденной составляющей тока, а полное решение однородного – свободной составляющей.

Исходя из схемы, представленной на рисунке 19.1, и законов Кирхгофа можно составить уравнение:

$$\begin{bmatrix} i_{\text{пр}} = \frac{E}{R}, \text{ А,} \\ i_{\text{св}} = -\frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}, \text{ А,} \\ i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}, \text{ А.} \end{bmatrix} \quad (19.8)$$

Так как переходные процессы возможны только в цепях, содержащих инерционные элементы L и C , поэтому процесс не может произойти мгновенно.

Действительно, скачкообразное изменение энергии привело бы к выделению в индуктивностях и емкостях бесконечно больших мощностей, что лишено физического смысла.

Принимают, что коммутация происходит в момент времени $t = 0$ с. Поэтому переходные процессы подчиняются двум законам коммутации.

Первый закон коммутации. Ток через индуктивный элемент L непосредственно до коммутации $i_L(0-)$ равен току через тот же индуктивный элемент непосредственно после коммутации $i_L(0+)$:

$$i_L(0-) = i_L(0+). \quad (19.9)$$

Второй закон коммутации. Напряжение на емкостном элементе C непосредственно до коммутации $u_C(0-)$ равно напряжению на этом же емкостном элементе непосредственно после коммутации $u_C(0+)$:

$$u_C(0-) = u_C(0+). \quad (19.10)$$

Начальные значения тока в индуктивности и напряжения на емкости в первый момент времени после коммутации называются независимыми начальными условиями, так как они определяются непосредственно из законов коммутации.

Все остальные токи и напряжения на элементах цепи в первый момент времени после коммутации определяются из расчета схемы для момента времени $t = (0+)$ и называются зависимыми начальными условиями.

Следует указать, что все токи и напряжения, не связанные законами коммутации, могут изменяться скачкообразно.

Задание. Изучить схемы подключения исследуемых цепей, с активной и активно-реактивной нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. Зарисовать осциллограммы на элементах R , L и C . На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемых цепей.

Порядок выполнения работы.

1) Подключить осциллограф к выводам ГПН (рис. 19.2). Установить частоту ГПН равную 50 Гц. Включить стенд и ГПН.

2) С помощью осциллографа измерить величины t_1 , t_2 , T , U_m , зарисовать осциллограмму (она должна быть похожа на осциллограмму, изображенную на рисунке 19.3). Полученные данные занести в таблицу 19.1.

3) Установить частоту ГПН равную 1 кГц. Выполнить действия по пункту 2.

В целях проверки необходимо учитывать, что

$$T = t_1 + t_2 = 0,02 \text{ с.} \quad (19.11)$$

4) Собрать цепь по схеме (рис. 19.4). Исследовать переходной процесс в цепи R , C . Установить величину индуктивности $L2$ одноименным галетником в поз. «2». Установить частоту ГПН равную 50 Гц. С помощью осциллографа измерить величины напряжений на выводах ГПН, и RC элементах. Показания занести в таблицу 19.2. Зарисовать осциллограммы с элементов R и C .

Те же измерения выполнить при частоте ГПН 1 кГц.

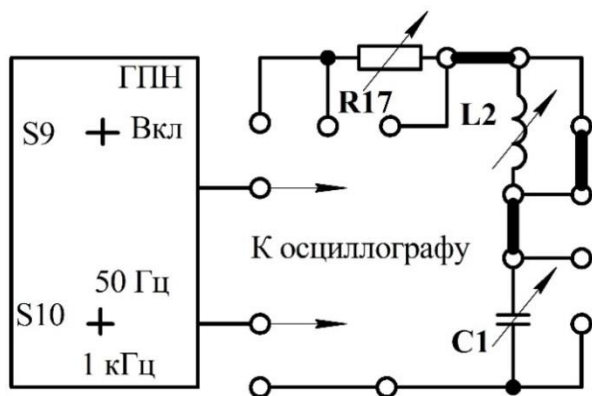


Рис. 19.2. Схема исследования характеристик ГПН

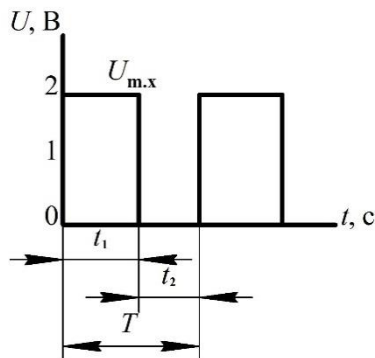


Рис. 19.3. Осциллограмма выходного напряжения ГПН

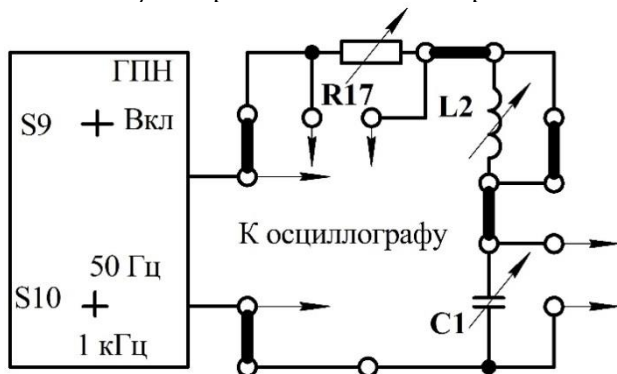


Рис. 19.4. Схема подключения RC-цепи

5) Собрать цепь по схеме (рис. 19.5). Исследовать переходной процесс в цепи R, L . Установить величину индуктивности $L2$ одноименным галетником в поз. «2». Установить частоту ГПН равную 50 Гц. С помощью осциллографа измерить величины напряжений на выводах ГПН и RL элементах. Показания занести в таблицу 19.2. Зарисовать осциллограммы с элементов R и L .

Те же измерения выполнить при частоте ГПН 1 кГц.

6) Собрать цепь по схеме (рис. 19.6). Исследовать переходной процесс в цепи RLC . Установить величину индуктивности $L2$ одноименным галетником в поз. «2». Установить частоту ГПН равную 50 Гц. С помощью осциллографа измерить величины напряжений на выводах ГПН и RLC элементах. Показания занести в таблицу 19.2. Зарисовать осциллограммы с элементов R, L и C .

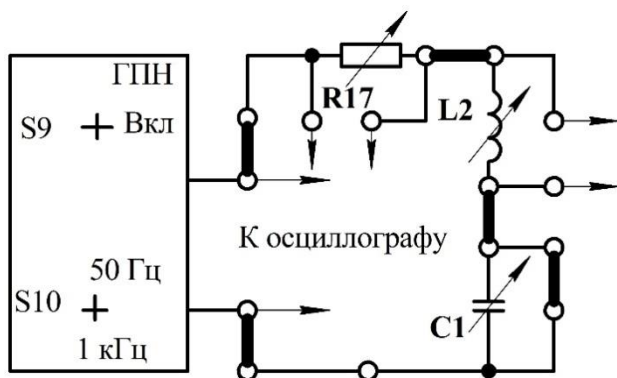


Рис. 19.5. Схема подключения RL -цепи

7) Определить по экспериментальным осциллограммам и расчетным путем по параметрам RLC угловую частоту затухающих колебаний ω :

$$\omega_{\text{эксп}} = \frac{2\pi}{T_{\text{эксп}}}, \text{ с}^{-1}, \quad \omega_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \text{ с}^{-1}. \quad (19.12)$$

Результаты записать в таблицу 19.2.

Ток цепи рассчитывается по формуле

$$I_m = \frac{U_{mR}}{R_{17}}, \text{ А}. \quad (19.13)$$

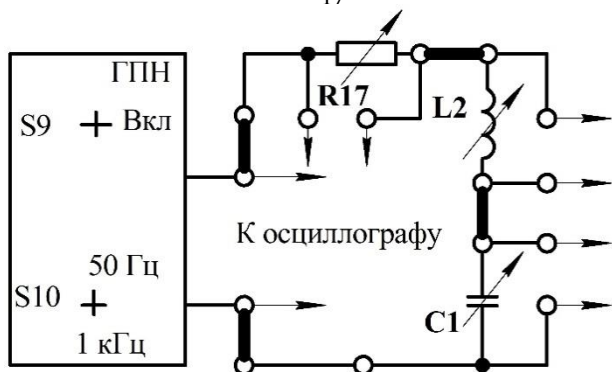


Рис. 19.6. Схема подключения RLC -цепи

Таблица 19.1

Результаты определения параметров ГПН

№ п/п	f , Гц	t_1 , с	t_2 , с	T , с	$U_{m,x}$, В
1	50				
2	1000				

Таблица 19.2

Результаты исследования переходных процессов

№ п/п	f , Гц	Осциллограмма на элементе	t_1 , с	t_2 , с	U_{mR} , В	U_{mL} , В	U_{mC} , В	I_m , А
1	50	<i>R</i>				-	-	
2	50	<i>C</i>			-	-		-
3	1000	<i>R</i>				-	-	
4	1000	<i>C</i>			-	-		-
5	50	<i>R</i>				-	-	
6	50	<i>L</i>			-		-	-
7	1000	<i>R</i>				-	-	
8	1000	<i>L</i>			-		-	-
9	50	<i>R</i>				-	-	
10	50	<i>L</i>			-		-	-
11	50	<i>C</i>			-	-		-
12	1000	<i>R</i>				-	-	
13	1000	<i>L</i>			-		-	-
14	1000	<i>C</i>			-	-		-

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте законы коммутации.
2. Изложите суть классического метода расчета переходных процессов в электрических цепях.
3. Что понимают под начальными условиями? Как они определяются?
4. Что называется постоянной времени переходного процесса τ и что она определяет?
5. Запишите условие, при котором переходный процесс в контуре *RLC* носит: аperiodический характер; колебательный характер.

Лабораторная работа № 20

Исследование параметров процесса зарядки конденсатора при ограничении тока

Цель работы: изучить принцип действия электронного реле времени на биполярном транзисторе. Исследовать характеристики переходного процесса в цепи с конденсатором при ограничении тока зарядки.

Под переходным процессом понимают процесс перехода от одного устойчивого режима работы электрической цепи к другому, отличающемуся от первого рядом параметров (током, напряжением, сопротивлением и т.д.). Переходный процесс возникает как в результате аварийных ситуаций (короткое замыкание, обрыв провода, удар молнии и т.д.), так и в результате повседневных включений, отключений и переключений электрических цепей и электрооборудования. Переходные процессы протекают очень быстро, но они, как правило, сопровождаются явлениями, которые нарушают нормальную работу электроприемников, создают радиопомехи, искажения сигналов, перенапряжения и броски токов, способные вызвать аварию.

Изучение переходных процессов позволяет сформулировать 2 основных закона коммутации.

– ток и магнитный поток индуктивности в момент коммутации сохраняют те значения, которые они имели до коммутации и в дальнейшем начинают изменяться именно с этих значений;

– напряжение и заряд емкости сохраняют в момент коммутации те значения, которые они имели до коммутации и в дальнейшем начинают изменяться именно с этих значений.

Токи и напряжения, действующие во время переходного процесса, называются переходными – $i_{п}$, $u_{п}$. Они складываются из двух составляющих:

– свободная составляющая $i_{св}$ ($u_{св}$), она появляется за счет энергии запасаемой в емкостях и индуктивностях цепи, с течением времени эта энергия растрачивается на активных сопротивлениях и уменьшается до нуля;

– установившаяся (принужденная) составляющая $i_{уст}$, $u_{уст}$, она наступает, когда переходный процесс затухает. Токи и напряжения этого режима определяются действующей в послекоммутационной цепи ЭДС (синусоидальной, постоянной и т.д.).

Таким образом, ток и напряжение переходного процесса можно определить как сумму:

$$\left. \begin{aligned} i_{\Pi} &= i_{св} + i_{уст}, \text{ A} \\ u_{\Pi} &= u_{св} + u_{уст}, \text{ A.} \end{aligned} \right\} \quad (20.1)$$

Характер переходного процесса в значительной степени зависит от начальных условий. Под начальными условиями понимают значения токов и напряжений в момент коммутации при $t = 0$. Так как напряжения на индуктивностях и активных сопротивлениях, и токи через емкости и активные сопротивления изменяются скачком, их значения до и после коммутации могут быть различными. В этой связи различают до коммутационные и после коммутационные начальные значения.

Докоммутационными называют значения токов и напряжений непосредственно перед коммутацией и обозначают $t = (0 -)$.

Послекоммутационными называют значения токов и напряжений непосредственно после коммутации и обозначают $t = (0 +)$.

Классический метод расчета переходных процессов предусматривает составление системы уравнений по законам Ома и Кирхгофа, для мгновенных значений токов и напряжений в после коммутационной схеме. Эта система приводится к единому уравнению для интересующего тока или напряжения. В общем случае это будет неоднородное дифференциальное уравнение, порядок которого определяется числом независимых индуктивностей и емкостей, общее решение этого уравнения позволяет найти свободную составляющую переходного процесса, а частное решение определяется видом функции принужденной составляющей.

Рассмотрим переходный процесс заряда конденсатора.

Схема цепи для заряда показана на рисунке 20.1.

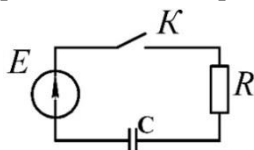


Рис. 20.1. Схема цепи зарядки конденсатора

Будем считать, что до включения выключателя K напряжение на конденсаторе было равно нулю. После замыкания K в цепи возникает ток и конденсатор заряжается до тех пор, пока напряжение на нем не достигнет напряжения источника E . Для этой цепи, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, можно записать

$$R_3 i + u_c = U_3, \text{ В}, \quad (20.2)$$

так как

$$i = C \frac{du_c}{dt}, \text{ А}, \quad (20.3)$$

то получим

$$R_3 C \frac{du_c}{dt} + u_c = U_3, \text{ В}. \quad (20.4)$$

Когда конденсатор полностью зарядится установившееся напряжение будет равно $u_{уст} = U_3$.

Выражение для свободного напряжения $u_{св}$ определяется решением однородного дифференциального уравнения

$$R_3 C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0, \text{ В}. \quad (20.5)$$

Решение этого уравнения имеет вид $u_{св} = A e^{pt}$,

$$p + \frac{1}{R_3 C} = 0, \quad (20.6)$$

корень этого уравнения равен $p = -\frac{1}{R_3 C}$.

С учётом найденных выражений $u_{св}$ и $u_{уст}$ получается

$$u_n = u_{св} + u_{уст} = U_3 + A e^{-pt}, \text{ В}. \quad (20.7)$$

Постоянную интегрирования A найдём из начальных условий и законов коммутации. В момент коммутации конденсатор не был заряжен, т.е. $u_{св} = 0$

В соответствии со вторым законом коммутации напряжение на конденсаторе не может изменяться скачком и, следовательно, при $t = (0+)$

$$u_n = U_3 + A = 0, \text{ В}. \quad (20.8)$$

Откуда получаем, что $A = -U_3$, следовательно

$$u_{\text{н}} = U_3 - U_3 e^{pt} = U_3 - U_3 e^{-t/\tau}, \text{ В}, \quad (20.9)$$

где $\tau = R_3 C$ – постоянная времени заряда, с.

Постоянная времени характеризует длительность протекания переходного процесса, τ определяет время, в течении которого $u_{\text{н}}$ уменьшается (увеличивается) в e раз по сравнению с первоначальным значением. Чем больше τ , тем дольше длится переходный процесс. Переходный процесс считается законченным через (3...4) τ .

Переходный ток определяется выражением:

$$i_{\text{н}} = \frac{U_3}{R_3} e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ А}. \quad (20.10)$$

График изменения напряжения и тока при зарядке конденсатора показан на рисунке 20.2.

В первый момент после коммутации $t = (0+)$ напряжение на конденсаторе равно $u_{\text{н}} = 0$ В, а ток зарядки изменяется скачком и равен

$$i = \frac{U_3}{R_3}, \text{ А}. \quad (20.11)$$

Затем напряжение экспоненциально возрастает до U_3 , а ток по мере заряда конденсатора уменьшается до 0. Касательная к кривой тока или напряжения численно равна τ . Чем больше $\tau = R_3 C$, тем дольше длится переходный процесс.

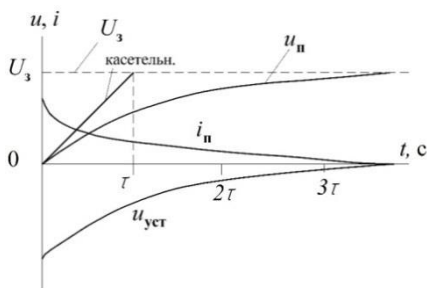


Рис. 20.2. Переходный ток и напряжение заряда конденсатора

Электронное реле времени – это устройство релейного типа с нормируемым временем срабатывания или отпускания реле после подачи или снятия входного управляющего сигнала.

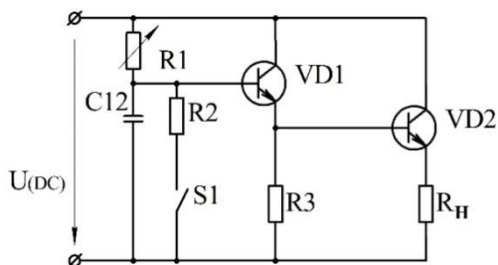


Рис. 20.3. Принципиальная схема транзисторного реле с времязадающей RC-цепью

В электронном реле времени на биполярных транзисторах ($VT3$, $VT4$) типа $N-P-N$ (рис. 23.3) задаваемая выдержка времени создается за счет переходного процесса, возникающего при заряде предварительно разряженного конденсатора $C12$, через регулируемый резистор $R1$. Изменением сопротивления $R1$ можно регулировать длительность переходного процесса и, следовательно, время срабатывания реле.

Задание. Изучить схему подключения исследуемого реле времени. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемой цепи, а далее построить графики функций заряда конденсатора от сопротивления ограничивающего конденсатора.

Порядок выполнения работы.

При срабатывании электромагнитного реле KV (электромагнитное реле РЭС-9 с переключающими контактами KV), после подачи управляющего сигнала (включение питания тумблером $SA8$), возникает переходный процесс, по окончании которого срабатывает транзисторное реле.

Электронный секундомер определяет установленную выдержку времени, а лампа $HL4$ сигнализирует о срабатывании реле. Конденсатор $C12$ емкостью 200 мкф и резистор $R1$ соединены с базой транзистора $VT3$, опыты проводятся при различных значениях сопротивления резистора $R1$, а также при изменении сопротивления в цепи транзистора $VT4$ с помощью делителя сопротивлений $SA10$.

1) Собрать схему подключения, представленную на рисунке 20.4, поставив рукоятки переключения резистора $R1$ в нулевое положение.

2) Включить стенд, величину сопротивления $R1$ установить равной нулю (0 кОм), а сопротивления $R_{Э-Б}$ (с помощью делителя SA10) равную 1 кОм.

3) Включить секундомер SA30, включить схему SA8 и снять показания секундомера.

4) Далее в обратном порядке отключить схему SA8 и отключить секундомер SA30.

5) Установить сопротивление $R1$ равно 2 кОм, а положение делителя SA10 не менять. Повторить действия по пунктам 3 и 4.

6) Повторяя аналогичные действия снять показания секундомера (характеристики электронного реле времени) и заполнить таблицу 20.1.

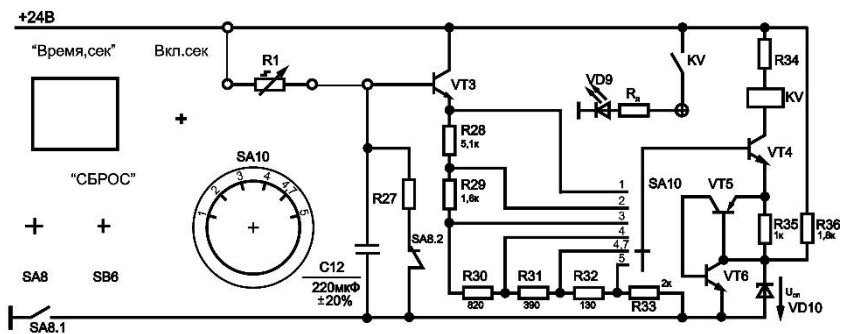


Рис. 20.4. Схема подключения исследуемого реле времени

Таблица 20.1

Результаты исследования времени заряда конденсатора t при ограничении тока заряда

Номер опыта	$R_{Э-Б}$, Ом (SA10)	Ограничивающее сопротивление $R1$, кОм					
		0	2	4	6	8	10
1	1						
2	2						
3	3						
4	4						
5	4,7						
6	5						

7) Построить графики функций времени срабатывания реле $t = f(R_1)$ (в одних координатных осях для любых четырех из шести номеров опытов. А также графики $t = f(R_{Э.Б.})$, аналогично, в одних координатных осях для любых четырех столбцов R_1).

Вопросы для самоконтроля

1. В чем назначение RC-цепи в составе реле времени?
2. Поясните принцип работы электронного реле времени на биполярном транзисторе.
3. Возможно ли вместо конденсатора использовать катушку индуктивности? Пояснить ответ.
4. Каково назначение транзисторов в исследуемой схеме транзисторного реле?
5. Как изменится время срабатывания исследуемого реле при увеличении емкости конденсатора C12?

Рекомендуемая литература

1. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учебное пособие. – 6-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2008. – 592 с. : ил.
2. Башарин, С. А. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля : учебное пособие / С. А. Башарин, В. В. Федоров. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 304 с. : ил.
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник. – 11-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 2007. – 701 с. : ил.
4. Бычков, Ю. А. Основы теоретической электротехники : учебное пособие / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев, А. Н. Белянин. – СПб. : Лань, 2008. – 590 с. : ил.
5. Лоторейчук, Е. А. Теоретические основы электротехники : учебник. – М. : ИД «Форум», ИНФРА-М, 2009. – 320 с. : ил.
6. Нефедова, Н. В. Карманный справочник по электронике и электротехнике / Н. В. Нефедова, П. М. Каменев, О. М. Большунова. – 2-е изд. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. – 283 с. : ил.
7. Прянишников, В. А. Теоретические основы

электротехники: курс лекций. – СПб. : КОРОНА принт, 2007. – 368 с. : ил.

Алфавитно-предметный указатель

А

алгебраическая сумма токов, 15
амперметр, 20
амперметра, 23

В

Векторная диаграмма, 38, 44, 51,
58, 64, 68, 69, 74, 75, 94
вольтметр, 20

Г

генератор, 8, 11, 12, 21, 22, 23, 24,
57, 58, 60, 62, 63, 66, 72

Д

двухполюсник
активный, 20, 27, 30
пассивный, 20, 98

З

закон Кирхгофа, 61, 73
законы коммутации, 121

И

индуктивная связь
электромагнитных катушек, 84

К

катушка, 37, 39, 40, 41, 43, 45, 46,
84, 85, 86, 88, 90, 92, 95, 96
короткое замыкание, 22, 60, 69,
102

Л

линейная электрическая цепь, 4
линейные токи, 67, 71, 73

М

магнитные потоки, 80, 81, 84
масштаб, 6, 113
мостовая схема подключения
нагрузки, 10
мощность, 9, 26, 31

Н

нагрузка, 11, 12, 21, 22, 25, 27, 48,
49, 51, 53, 55, 56, 59, 64, 71, 74,
75, 76, 81, 96, 97, 98, 104, 110,
112, 117
несимметричные системы, 78
несинусоидальный ток, 108
нулевой провод, 57, 61, 72, 73, 75,
77, 81, 132

45, 46, 53, 55, 60, 65, 82, 96, 112,
118, 119, 126

П

передача энергии из одной цепи
(первичной) в другую
(вторичную), 92
переходные процессы, 114, 116
потенциал, 5, 6, 7, 9, 61, 73
потенциальная диаграмма, 4, 5, 6,
9
поток взаимной индукции, 84
поток рассеяния, 84
Принцип взаимности, 17
принцип наложения, 15
принцип независимости действия
ЭДС, 15

Р

работа с нагрузкой, 22
резонанс, 37, 38, 39, 42, 43, 44, 47

С

сердечник, 84, 92
система прямой
последовательности, 78
сопротивление, 5, 6, 8, 9, 10, 14,
39, 53, 54, 73, 86, 89, 90, 92, 99,
103, 104, 106, 125
сумма ЭДС источников, 5
схема «звезда», 57, 59, 60, 61, 64,
65, 66, 72, 73, 81, 132
схема «треугольник», 67, 68, 69,
71, 77, 132
схема подключения, 23, 28, 40, 41,

Т

тепловые потери, 37, 43, 86
ток, 4, 8, 10, 12, 13, 15, 17, 20, 21,
22, 23, 25, 26, 28, 31, 32, 37, 39,
42, 43, 44, 46, 47, 52, 58, 61, 72,
73, 75, 77, 88, 89, 93, 95, 96, 108,
110, 111, 121, 122, 123, 124, 132
трансформатор, 92

У

участок цепи, 4

Ф

фазные токи, 67, 70, 73

Х

холостой ход, 22, 102

Ч

четырёхполюсник, 98, 99

Э

ЭДС, 4
электрические цепи переменного
синусоидального тока, 37
элементы
емкостные, 32, 37, 43, 52
индуктивные, 4, 30, 32, 37, 43, 48,
52, 75, 108, 111, 116

Оглавление

Предисловие	3
<i>Лабораторная работа №1. Исследование характеристик ЛЭЦПТ с одним источником ЭДС</i>	4
<i>Лабораторная работа №2. Исследование режимов работы ЛЭЦПТ соединенной по мостовой схеме</i>	10
<i>Лабораторная работа №3. Исследование характеристик ЛЭЦПТ методом наложения токов</i>	15
<i>Лабораторная работа №4. Исследование характеристик активного двухполюсника ПТ</i>	20
<i>Лабораторная работа №5. Исследование процесса передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке</i>	25
<i>Лабораторная работа №6. Исследование характеристик ЛЭЦСТ на примере пассивного двухполюсника</i>	30
<i>Лабораторная работа №7. Исследование линейного двухполюсника в режиме резонанса напряжений</i>	37
<i>Лабораторная работа №8. Исследование линейного двухполюсника в режиме резонанса токов</i>	43
<i>Лабораторная работа №9. Исследование режимов работы и характеристик линии электропередачи синусоидального тока.</i>	48
<i>Лабораторная работа №10. Исследование характеристик ЛЭЦ трехфазного тока соединенной по схеме «звезда» без нулевого провода</i>	57
<i>Лабораторная работа №11. Исследование характеристик ЛЭЦ трехфазного тока соединенной по схеме «звезда» с нулевым проводом</i>	61
<i>Лабораторная работа №12. Исследование характеристик ЛЭЦ трехфазного тока соединенной по схеме «треугольник»</i>	67
<i>Лабораторная работа №13. Исследование влияния характера фазных нагрузок на ток нулевого провода</i>	72
<i>Лабораторная работа №14. Изучение методики анализа несимметричных систем методом симметричных составляющих</i>	78
<i>Лабораторная работа №15. Исследование характеристик индуктивно-связанных цепей</i>	84
<i>Лабораторная работа №16. Исследование характеристик трансформатора без стального сердечника</i>	92

<i>Лабораторная работа №17. Исследование характеристик пассивного взаимного четырехполюсника</i>	98
<i>Лабораторная работа №18. Исследование характеристик ЛЭЦ периодического несинусоидального тока</i>	108
<i>Лабораторная работа №19. Исследование характеристик переходных процессов в ЛЭЦ</i>	114
<i>Лабораторная работа №20. Исследование параметров процесса зарядки конденсатора при ограничении тока</i>	121
Рекомендуемая литература	128
Алфавитно-предметный указатель.....	129

Учебное издание

**Васильев Сергей Иванович
Юдаев Игорь Викторович**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Практикум

Часть 1. Линейные электрические цепи

Технический редактор, компьютерная верстка О. Ю. Панкратова

Подписано в печать 20.10.2015. Формат 60×841/16

Усл. печ. л. 7,73, печ. л. 8,31.

Тираж 100. Заказ №.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО Самарской ГСХА
446442, Самарская область, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2

Тел.: (84663) 46-2-47


Факс 46-6-70

Е-mail: ssaariz@mail.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «Медиа-Книга»

443070, г. Самара, ул. Песчаная, 1, оф. 310

Тел. (846) 267-36-82. Е-mail: izdatkniga@yandex.ru



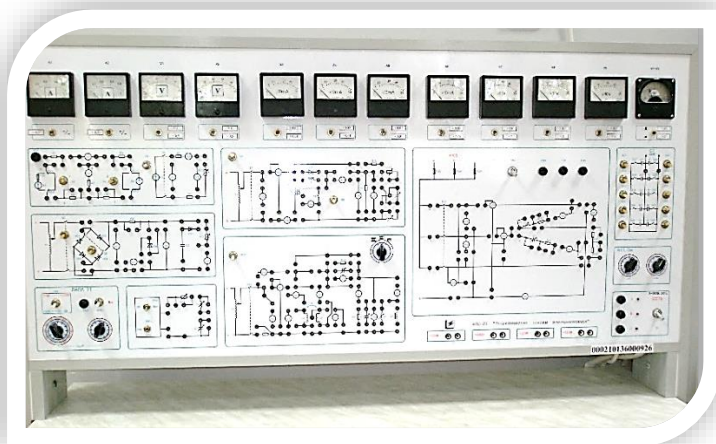
**С.И. ВАСИЛЬЕВ
И.В. ЮДАЕВ
С.В. МАШКОВ**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

С. И. Васильев, И. В. Юдаев, С. В. Машков

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА



Кинель 2017

УДК 621.3

В19

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой Электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ им. Т.И. Трубилина

О.В. Григораиш;

д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Применение электроэнергии в сельском хозяйстве» ФГБОУ ВО Ставропольского ГАУ

Г.В. Никитенко

Васильев, С. И.

В19 Электротехника и электроника : учебное пособие / С. И. Васильев, И. В. Юдаев, С. В. Машков. – Кинель : РИО Самарской ГСХА, 2017. – 252 с.

ISBN 978-5-88575-

В пособии рассмотрены вопросы, касающиеся линейных и нелинейных электрических цепей постоянного и переменного токов, магнитных цепей, электрических машин, их устройства, характеристик и режимов работы; вопросы, касающиеся методов их анализа и расчета. Приводятся исследования устройства, схем, характеристик и принципов работы отдельных элементов электроники и электронных устройств в целом.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».

УДК 621.3

В19

ISBN 978-5-88575-

© Васильев С. И., Юдаев И. В., Машков С. В., 2017

© ФГБОУ ВО Самарская ГСХА, 2017

Предисловие

Пособие содержит описание тридцати шести лабораторных работ, охватывающих основные разделы дисциплины «Электротехника и электроника» и направленных на исследование линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного синусоидального токов, цепей несинусоидальных токов, а также магнитных цепей, электрических машин и основ электроники.

Цель учебного пособия – помочь студентам глубже понять суть процессов, проходящих в электрических цепях, невидимых наглядно и потому наиболее сложных для понимания.

В процессе выполнения работ студенты учатся применять полученные теоретические сведения на практике, анализировать результаты экспериментов и делать соответствующие выводы.

Работы расположены по мере возрастания сложности изучаемого материала.

Каждая лабораторная работа содержит необходимые для её выполнения теоретические сведения, графический материал, позволяющий глубже понять суть изучаемого вопроса, а также способствующий изучению методики сборки электрических схем в практических условиях.

В процессе изучения данного учебного издания у обучающихся должны формироваться следующие профессиональные компетенции:

- готовность к участию в проведении исследований рабочих и технологических процессов машин;
- готовность к обработке результатов экспериментальных исследований.

Лабораторная работа №1

Исследование эквивалентного генератора постоянного тока

Цель работы: изучить назначение, схему и принцип работы эквивалентного генератора; исследовать возможные режимы работы и характеристики линейной электрической цепи постоянного тока (ЛЭЦПТ), содержащей эквивалентный генератор и нагрузку, соединенную по мостовой схеме.

Мостовая схема подключения нагрузки (в роли которой могут быть измерительные приборы) (рис. 1.1, а) используется для измерения относительного изменения сопротивления в одном из плеч моста. В этом случае через его диагональ будет протекать ток, а при разорванной цепи диагонали возникнет напряжение холостого хода. В качестве переменного сопротивления могут использоваться так же терморезисторы, тензометрические датчики, фоторезисторы и др. Мостовая схема может находиться в одном из четырех режимов: в уравновешенном (сбалансированном) состоянии; неуравновешенном (разбалансированном) состоянии; режиме холостого хода; режиме короткого замыкания.

В уравновешенном состоянии ток через диагональ моста I_n (ток нагрузки) не протекает $I_n = 0$ А (рис. 1.1, а).

В плечах моста может находиться одно или несколько переменных сопротивлений. В данном случае переменное сопротивление одно – омическое сопротивление R_1 (рис. 1.1, б).

Условие равновесия моста постоянного тока (рис. 1.2) определяется из соотношения равенства сопротивлений их плеч:

$$R_1^y \cdot R_{22} = R_{20} \cdot R_{23}. \quad (1.1)$$

Отсюда получаем величину уравновешивающего сопротивления в плече моста

$$R_1^y = \frac{R_{20} \cdot R_{23}}{R_{22}}, \quad \text{Ом.} \quad (1.2)$$

Нагрузкой моста R_n является сопротивление R_{24} . Величина сопротивления нагрузки определяется по закону Ома:

$$R_H = U_H / I_H, \text{ Ом.} \quad (1.3)$$

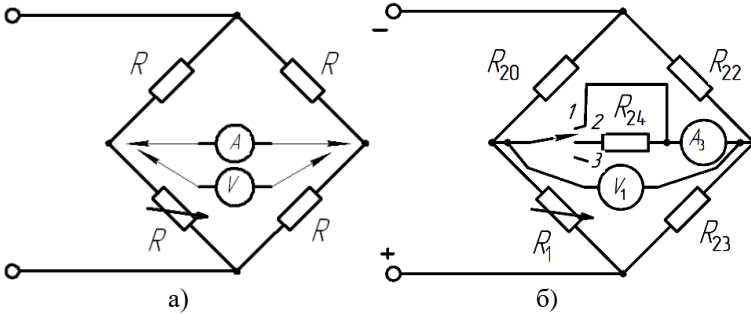


Рис. 1.1. Мостовые схемы подключения нагрузки:
а – принципиальная измерительная; б – с резистивной нагрузкой

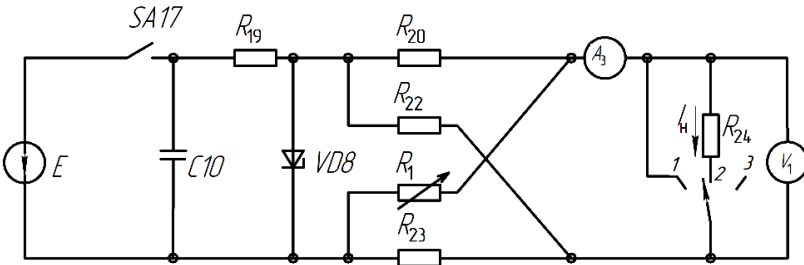


Рис. 1.2. Схема исследуемой мостовой цепи

Для удобства расчетов мостовую схему возможно заменить схемой эквивалентного генератора.

Для расчета параметров элементов схемы эквивалентного генератора необходимо теоретически или экспериментально получить величины напряжения холостого хода и короткого замыкания.

По этим данным можно рассчитать величину входного сопротивления моста относительно его нагрузки:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{хх}}}{I_{\text{к}}}, \text{ Ом.} \quad (1.4)$$

ЭДС эквивалентного генератора, в свою очередь, определится по зависимости:

$$E_{\Gamma} = I_{\text{H}}(R_{\text{H}} + R_{\text{вх}}), \text{ В.} \quad (1.5)$$

В результате получим схему эквивалентного генератора (рис. 1.3).

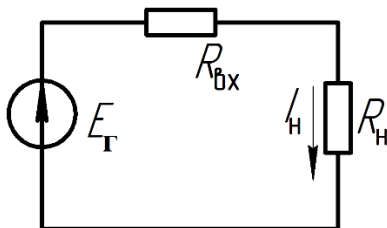


Рис. 1.3. Схема эквивалентного генератора

Задание. Изучить теоретические аспекты, соответствующие теме исследований данной работы, кратко законспектировать их в рабочую тетрадь. Исследовать характеристики электрической цепи, представляющей собой эквивалентный генератор с источником ЭДС, в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой. Исследовать зависимость напряжения на нагрузке от величины переменного сопротивления в одном из плеч моста, т.е. $U_{\text{н}} = f(R_1)$ и построить данную нагрузочную характеристику. Провести анализ результатов исследований и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

1) Необходимо считать со стенда в таблицу 1.1 технические данные измерительного моста R_{20} , R_{22} , R_{23} и провести расчет сопротивления R^y_1 , при котором мост будет находиться в уравновешенном состоянии.

2) Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 1.4). Включить стенд. Включить источник ЭДС тумблером SA7. Включить тумблеры SA 11 и SA3.

3) Установить переключатель SA13 в режим холостого хода (поз. «3»). В таком положении необходимо, с помощью ЛАТРа, установить напряжение на входе цепи (на стабилитроне) равным $U_{\text{ст}} = 12$ В. Напряжение контролируется с помощью мультиметра на стабилитроне. Сопротивление R_1 установить равным 10 кОм с помощью переключателя R1.

4) Вольтметром PV1 измерить напряжение U_{xx} и занести данные в таблицу 1.1.

5) Переключателем SA13 установить режим короткого замыкания (поз. «1»). Переключатель R1 установить на 8 кОм. Амперметром PA3 измерить ток I_k и данные занести в таблицу 1.1.

6) Переключатель SA13 установить в режим под нагрузкой (поз. «2»). По вольтметру PV1 и амперметру PA3 измерить величины напряжения и тока на нагрузке U_H, I_H и занести данные в таблицу 1.1. По ним, в последующем, рассчитать сопротивление нагрузки R_H (резистора R_{24}).

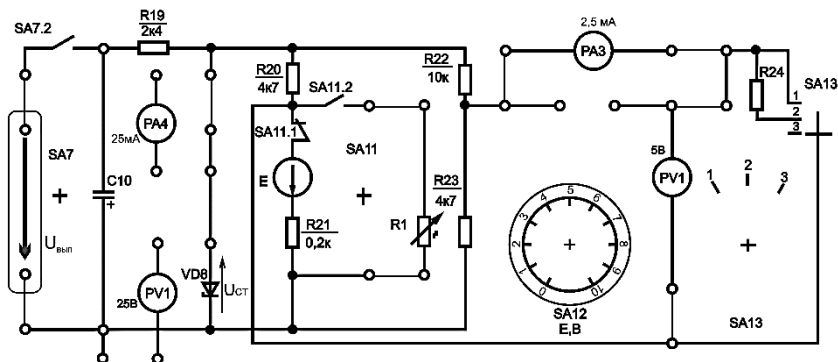


Рис. 1.4. Схема сборки исследуемой мостовой цепи

7) Переключателем SA13 снова установить режим короткого замыкания (поз. «1») и, изменяя величину сопротивления R_1 , с помощью блока переключателей R1 добиться состояния уравновешенности моста (ток в нагрузке должен быть равным нулю). Полученные значения величины R^{y_1} занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

*Результаты режимных исследований
эквивалентного генератора*

Исходные данные			Измерено					Рассчитано				
R_{20} , кОм	R_{22} , кОм	R_{23} , кОм	U_{xx} , В	I_k , А	U_H , В	I_H , А	R^{y_1} , Ом	R^y_1 , Ом	R_H , Ом	δ , %	R_{Bx} , Ом	$E_{Г}$, В

Первая часть эксперимента завешена, далее исследуется нагрузочная характеристика генератора.

8) Переключателем SA13 установить рабочий режим (SA13 в поз. «2»). Изменяя сопротивление R_1 переключателем R1

в интервале от 0 до 10 кОм, измерить величину U_n и данные занести в таблицу 1.2.

9) Провести необходимые расчеты (по формулам 1.2-1.5) и заполнить таблицы.

10) Расчет погрешности провести по формуле

$$\delta = \frac{R_1^y - R_1^{yэ}}{R_1^y} 100\% . \quad (1.6)$$

Таблица 1.2

Результаты исследования нагрузочной характеристики эквивалентного генератора $U_n = f(R_1)$

Установлено	R_1 , кОм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Измерено	U_n , В											

Вопросы для самоконтроля

1. Назначение мостовой схемы соединения нагрузки.
2. Перечислите возможные режимы работы мостовых схем.
3. Какие виды датчиков можно подключать к мостовой схеме?
4. Приведет ли короткое замыкание резистивного датчика к короткому замыканию электрической цепи? Поясните свой ответ.
5. Возможно ли из мостовой схемы (рис. 1.1, б) выделить схему «звезды» или «треугольника» сопротивлений? Поясните свой ответ.

Лабораторная работа №2

Исследование характеристик ЛЭЦПТ методом наложения токов

Цель работы: исследовать справедливость законов Кирхгофа для цепей с несколькими источниками ЭДС, принцип наложения токов, свойство взаимности ЛЭЦ и характеристики проводимостей ветвей.

К основным принципам и свойствам линейных электрических цепей относятся принципы независимости ветвей схемы и наложения токов.

Принцип независимости действия ЭДС формулируется следующим образом: в линейной электрической цепи действие, оказываемое каждой из ЭДС в отдельности, можно рассматривать независимо от действия других ЭДС цепи. На этом свойстве базируется *принцип наложения*: ток в любой k -й ветви электрической цепи можно рассматривать как алгебраическую сумму токов в этой же ветви от действия каждой из ЭДС цепи в отдельности.

Согласно методу наложения токов выражение для k -го тока ветви можно представить в виде

$$I_k = E_1 g_{k1} + E_2 g_{k2} + \dots + E_k g_{kk} + \dots + E_n g_{kn}, A. \quad (2.1)$$

Коэффициенты уравнения (2.1) постоянны, не зависят от токов и напряжений и имеют размерность проводимости. Коэффициенты с одинаковыми индексами (g_{kk}) называются собственными или входными проводимостями ветвей. Они численно равны току ветви при действии единичной ЭДС в 1 В, включенной в эту ветвь (рис. 2.1, б).

Величина, обратная входной проводимости, называется входным сопротивлением ветви.

$$g_{11} = \frac{I_{11}}{E_1}, \text{ См.} \quad (2.2)$$

$$R_{\text{вх}11} = \frac{1}{g_{11}}, \text{ Ом.} \quad (2.3)$$

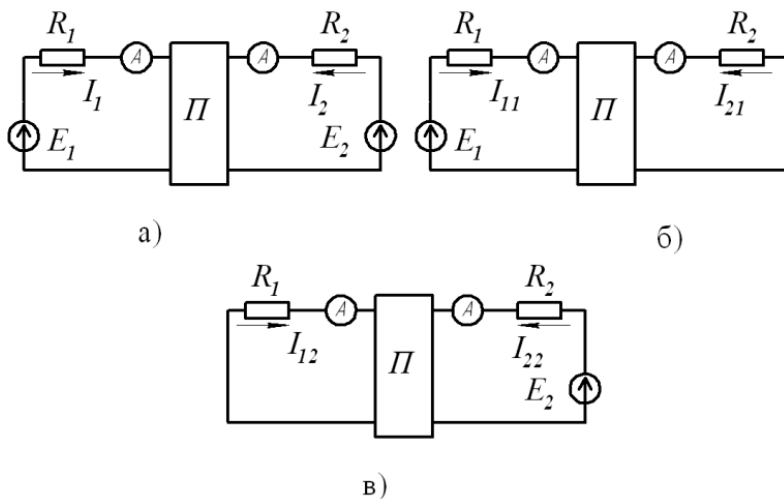


Рис. 2.1. Схемы для исследования принципа взаимности ЛЭЦ:
 а - исходная схема с двумя источниками ЭДС; б - источник ЭДС в 1-й ветви;
 в - источник ЭДС во 2-й ветви

Коэффициенты с разными индексами (g_{k1} , g_{kn}) называются передаточными или взаимными проводимостями. Так, g_{kn} есть взаимная проводимость k -й и n -й ветвей, она численно равна току в k -й ветви, возникающему от действия единичной ЭДС ($E = 1$ В), находящейся в n -й ветви. Для цепи (рис. 2.1, б) имеем

$$g_{21} = \frac{I_{21}}{E_1}, \text{ См.} \quad (2.4)$$

Взаимное сопротивление двух ветвей обратно пропорционально их взаимной проводимости. Взаимные проводимости определяются следующим образом:

$$g_{kn} = g_{nk} = \frac{1}{R_{kn}}, \text{ См.} \quad (2.5)$$

Входные и взаимные проводимости могут быть определены опытным или расчетным путём. При экспериментальном их определении измеряются токи в ветвях цепи от действия каждой из ЭДС в отдельности, а затем определяются собственные и взаимные проводимости.

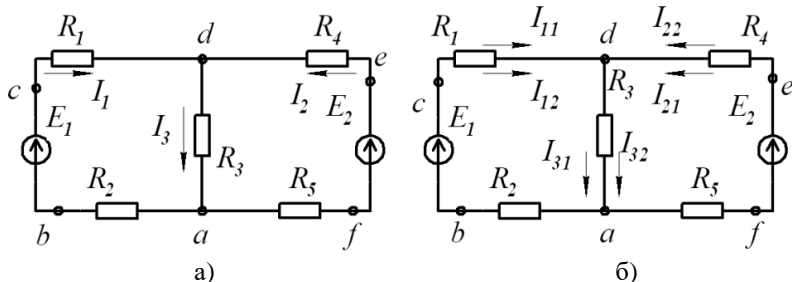


Рис. 2.2. Электрическая схема для исследования метода наложения: а – схема с полными токами ветвей; б – схема с частичными токами ветвей

Принцип наложения используется в методе расчета, получившем название *метода наложения*.

Порядок расчета методом наложения (рис. 2.2):

- ✓ Исходная схема разбивается на расчетные схемы, в каждой из которых действует одна ЭДС или один источник тока. Все остальные источники ЭДС или тока считаются отсутствующими, но в схеме сохраняются их внутренние сопротивления.

- ✓ Определяются частичные токи в ветвях каждой из вспомогательных расчетных схем.

- ✓ Для определения токов исходной схемы производится алгебраическое суммирование частичных токов расчетных схем для каждой ветви с учетом их знаков.

Принципом наложения нельзя пользоваться при вычислении мощностей, так как мощность – квадратичная функция тока или напряжения. Принцип наложения и принцип взаимности связаны между собой.

Принцип взаимности заключается в следующем: если некоторая ЭДС, находящаяся в какой-либо k -й ветви сколь угодно сложной линейной электрической цепи, вызывает ток в m -й ветви данной электрической цепи, то при отсутствии других ЭДС, та же ЭДС, будучи перенесенной в m -ветвь, вызовет в k -ветви ток, той же величины, что и во второй ветви.

Например, для схемы (рис. 2.1, б и 2.2, б) ток $I_{21} = g_{21} \cdot E_1$, а при перенесении ЭДС из первой ветви во вторую (рис. 2.1, в) ток $I_{12} = g_{12} \cdot E_2$, но так как $g_{21} = g_{12}$ и $E_1 = E_2$, то $I_{21} = I_{12}$.

Задание. Изучить исследуемые схемы. Провести замеры частичных токов ветвей по методу наложения. Провести расчеты полных токов ветвей, собственных и взаимных проводимостей ветвей. Рассчитать потенциалы характерных точек схемы (при работе обоих источников ЭДС E_1 и E_2) и построить потенциальную диаграмму.

Порядок выполнения работы.

1) Включить лабораторный стенд тумблером «Сеть». Тумблеры S_2 и S_3 должны находиться в положении «1». Измерить величину ЭДС первого источника E_1 , установить значение ЭДС E_2 равным E_1 с помощью ЛАТРА. Измерения величины ЭДС производить мультиметром. Результаты занести в таблицу 2.1.

2) Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 2.3).

3) Отключить источник ЭДС E_2 , переключив тумблер S_3 в положение «2», измерить значения токов I_{11} (по амперметру A_1 – переключка в положении «П2»), I_{21} (по амперметру A_1 – переключка в положении «П1»), I_{31} (по амперметру A_2). Включить источник ЭДС E_2 , переключив тумблер S_3 в положение «1», и отключить источник ЭДС E_1 переключив тумблер S_2 в положение «2», измерить значения токов I_{12} , (по амперметру A_1 – переключка в положении «П2»), I_{22} (по амперметру A_1 – переключка в положении «П1»), I_{32} (по амперметру A_2) в ветвях с учетом знаков. Результаты занести в таблицу 2.1.

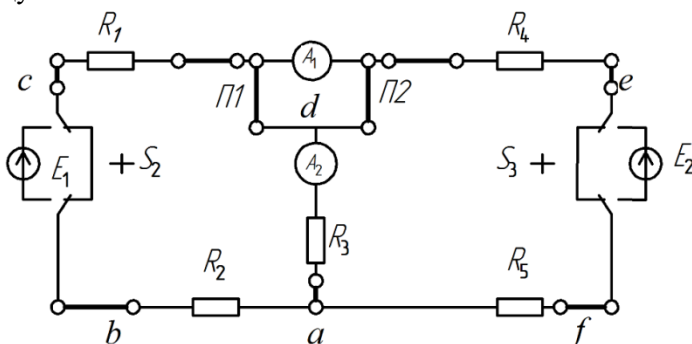


Рис. 2.3. Схема соединения исследуемой лабораторной цепи

4) Включить оба источника ЭДС, тумблеры S_2 и S_3 в положение «1», измерить полные токи I_1 , I_2 , I_3 (аналогично пункту 3) в ветвях цепи и занести все данные в таблицу 2.1.

5) Суммируя полученные данные по методу наложения, получить токи в ветвях I_{1p} , I_{2p} , I_{3p} и проверить достоверность метода наложения. Результаты расчета занести в таблицу 2.2.

6) На основании экспериментальных данных вычислить собственные g_{11} , g_{22} , g_{33} и взаимные g_{12} , g_{21} , g_{31} , g_{32} проводимости ветвей. Полученные данные занести в таблицу 2.2.

$$\left. \begin{aligned} g_{11} &= \frac{I_{11}}{E_1}, \text{См}; g_{12} = g_{21} = \frac{I_{12}}{E_2}, \text{См}; g_{22} = \frac{I_{22}}{E_2}, \text{См}; \\ g_{31} &= \frac{I_{31}}{E_1}, \text{См}; g_{32} = \frac{I_{32}}{E_2}, \text{См}; g_{33} = g_{31} + g_{32}, \text{См}. \end{aligned} \right\} (2.6)$$

7) Рассчитать погрешность измерений, по формуле, приведенной в таблице 2.2.

Таблица 2.1

Результаты измерений по методу наложения

E_1 , В	E_2 , В	I_{11} , А	I_{21} , А	I_{31} , А	I_{12} , А	I_{22} , А	I_{32} , А	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А

Таблица 2.2

*Результаты расчетов по методу наложения
и принципу взаимности*

I_{1p} , А	I_{2p} , А	I_{3p} , А	g_{11} , См	g_{22} , См	$g_{12} = g_{21}$, См	g_{31} , См	g_{32} , См	g_{33} , См	$\delta = (I_1 - I_{1p})/I_1$

8) Построить потенциальную диаграмму схемы для режима работы цепи при обоих включенных источниках ЭДС. Сопротивления участков цепи принять равными: $R_{ab} = 52,4 \text{ Ом}$; $R_{bc} = 7,6 \text{ Ом}$; $R_{cd} = 52,4 \text{ Ом}$; $R_{da} = 167 \text{ Ом}$; $R_{de} = 158 \text{ Ом}$; $R_{ef} = 10 \text{ Ом}$; $R_{fa} = 200 \text{ Ом}$.

Вопросы для самоконтроля

1. На каком принципе основан метод наложения?
2. Поясните, что такое собственные и взаимные проводимости ветвей, каким образом они определяются экспериментально?
3. Укажите порядок расчета цепи методом наложения.
4. Сформулируйте принцип взаимности.
5. Возможно ли использовать метод наложения если цепь невзаимная?

Лабораторная работа № 3

Исследование процесса передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке

Цель работы: исследовать процесс передачи мощности от активного двухполюсника постоянного тока к нагрузке и характеристики данного процесса.

Активный двухполюсник, содержащий в своем составе какие-либо источники энергии, относительно своих выводных зажимов является генератором для какой-либо внешней электрической цепи (нагрузки).

Активный двухполюсник может работать в трех основных режимах:

- холостого хода, при котором ток нагрузки равен нулю $I_H = 0$ А, а напряжение на нагрузке имеет максимальное значение $U_H = \max$;
- короткого замыкания, при котором ток нагрузки имеет максимальное значение $I_H = \max$, а напряжение на нагрузке равно нулю $U_H = 0$ В;
- под нагрузкой, при которой ток и напряжения имеют определенные величины.

Работа в режиме под нагрузкой может быть двух типов:

- режим согласованной нагрузки, при котором сопротивление нагрузки R_H равно входному сопротивлению $R_{вх}$ активного двухполюсника. Нагрузке передается наибольшая полезная мощность при КПД передачи равном 0,5;
- режим оптимальной нагрузки, при котором обеспечиваются наилучшие условия передачи мощности от активного двухполюсника нагрузке. В этом случае КПД может достигать значений 0,95-0,97, при этом величина передаваемой мощности ниже, чем при согласованном режиме.

При известных обобщенных параметрах активного двухполюсника ток в выделенной ветви, например ветви «ав» (рис. 3.1, а), определяется по формуле

$$I_H = \frac{U_{xx}}{R_{вх} + R_H}, \text{ А.} \quad (3.1)$$

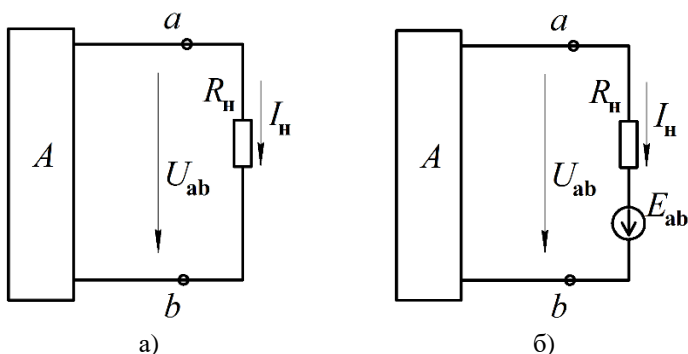


Рис. 3.1. Схемы активных двухполюсников с нагрузками: а – с пассивной ветвью нагрузки; б – с активной ветвью нагрузки

Если в ветви нагрузки имеется источник ЭДС (рис. 3.1, б), то ток в ветви определяется с учетом влияния этого источника. Знак «плюс» ставится в том случае, если направление источника ЭДС совпадает с направлением тока, иначе – знак «минус».

$$I_n = \frac{U_{xx} \pm E_{ab}}{R_{вх} + R_n}, \text{ А.} \quad (3.2)$$

Мощность, выделяющаяся в нагрузке, определяется по формуле

$$P_n = U_{ab} \cdot I_n = I_n \cdot R_n \cdot I_n = I_n^2 \cdot R_n, \text{ Вт.} \quad (3.3)$$

Учитывая выражение (3.1) получим

$$P_n = \frac{U_{xx}^2}{(R_{вх} + R_n)^2} R_n, \text{ Вт.} \quad (3.4)$$

Из полученной зависимости видно, что функция мощности является нелинейной, а квадратичной. Поэтому необходимо выяснить, каково должно быть соотношение между сопротивлением нагрузки R_n и сопротивлением двухполюсника $R_{вх}$, чтобы в сопротивлении нагрузки выделялась максимальная мощность. Для этого необходимо определить первую производную мощности P_n по сопротивлению R и приравнять ее к нулю:

$$\frac{dP}{dR} = \frac{(R_H + R_{BX})^2 - 2R_H(R_H + R_{BX})}{(R_H + R_{BX})^4} = 0. \quad (3.5)$$

Дробь будет равна нулю, если ее числитель равен нулю:

$$(R_H + R_{BX})^2 - 2R_H(R_H + R_{BX}) = 0. \quad (3.6)$$

Решив данное уравнение, получаем, что $R_H = R_{BX}$. То есть данное равенство соответствует максимуму функции $P_H = f(R_H)$.

Таким образом, выражение (3.4), с учетом полученного равенства, характеризует величину максимальной мощности, которая может быть передана от активного двухполюсника к нагрузке:

$$P_{\max} = \frac{U_{XX}^2}{4R_{BX}}, \text{ Вт.} \quad (3.7)$$

Полная мощность, выделяемая активным двухполюсником, составит

$$P_{\text{полн}} = U_{XX} \cdot I_H = \frac{U_{XX}^2}{R_H + R_{BX}}, \text{ Вт.} \quad (3.8)$$

Коэффициент полезного действия процесса передачи энергии составит

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\text{полн}}} = \frac{R_H}{R_H + R_{BX}}. \quad (3.9)$$

Анализируя данное выражение очевидно, что если $R_H = R_{BX}$, то КПД передачи составит $\eta = 0,5$.

Задание. Изучить схему исследуемого двухполюсника с нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров процесса передачи мощности от активного двухполюсника к омической нагрузке. По результатам измерений провести необходимые расчеты параметров процесса передачи и построить требуемые графики. Провести анализ графиков и результатов эксперимента, сформулировать выводы.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать электрическую схему исследуемого активного двухполюсника по рисунку 3.2.

2) Временно отсоединить перемычку, ведущую к резистору R_{17} . Включить стенд и установить с помощью ЛАТРа напряжение на выходе активного двухполюсника равным 20 В (по вольтметру V1). Записать показания приборов в режиме холостого хода U_{xx} .

3) Установить сопротивление нагрузки равным 100 Ом (левый переключатель блока R17) и установить на место перемычку, ведущую к резистору R_{17} . Провести измерения по приборам (напряжение U_n по вольтметру V2, а ток I_n по амперметру A1). Далее установить сопротивление нагрузки равным 90 Ом и провести аналогичные измерения. Результаты измерений занести в таблицу 3.1.

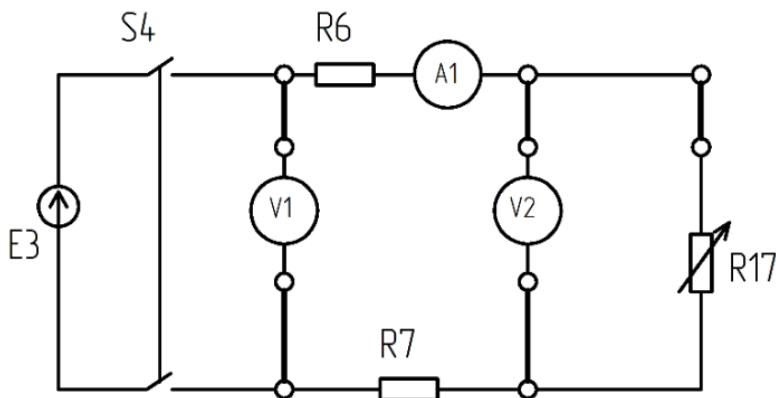


Рис. 3.2. Схема подключения лабораторной установки для исследования процесса передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке

4) Провести расчеты необходимых параметров процесса передачи мощности ($P_{полн}$ по зависимости (3.8), а P_n по зависимости (3.3)). Результаты занести в таблицу 3.1. Величину КПД рассчитать по формуле (3.9).

5) Рассчитать величину входного сопротивления двухполюсника по данным опыта короткого замыкания (КЗ):

$$R_{вх} = \frac{U_n}{I_n}, \text{ Ом}, \quad (3.10)$$

6) По данным таблицы 3.1 построить графики функций $P_{полн} = f(I_n)$, $P_n = f(I_n)$, $\eta = f(I_n)$ в одних координатных осях.

Исследуя графики, проанализировать режимы работы активного двухполюсника и сделать выводы.

Таблица 3.1

Результаты эксперимента по исследованию процесса передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке

Установлено	Измерено			Рассчитано		
R_n , Ом	U_{xx} , В	U_n , В	I_n , А	$P_{полн.}$, Вт	P_n , Вт	η
∞ (холостой ход)	20					
100						
90						
80						
70						
60						
50						
40						
30						
20						
10						
0 (КЗ)						

Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение понятию «активный двухполюсник».
2. Какова зависимость КПД передачи от сопротивления нагрузки?
3. Какова зависимость мощности, выделяемой в нагрузке, от ее сопротивления?
4. Каким образом можно повысить КПД передачи мощности?
5. В каких случаях необходимо повышать КПД передачи, а в каких необходимо передавать максимальную мощность, но с КПД равным 0,5?

Лабораторная работа № 4

Исследование характеристик линии электропередачи синусоидального тока

Цель работы: изучить устройство линии электропередачи (ЛЭП) синусоидального тока и исследовать ее характеристики и режимы работы, а также влияние параметров нагрузки на режимы работы ЛЭП.

Линия электропередачи предназначена для транспортирования электрической энергии на необходимое расстояние с необходимым уровнем мощности. Линия электропередачи (ЛЭП) содержит такие основные элементы, как опоры, изоляторы и подвешенные на них (или крепящиеся к ним) провода, арматуру. Так как провода ЛЭП расположены относительно близко друг к другу и параллельно между собой, то такая конструкция представляет собой сложную систему, обладающую определенной емкостью и индуктивностью.

Вследствие этого электрическое сопротивление содержит кроме активных составляющих еще и реактивные составляющие (емкостную и индуктивную). То есть реальное сопротивление линии больше активного сопротивления ее проводов. Наличие емкости и индуктивности приводит так же к возникновению переходных процессов и искажению синусоидальности тока. Эквивалентная схема замещения ЛЭП низкого напряжения с активно-индуктивной нагрузкой представлена на рисунке 4.1.

Активное сопротивление проводов линии зависит от удельного сопротивления ρ материала, из которого изготовлен провод, его температуры t и величины поперечного сечения провода F . Сопротивление провода ЛЭП составит

$$R = \rho \frac{l}{F}, \text{ Ом}, \quad (4.1)$$

где l – длина провода ЛЭП, м.

Удельное сопротивление ρ зависит от температуры провода и постоянно меняется, вследствие изменения температуры окружающей среды. Поэтому необходима корректировка величины удельного сопротивления провода от температуры:

$$\rho = \rho_{20} (1 + 0,004(t - 20)), \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}, \quad (4.2)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление провода при его температуре равной 20°C , Ом·мм²/м.

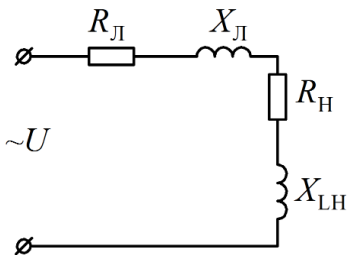


Рис. 4.1. Схема замещения ЛЭП с нагрузкой

Индуктивное сопротивление одной фазы ЛЭП определяется противодействием ЭДС самоиндукции и влиянием ЭДС взаимной индукции соседних фаз. Взаимоиндукция частично компенсирует ЭДС самоиндукции, и, как следствие, результирующее индуктивное сопротивление фазы снижается

$$X = X_L - X_M, \text{ Ом}, \quad (4.3)$$

где X_L и X_M – индуктивные сопротивления само- и взаимной индукции соответственно, Ом.

С увеличением расстояния между фазами взаимная индуктивность ослабевает, т.е. $X_M \rightarrow 0$. Поэтому $X \rightarrow X_L$.

Линии электропередачи имеют, как правило, большую протяженность, поэтому их параметры определяют в погонном выражении (на один километр длины линии). Так, погонное индуктивное сопротивление определяется по общей зависимости:

$$x_0 = \omega \left(4,6 \lg \frac{2D_{\text{cp}}}{d} + 0,5 \mu \right) 10^{-4}, \text{ Ом/км}, \quad (4.4)$$

где $\omega = 2\pi f = 314$ – круговая частота, с⁻¹;

D_{cp} – среднегеометрическое расстояние между фазами, мм;

d – диаметр провода, мм;

μ – относительная магнитная проницаемость материала провода.

Для проводов из цветных металлов (медь, алюминий) $\mu \approx 1$, поэтому формула (4.4) примет вид

$$x_0 = 0,144 \lg \frac{2D_{\text{cp}}}{d} + 0,0156, \text{ Ом/км}. \quad (4.5)$$

В конце ЛЭП к ней подключена какая-либо нагрузка. Поэтому, требуемыми параметрами для расчета ЛЭП являются величина напряжения и мощности на нагрузке соответственно U_H , P_H , а также мощность и напряжение в начале линии, соответственно U и P . Ток на нагрузке равен I .

Параметры нагрузки определяются любым известным расчетным методом. Получив параметры нагрузки необходимо определить ее коэффициент мощности $\cos\varphi_H$. В том случае если он окажется менее 0,7, его необходимо повысить до некоторого требуемого значения $\cos\varphi_{ТР}$, подключив батарею конденсаторов.

В этом случае суммарный коэффициент мощности цепи повысится (рис. 4.2).

Расчет величины необходимой емкости конденсаторов производится следующим образом. Если нагрузка имеет некоторую активно-индуктивную мощность P и Q_L , то ее необходимо компенсировать емкостной мощностью Q_C , которая определяется по зависимости:

$$Q_C = \frac{U_H^2}{X_C^2} X_C = \frac{U_H^2}{X_C} = U_H^2 \omega C, \text{ вар.} \quad (4.6)$$

В свою очередь коэффициенты активной и реактивной мощностей соответственно равны:

$$\cos\varphi_H = \frac{P_H}{S_H}, \quad \sin\varphi_H = \frac{Q_H}{S_H}, \quad (4.7)$$

тогда составим выражение тангенса угла сдвига по фазе:

$$\operatorname{tg}\varphi_H = \frac{\sin\varphi_H}{\cos\varphi_H} = \frac{Q_H}{P_H} = \frac{U_H^2}{\omega L P_H}. \quad (4.8)$$

Если необходимо повысить коэффициент мощности до некоторой требуемой величины, то необходимо рассчитать параметры батареи конденсаторов.

Тангенс требуемого угла сдвига по фазе определяется по выражению:

$$\operatorname{tg}\varphi_{ТР} = \frac{Q_H - Q_C}{P_H} = \frac{Q_H}{P_H} - \frac{Q_C}{P_H} = \operatorname{tg}\varphi_H - \frac{Q_C}{P_H}, \quad (4.9)$$

отсюда получаем величину необходимой емкостной мощности батареи конденсаторов:

$$Q_C = P_H(\operatorname{tg}\varphi_H - \operatorname{tg}\varphi_{ТР}), \text{ вар.} \quad (4.10)$$

С учетом выражения (4.6) находим величину емкости батареи конденсаторов:

$$C = \frac{P_H}{\omega U_H^2} (\operatorname{tg} \varphi_H - \operatorname{tg} \varphi_{TP}), \text{ Ф.} \quad (4.11)$$

Для удобства расчетов необходимо перейти от тангенсов к коэффициенту мощности. Получим:

$$C = \frac{P_H}{\omega U_H^2} \left(\frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H}}{\cos \varphi_H} - \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{TP}}}{\cos \varphi_{TP}} \right) \cdot 10^6, \text{ мкФ.} \quad (4.12)$$

Суть процесса повышения коэффициента мощности поясняется векторной диаграммой (рис. 4.2). Падение напряжения на емкостном элементе U_C противоположно по направлению падению напряжения на индуктивности нагрузки U_L и частично его компенсирует.

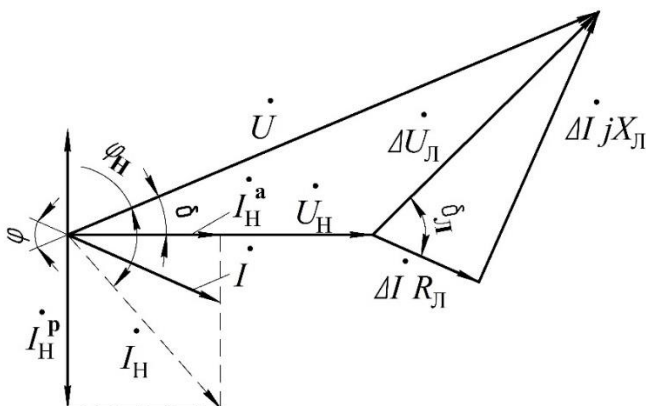


Рис. 4.2. Векторная диаграмма напряжений ЛЭП под нагрузкой

В результате этого величина напряжения в начале линии U снижается, угол φ также уменьшается, а коэффициент мощности $\cos \varphi$ повышается.

Опасным моментом в процессе повышения коэффициента мощности является создание резонанса токов между индуктивным потребителем и емкостным элементом, искусственно подключенным к потребителю. В этом случае реактивные токи, проходящие через емкостные элементы, возрастают, что может привести к их перегреву.

Расчет значения емкости C , при котором в цепи наступит резонанс токов (при условии равенства их реактивных проводимостей $b_L = b_C$) производится по зависимости

$$C = \frac{L_H \cdot 10^6}{R_H^2 + \omega^2 L_H^2}, \text{ мкФ.} \quad (4.13)$$

Преобладающим характером собственного сопротивления ЛЭП является индуктивное сопротивление. В том случае если емкость конденсаторов окажется выше резонансной емкости, возникает ситуация близкая к резонансу напряжений между емкостью, присоединенной к нагрузке, и индуктивностью самой ЛЭП.

В этом случае реактивное сопротивление нагрузки и ЛЭП резко снижается, а ток в проводах ЛЭП резко возрастает, что негативно сказывается на ее эксплуатационных характеристиках.

В процессе передачи электроэнергии ее часть тратится на тепловые потери в активных сопротивлениях проводов линии, а также индуктивное сопротивление току линии создает некоторую величину падения напряжения на длине линии, в итоге передаваемая мощность снижается. Величина снижения передаваемой мощности характеризуется коэффициентом полезного действия (КПД) ЛЭП.

КПД линии представляет собой отношение активной мощности в конце ЛЭП к активной мощности в начале ЛЭП. Таким образом получаем

$$\eta = \frac{P_H}{P}, \quad (4.14)$$

где P – мощность в начале линии, Вт.

Активная мощность в конце линии составляет

$$P_H = S_H \cos \varphi_H = U_H I \cos \varphi_H, \text{ Вт.} \quad (4.15)$$

Коэффициент мощности нагрузки, в общем случае, можно определить по зависимости (4.16).

Задание. Изучить схему подключения исследуемой ЛЭП с нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести необходимые расчеты характеристик ЛЭП и нагрузки, а далее построить их совместную векторную диаграмму (в режиме компенсации реактивной мощности).

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему (рис. 4.3) для определения параметров индуктивно-активной нагрузки.

ВНИМАНИЕ! Тумблер SA4 должен находиться в выключенном положении на протяжении всего времени выполнения работы (рычажок – вниз)!

2) Включить лабораторный стенд и испытываемую схему (SA3 в положение вверх). Установить напряжение нагрузки $U_H = 110$ В. Провести замеры параметров нагрузки. Отключить стенд. Полученные значения занести в таблицу 4.1.

3) Рассчитать значения сопротивлений нагрузки X_{LH} , R_H , а также коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_H$ и индуктивность по формулам (4.16). Полученные данные занести в таблицу 4.1.

$$\left. \begin{aligned} R_H &= \frac{P_H}{I_H}, \text{ Ом}, \quad Z_H = \frac{U_H}{I_H}, \text{ Ом}, \quad \cos \varphi_H = \frac{R_H}{Z_H} \\ X_{LH} &= \sqrt{Z_H^2 - R_H^2}, \text{ Ом}, \quad L_H = \frac{X_{LH}}{2\pi f}, \text{ Гн}. \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

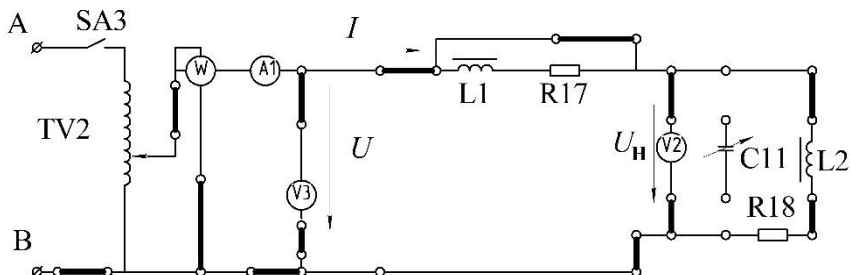


Рис. 4.3. Схема подключения нагрузки для определения ее параметров

4) Определить расчетным путем значение емкости конденсатора $C = C_{11}$ для повышения коэффициента мощности нагрузки до значения $\cos \varphi_{гр}$, заданного преподавателем. Полученные в расчете значения занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

Результаты исследования характеристик активно-индуктивной нагрузки

Исходные данные		Измерено		Расчитано					
U_H , В	$\cos \varphi_{гр}$	I_H , А	P_H , Вт	R_H , Ом	Z_H , Ом	X_{LH} , Ом	L_H , Гн	$\cos \varphi_H$	S_H , ВА
110									

Результаты исследования характеристик ЛЭП

Исходные данные	Измерено		Рассчитано				
	I_L, A	$P_L, Вт$	$R_L, Ом$	$Z_L, Ом$	$X_{LЛ}, Ом$	$L_L, Гн$	$\cos \varphi_L$
110							

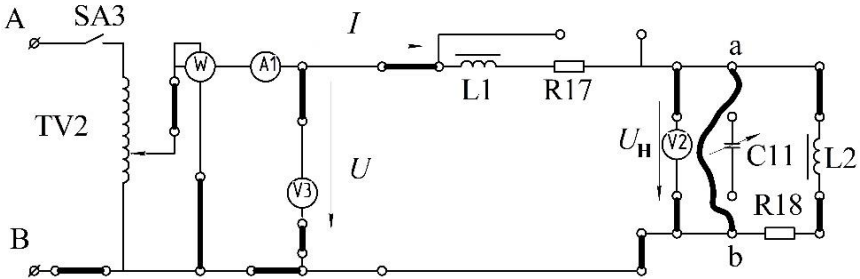


Рис. 4.4. Схема для определения параметров ЛЭП

5) Собрать схему (рис. 4.4) для определения параметров линии электропередачи.

6) Включить лабораторный стенд и испытываемую схему (SA3 в положение вверх). Установить напряжение на входе цепи $U = 50 В$. Провести замеры параметров линии. Отключить стенд. Полученные значения занести в таблицу 4.2.

7) Рассчитать значения сопротивлений линии $X_{LЛ}$, R_L , а также коэффициент мощности ЛЭП $\cos \varphi_L$ и индуктивность по формулам (4.16) (вместо индекса «н» необходимо подставить индекс «л»). Полученные данные занести в таблицу 4.2.

8) Собрать схему подключения активно-индуктивно-емкостной нагрузки через индуктивно-активную ЛЭП (рис. 4.5).

9) Включить лабораторный стенд. Изменяя емкость C_{11} и поддерживая $U_H = 110 В$, провести измерения необходимых параметров цепи. Полученные данные занести в таблицу 4.3.

10) Провести необходимые вычисления и заполнить таблицу 4.3 (параметр P_H берется из таблицы 4.1).

11) Построить зависимости $I = f(C)$, $U = f(C)$, $P = f(C)$, $\cos \varphi = f(C)$, $\cos \varphi_H = f(C)$, $\eta = f(C)$ (все в одной координатной системе).

12) Построить векторную диаграмму ЛЭП с активно-индуктивной нагрузкой, аналогичную диаграмме, приведенной на рисунке 4.2.

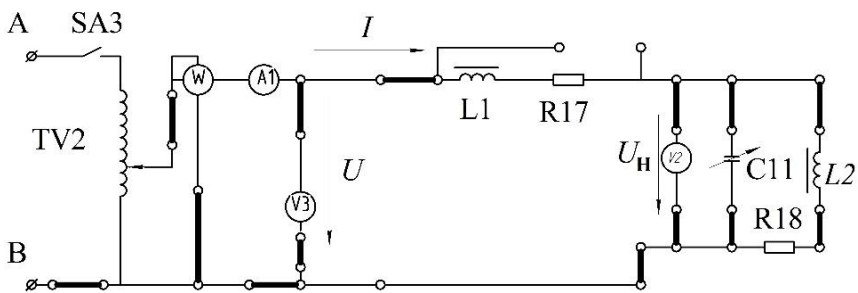


Рис. 4.5. Схема подключения ЛЭП с активно-индуктивной нагрузкой и батареей конденсаторов

Таблица 4.3

Результаты исследования характеристик ЛЭП
с активно-индуктивной нагрузкой

Установлено							
C , мкФ	5	10	15	20	25	30	35
U_H , В	110						
Измерено							
I , А							
U , В							
P , Вт							
Рассчитано							
$P_H = I^2 \cdot R_H$, Вт							
$S = U \cdot I$, ВА							
$\cos \varphi = P/S$							
$\eta = P_H/P$							

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислить виды мощностей для цепи переменного тока.
2. Вследствие каких процессов в ЛЭП образуются реактивные токи?
3. Дать определение понятию «коэффициент мощности $\cos \varphi$ ».
4. Дать определение понятию «КПД ЛЭП».
5. Каким способом повысить коэффициент мощности $\cos \varphi$, если нагрузка имеет активно-емкостный характер?

Лабораторная работа №5

Исследование ЛЭЦ трехфазного тока, соединенной по схеме «звезда» с нулевым проводом

Цель работы: изучить схемы цепей трехфазного тока; исследовать характеристики и режимы работы цепи трехфазного тока при соединении нагрузки по схеме «звезда» с нулевым проводом, при симметричной и несимметричной нагрузках фаз.

Если сопротивление нулевого провода в схеме (рис. 5.1) незначительное, то потенциал точки n практически равен потенциалу точки N . Фактически они представляют собой одну общую точку. При этом в схеме можно выделить три независимых (в случае симметричной нагрузки) контура, по которым проходят линейные токи:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_A}, \text{ A}, \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{\underline{Z}_B}, \text{ A}, \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{\underline{Z}_C}, \text{ A}. \quad (5.1)$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток в нулевом проводе равен геометрической сумме токов линейных проводов (они же фазовые токи, в данном случае)

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (5.2)$$

Если нагрузка является *равномерной*, то есть сопротивления фаз равны, как по модулю, так и по углу сдвига по фазе

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C, \quad (5.3)$$

то ток нулевого провода будет равен нулю. Если сопротивление нагрузки не равномерное, то ток нулевого провода не равен нулю и контуры будут являться смежными, через ветвь $N-n$. В этом случае расчет цепи удобнее проводить методом узловых потенциалов.

Напряжение между началом и концом фазы называется фазным U_ϕ . Напряжение между линейными проводами называются линейным U_L . При соединении нагрузки по схеме «звезда», фазные и линейные токи равны $I_L = I_\phi$, а линейные и фазные напряжения различаются в корень из трех раз

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

Для удобства расчета трехфазных систем введено понятие оператора трехфазной системы альфа « α ».

Например, если при симметричной системе ЭДС генератора, ЭДС в одной фазе (например фазе А) равна \dot{E}_A , то

$$\dot{E}_B = \alpha^2 \dot{E}_A, \text{ В}; \quad \dot{E}_C = \alpha \dot{E}_A, \text{ В}, \quad (5.5)$$

где α – оператор трехфазной системы.

Оператор трехфазной системы является комплексным числом, по модулю равным единице:

$$\alpha = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\sqrt{\frac{3}{2}}. \quad (5.6)$$

Умножение комплексного числа на оператор α , поворачивает вектор данного комплексного числа на угол 120° в положительном направлении (против часовой стрелки). Поэтому данный оператор называют также оператором поворота.

Двойной поворот является, по своей сути, поворотом в отрицательном направлении

$$\alpha^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}. \quad (5.7)$$

Таким образом, три вектора – 1, α и α^2 – образуют симметричную систему векторов (трехфазную систему). Геометрическая сумма данных векторов равна нулю:

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0. \quad (5.8)$$

Линейное напряжение при симметричной нагрузке больше фазного в корень из трех раз:

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi. \quad (5.9)$$

Кроме того, линейное напряжение при симметричной нагрузке опережает фазное на 30° градусов, поэтому в комплексной форме выражение (5.9) будет иметь вид:

$$\dot{U}_L = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_\phi \cdot e^{j30^\circ}. \quad (5.10)$$

При несимметричной нагрузке между нейтральной точкой генератора N и нейтральной точкой приемника n появляется напряжение (вследствие наличия сопротивления нейтрального провода):

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \underline{Y}_A + \dot{E}_B \underline{Y}_B + \dot{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_{Nn}}, \text{ В}. \quad (5.11)$$

Однако при любой нагрузке справедливо равенство:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = 0 \text{ В.} \quad (5.12)$$

При отсутствии нейтрального провода в выражении (5.11) необходимо проводимость нейтрального провода принять $Y_n = 0$.

Фазные напряжения U_{An} , U_{Bn} , U_{Cn} , при несимметричной нагрузке, не равны по величине и сдвинуты относительно друг друга на разные углы. Напряжения на фазах приемника определяются из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{An} &= \dot{E}_A - \dot{U}_{Nn}, \text{ В,} \\ \dot{U}_{Bn} &= \dot{E}_B - \dot{U}_{Nn}, \text{ В,} \\ \dot{U}_{Cn} &= \dot{E}_C - \dot{U}_{Nn}, \text{ В.} \end{aligned} \right\} \quad (5.13)$$

Токи в фазах приемника составляют:

$$\dot{I}_A = \underline{Y}_A \cdot \dot{U}_{An}, \text{ А,} \quad \dot{I}_B = \underline{Y}_B \cdot \dot{U}_{Bn}, \text{ А,} \quad \dot{I}_C = \underline{Y}_C \cdot \dot{U}_{Cn}, \text{ А.} \quad (5.14)$$

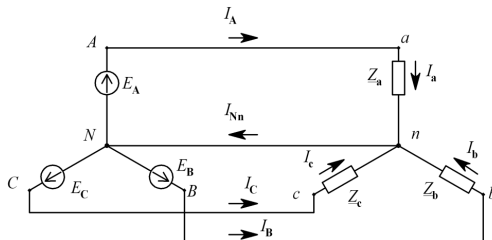


Рис. 5.1. Схема «звезда» с нулевым проводом для соединения трехфазной электрической цепи

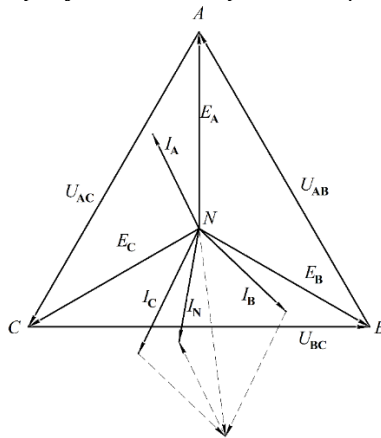


Рис. 5.2. Векторная диаграмма трехфазной системы при неравномерной нагрузке

Задание. Изучить схему подключения исследуемой ЛЭЦ трехфазного тока с различными видами нагрузки. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемой цепи, а далее построить ее векторную диаграмму (в режиме несимметричной RLC).

Порядок выполнения работы

1) По схеме, приведенной на рисунке 5.3, собрать электрическую цепь с нагрузкой, соединенной по схеме «звезда» с нейтральным проводом.

2) Включить лабораторный стенд (тумблером «Сеть»). Включить тумблер S13.

3). Провести измерения параметров работы цепи по приборам стенда и занести полученные показания в таблицу 5.1.

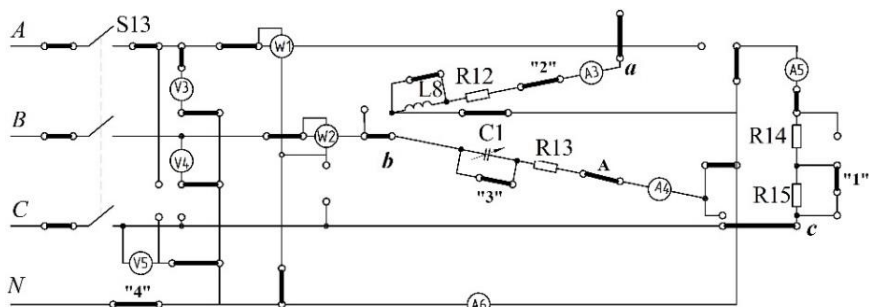


Рис. 5.3. Схема подключения лабораторной установки

Таблица 5.1

Результаты эксперимента по определению характеристик ЛЭЦТ, собранной по схеме «звезда» с нулевым проводом

№ п/п	Измерено							Вычислено					Характер нагрузки	
	U_L , В	U_A , В	U_B , В	U_C , В	I_A , А	I_B , А	I_C , А	I_N , А	P, Вт	S, ВА	$\cos \varphi$	$\frac{U_L}{U_A}$		φ , град.
1.														Равномерная R
2.														Неравномерная R
3.														Неравномерная R, L, C
4.														Обрыв фазы

4) Установить неравномерную активную нагрузку. Для этого убрать переключку «1». Выполнить действия аналогичные пункту 3.

5) Создать неравномерную несимметричную нагрузку убрав переключки «2» и «3». Величину емкости С1 установить по указанию преподавателя. Провести действия согласно пункту 3.

6) Отсоединить одну из фазных переключек. Провести действия согласно пункту 3.

7) Рассчитать коэффициент мощности трехфазной системы $\cos \varphi$, и усредненное значение угла сдвига по фазе φ :

$$\left. \begin{aligned} S &= U_A \cdot I_A + U_B \cdot I_B + U_C \cdot I_C, \text{ ВА,} \\ \cos \varphi &= \frac{P}{S}, \\ \varphi &= \arccos \varphi, \text{ град.} \end{aligned} \right\} \quad (5.15)$$

8) По данным таблицы 5.1 построить векторные диаграммы напряжений и токов в различных режимах работы цепи.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите способы соединения фаз источника ЭДС и нагрузки в трехфазной цепи.

2. Начертите векторные диаграммы симметричных систем напряжений прямой и обратной последовательностей.

3. Поясните назначение нейтрального провода при несимметричной нагрузке.

4. Каковы соотношения между фазными и линейными напряжениями при соединении потребителей по схеме «звезда» при симметричной и несимметричной нагрузках?

5. Как аналитически определить напряжение между нейтральными точками генератора и потребителя?

Лабораторная работа №6

Исследование ЛЭЦ трехфазного тока, соединенной по схеме «треугольник», при изменении характера нагрузок в фазах

Цель работы: изучить схемы цепей трехфазного тока; исследовать характеристики и режимы работы цепи трехфазного тока при соединении нагрузки по схеме «треугольник», при изменении характера нагрузок в фазах.

При соединении нагрузки по схеме «треугольник» фазные и линейные напряжения одинаковы по модулю $U_{\Phi} = U_{\Delta}$.

То есть на каждую фазу нагрузки приходится линейное напряжение (рис. 6.1). Поэтому фазные токи рассчитываются по закону Ома:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \text{ A}, \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}, \text{ A}, \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}, \text{ A}. \quad (6.1)$$

Линейные токи определяются суммой фазных токов, сходящихся в тех же узлах, что и искомые соответствующие токи.

Таким образом, линейные токи определяются на основании первого закона Кирхгофа, а именно:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \text{ A}, \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \text{ A}, \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}, \text{ A}. \end{cases} \quad (6.2)$$

При равномерной нагрузке фаз (рис. 6.1) модули линейных токов больше модулей фазных токов, а система симметрична (рис. 6.2). Например, при равномерной активной нагрузке, фазные токи совпадают по фазе с линейными напряжениями, а линейные токи опережают линейные напряжения на угол в 30° :

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{\Phi}, \text{ A}. \quad (6.3)$$

В том случае, если нагрузка не симметрична ($\varphi_{AB} \neq \varphi_{BC} \neq \varphi_{CA}$), то вся система трехфазных токов становится несимметричной

(рис. 6.3). При обрыве одного из линейных проводов трехфазная система превращается в однофазную.

Короткое замыкание одной из фаз потребителя приводит к резкому увеличению фазного и линейных токов и является аварийным режимом.

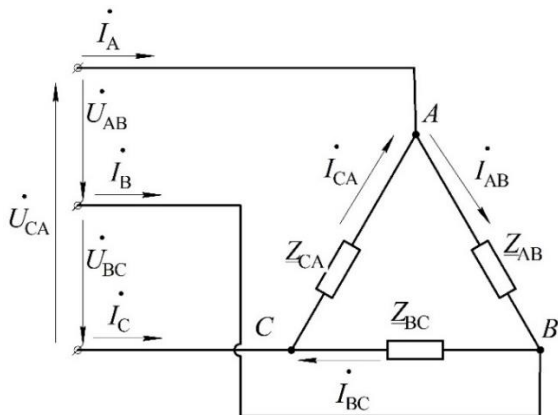


Рис. 6.1. Соединение нагрузки по схеме «треугольник»

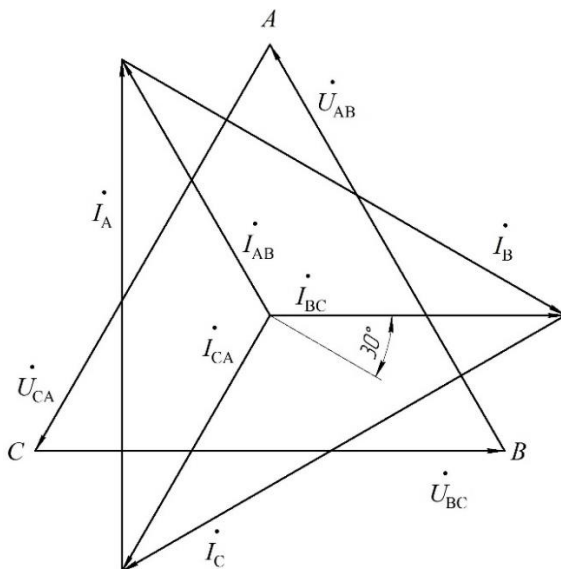


Рис. 6.2. Векторная диаграмма напряжений и токов при соединении симметричной нагрузки по схеме «треугольник»

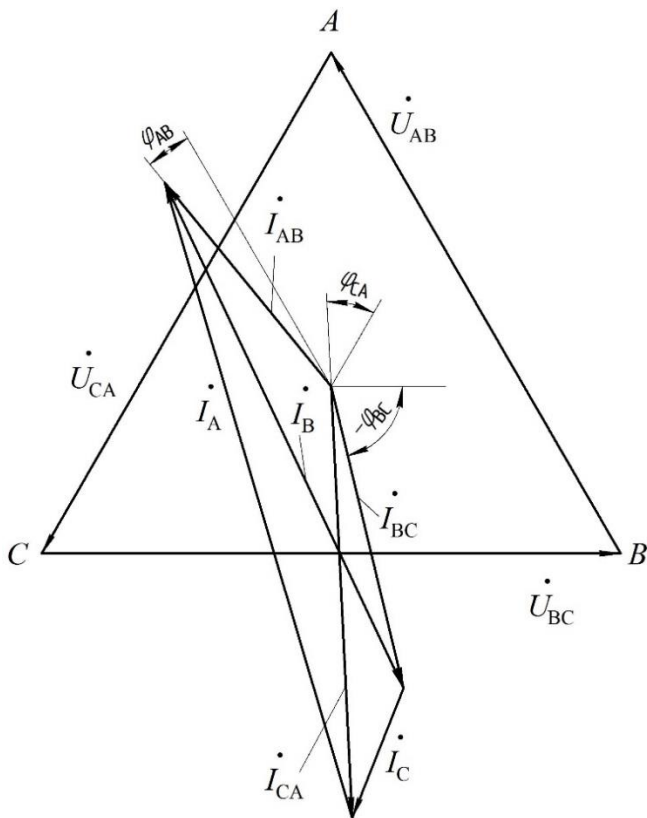


Рис. 6.3. Векторная диаграмма напряжений и токов при соединении несимметричной нагрузки по схеме «треугольник»

Задание. Изучить схему подключения исследуемой ЛЭЦ трехфазного тока с различными видами нагрузки. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемой цепи, построить ее векторную диаграмму (в режиме несимметричной RLC).

Порядок выполнения работы.

- 1) По схеме (рис. 6.4) собрать электрическую цепь. Установить переключатель L2 в поз. «2».
- 2) Включить лабораторный стенд тумблером «Сеть». Включить тумблер S13.

3) Провести измерение фазных токов, линейных напряжений и мощности по приборам стенда. Показания занести в таблицу 6.1.

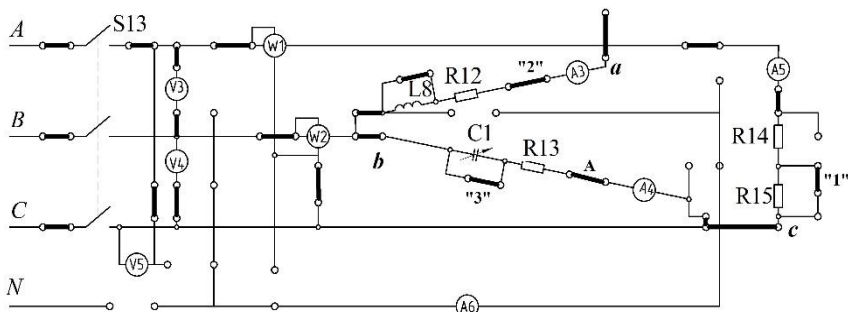


Рис. 6.4. Схема лабораторной установки

Таблица 6.1

Результаты исследования характеристик трехфазной системы с нагрузкой, соединенной по схеме «треугольник»

Характер нагрузки	Измерено						Вычислено					
	фазные токи			линейные напряжения			линейные токи			мощности		коэффициент
	$I_{AB},$ А	$I_{BC},$ А	$I_{CA},$ А	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P,$ Вт	$S,$ ВА	
1. Равномерная R												
2. Неравномерная R												
3. Неравномерная R, L, C												
4. Обрыв фазы												

4) Убрать перемычку «1», создав тем самым неравномерную активную нагрузку. Выполнить действия аналогичные действиям, указанным в пункте 3.

5) Убрать перемычки «2» и «3», создав тем самым неравномерную несимметричную нагрузку типа RLC. Выполнить действия аналогичные действиям, указанным в пункте 3.

6) Убрать одну из линейных перемычек, ведущих к тумблеру S13. Выполнить действия аналогичные действиям, указанным в пункте 3.

7) Выполнить расчеты линейных токов по формулам (6.2). Показания занести в таблицу 6.1.

8) Выполнить расчеты полной мощности S трехфазной системы и коэффициента мощности $\cos \varphi$. Показания занести в таблицу 6.1.

9) Построить векторную диаграмму напряжений и токов для неравномерной нагрузки (третья строчка таблицы 6.1).

Вопросы для самоконтроля

1. Напишите соотношения между фазными, линейными токами и напряжениями при соединении потребителей «треугольником».

2. Чем опасно короткое замыкание фазы при соединении нагрузки «треугольником»?

3. Какое влияние оказывает обрыв фазы источника на режим работы цепи?

4. Как распределяются токи в фазных и линейных проводах при обрыве фазного провода, линейного провода?

5. Оказывает ли влияние характер фазных нагрузок на величину и угол сдвига по фазе линейных токов?

Лабораторная работа №7

Исследование влияния характера фазных нагрузок на ток нулевого провода

Цель работы: исследовать влияние изменения характера несимметричной нагрузки фаз на ток нулевого провода.

При соединении нагрузки по схеме «звезда» линейные и фазные токи равны $I_L = I_\Phi$, а линейные напряжения представляют собой геометрическую разность фазных напряжений. В комплексной форме выражения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Для упрощения расчетов часто применяют оператор трехфазной системы, например, если при симметричной системе ЭДС генератора, ЭДС в одной фазе (например A) равна \dot{E}_A , то

$$\dot{E}_B = \alpha^2 \dot{E}_A, \quad \dot{E}_C = \alpha \dot{E}_A, \quad (7.2)$$

где α – оператор трехфазной системы.

Оператор трехфазной системы является комплексным числом, по модулю равным единице.

Умножение комплексного числа на оператор α , поворачивает вектор данного комплексного числа на угол 120° в положительном направлении (против часовой стрелки).

Если система симметрична, то ток в нейтральном проводе равен нулю $I_N = 0$. Нейтральный провод можно устранить.

Линейное напряжение при симметричной нагрузке определяют по формуле

$$\dot{U}_L = \sqrt{3} \cdot \dot{U}_\Phi \cdot e^{j30^\circ}. \quad (7.3)$$

В трехфазной системе без нейтрального провода при любой нагрузке справедливо равенство: $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$.

В трехфазной системе с нейтральным проводом (рис. 7.1), в соответствии с первым законом Кирхгофа, ток в нулевом проводе равен геометрической сумме токов линейных проводов (они же фазовые токи, в данном случае)

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (7.4)$$

Если нагрузка является *равномерной*, то есть сопротивления фаз равны как по модулю, так и по углу сдвига по фазе, то ток нулевого провода будет равен нулю. Если сопротивление нагрузки не равномерное, то ток нулевого провода не равен нулю и контуры будут являться смежными, через ветвь *N-n*. В этом случае расчет цепи удобнее проводить методом узловых потенциалов.

В данном случае, при любой нагрузке справедливо равенство:

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = 0 \text{ В.} \quad (7.5)$$

Токи в фазах приемника определяются по формулам:

$$I_A = \underline{Y}_A \cdot \dot{U}_{An}, \text{ A}; \quad I_B = \underline{Y}_B \cdot \dot{U}_{Bn}, \text{ A}; \quad I_C = \underline{Y}_C \cdot \dot{U}_{Cn}, \text{ A.} \quad (7.6)$$

При соединении нагрузки треугольником фазные и линейные напряжения одинаковы по модулю $U_\Phi = U_L$.

То есть на каждую фазу нагрузки приходится линейное напряжение. Поэтому фазные токи рассчитываются по закону Ома:

$$I_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \text{ A}; \quad I_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \text{ A}; \quad I_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \text{ A.} \quad (7.7)$$

Линейные токи определяется суммой фазных токов, сходящихся в тех же узлах, что и искомые соответствующие токи.

Основной проблемой при подключении несимметричной нагрузки по схеме «звезда» с нулевым проводом является несимметрия, как линейных токов, так и существенная зависимость тока нулевого провода от несимметрии сопротивлений.

Высокие токи нулевого провода приводят к перегреву проводов и кабелей, а иногда и к прогоранию изоляции.

Рассмотрим несимметричную схему (рис. 7.2). Если в фазе *B* разместить индуктивность, а в фазе *C* емкость, то получим векторную диаграмму, показанную на рисунке 7.3.

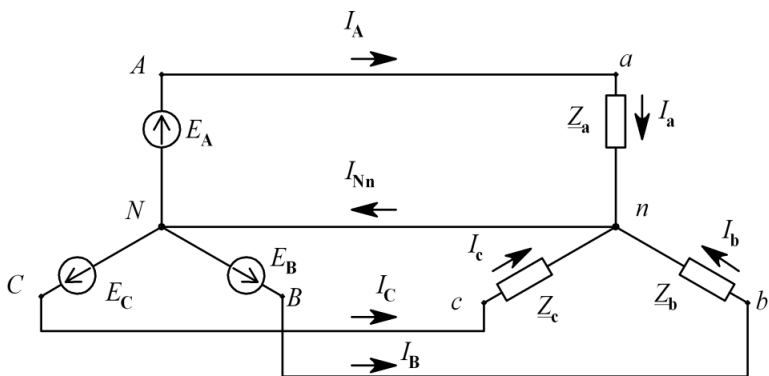


Рис. 7.1. Схема «звезда» с нулевым проводом

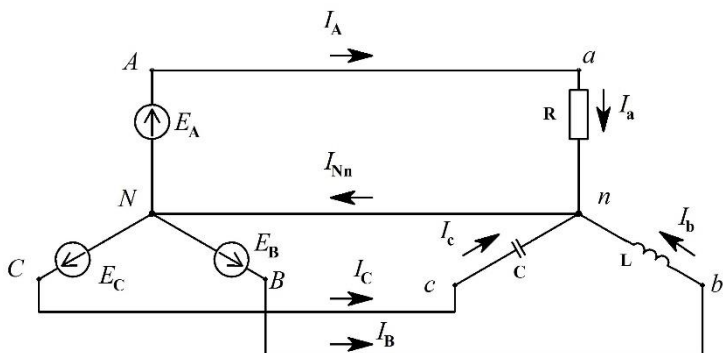


Рис. 7.2. Схема «звезда» с нулевым проводом с нагрузкой типа RLC

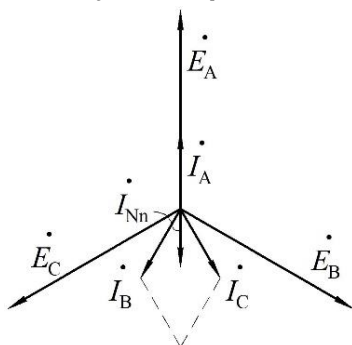


Рис. 7.3. Векторная диаграмма ЭДС и токов при нагрузке RLC

Если поменять местами элементы L и C в фазах приемника (рис. 7.4), то распределение токов существенно изменится.

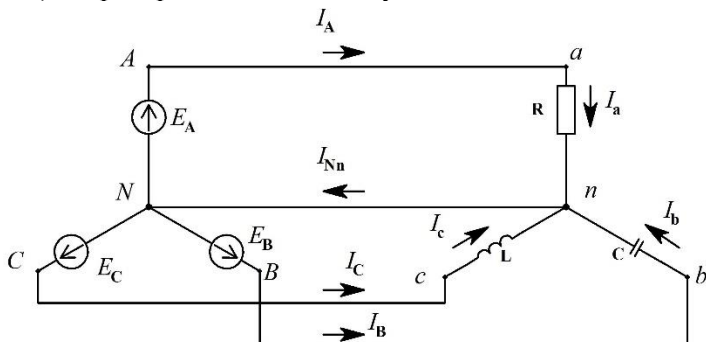


Рис. 7.4. Схема «звезда» с нулевым проводом с нагрузкой типа RCL

В этом случае ток в фазе B будет опережать ЭДС E_B , а в фазе C – отставать от E_C . Получим векторную диаграмму, изображенную на рисунке 7.5.

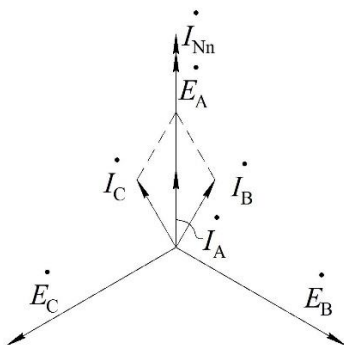


Рис. 7.5. Векторная диаграмма ЭДС и токов при нагрузке RCL

По диаграмме (рис. 7.5) видно, что ток нулевого провода почти в три раза больше любого из линейных токов.

Такое распределение токов приводит к выходу из строя электропроводки или кабеля.

Задание. Изучить схемы подключения исследуемых ЛЭЦ трехфазного тока с различными видами нагрузки. Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. На основании

полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемых цепей, а далее построить их векторные диаграммы.

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать электрическую цепь согласно рисунку 7.6.
- 2) Включить стенд. Включить тумблер S13.
- 3) Провести измерения фазных напряжений, линейных токов и мощностей. Показания занести в таблицу 7.1. Отключить тумблер S13.
- 4) Собрать электрическую цепь согласно рисунку 7.7.
- 5) Включить стенд. Включить тумблер S13.
- 6) Провести измерения фазных напряжений, линейных токов и мощностей. Показания занести в таблицу 7.1. Отключить тумблер S13. Отключить стенд.

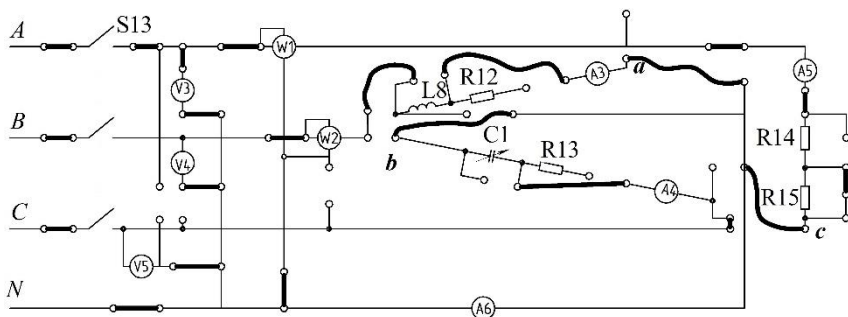


Рис. 7.6. Схема «звезда» с нулевым проводом и нагрузкой типа RLC

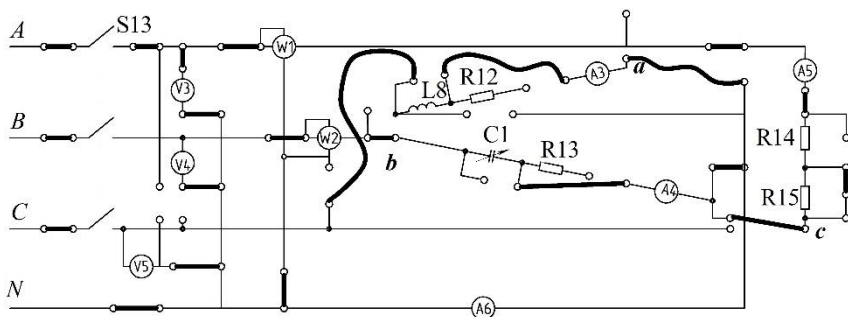


Рис. 7.7. Схема «звезда» с нулевым проводом и нагрузкой типа RCL

Таблица 7.1

Результаты измерений параметров несимметричной системы

Тип нагрузки	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$	$U_N, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$P_A, Вт$	$P_B, Вт$	$P_C, Вт$
RLC										
RCL										

Таблица 7.2

Результаты расчета параметров несимметричной системы

Тип нагрузки	$S_A, ВА$	$S_B, ВА$	$S_C, ВА$	$\cos \varphi_A$	$\cos \varphi_B$	$\cos \varphi_C$	$P_\Sigma, Вт$	$S_\Sigma, ВА$	$\cos \varphi_\Sigma$	$\underline{Z}_A, Ом$	$\underline{Z}_B, Ом$	$\underline{Z}_C, Ом$
RLC												
RCL												

Таблица 7.3

Результаты перевода в комплексную форму

$\dot{U}_A, В$	$\dot{U}_B, В$	$\dot{U}_C, В$	$\dot{I}_A, В$	$\dot{I}_B, В$	$\dot{I}_C, В$

7) Провести расчеты необходимых параметров в соответствии с данными таблиц 7.2 и 7.3.

8) Построить векторные диаграммы напряжений и токов для обоих исследованных случаев. Сделать выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. От каких параметров цепи зависит ток нулевого провода?
2. Каким образом необходимо распределить нагрузку по фазам, чтобы ток нулевого провода имел минимальное значение?
3. Каким образом характер фазных нагрузок влияет на величины линейных токов при соединении нагрузки по схеме «треугольник»?
4. Возможно ли такое, чтобы при подключении нагрузки по схеме «треугольник» линейные токи были меньше фазных?
5. Возможно ли снизить ток нулевого провода, если невозможно изменить характер фазных нагрузок?

Лабораторная работа №8

Изучение методики анализа несимметричных систем методом симметричных составляющих

Цель работы: изучить методику анализа несимметричных систем токов и напряжений методом симметричных составляющих; провести исследование и анализ несимметричной трехфазной системы, разложив полученные несимметричные системы трехфазных токов и напряжений на симметричные составляющие.

Несимметричные системы (напряжений или токов) представляют определенную сложность и неудобство при расчетах. Кроме того, представление несимметричных систем в комплексном виде не дает представление о сути процессов, происходящих при этом в самой трехфазной системе. Поэтому, в соответствии с принципом наложения токов, несимметричные системы возможно «расслупить» на отдельные, симметричные составляющие.

Любую несимметричную систему трех напряжений, токов, магнитных потоков возможно представить в виде трех систем: прямой, обратной и нулевой последовательностей чередования фаз

$$\begin{pmatrix} \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C \\ \dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C \end{pmatrix}. \quad (8.1)$$

Рассмотрим процедуру разложения на симметричные составляющие на примере напряжений. Система прямой последовательности (рис. 8.1) состоит из трех векторов $\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}$, равных по модулю и сдвинутых по фазе относительно друг друга на угол 120° . Причем \dot{U}_{B1} отстает от \dot{U}_{A1} , а \dot{U}_{C1} отстает от \dot{U}_{B1} . С учетом оператора поворота α можно записать:

$$\dot{U}_{B1} = \alpha^2 \dot{U}_{A1}, \quad B, \quad (8.2)$$

$$\dot{U}_{C1} = \alpha \dot{U}_{A1}, \quad B. \quad (8.3)$$

Система обратной последовательности (рис. 8.1, б) состоит из векторов $\dot{U}_{A2}, \dot{U}_{B2}, \dot{U}_{C2}$. Причем \dot{U}_{B2} опережает \dot{U}_{A2} , а \dot{U}_{C2} опережает \dot{U}_{B2} . С учетом оператора поворота α можно записать:

$$\dot{U}_{B2} = \alpha \dot{U}_{A2}, \quad B, \quad (8.4)$$

$$\dot{U}_{C2} = \alpha^2 \dot{U}_{A2}, \text{ В.} \quad (8.5)$$

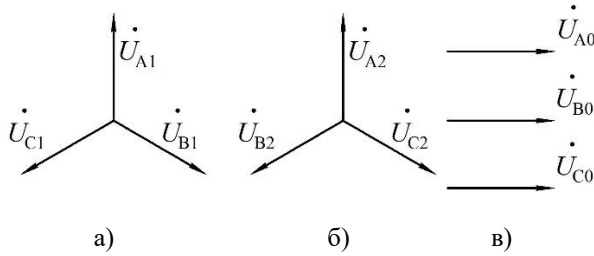


Рис. 8.1. Векторные диаграммы симметричных составляющих:
 а – прямой последовательности; б – обратной последовательности;
 в – нулевой последовательности

Система нулевой последовательности (рис. 8.1, в) представляет собой три вектора, одинаковые по модулю и совпадающие по фазе:

$$\dot{U}_{A0} = \dot{U}_{B0} = \dot{U}_{C0}, \text{ В.} \quad (8.6)$$

На основании полученного, исходную систему векторов $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ можно представить в виде суммы соответствующих векторов симметричных систем:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2}, \text{ В,} \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_{B0} + \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2}, \text{ В,} \\ \dot{U}_C &= \dot{U}_{C0} + \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2}, \text{ В.} \end{aligned} \right\} \quad (8.7)$$

В уравнения (8.7) необходимо подставить величины, полученные по выражениям (8.2-8.5):

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{A0} + \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2}, \text{ В,} \quad (8.8)$$

$$\dot{U}_B = \dot{U}_{B0} + \alpha^2 \dot{U}_{A1} + \alpha \dot{U}_{A2}, \text{ В,} \quad (8.9)$$

$$\dot{U}_C = \dot{U}_{C0} + \alpha \dot{U}_{A1} + \alpha^2 \dot{U}_{A2}, \text{ В.} \quad (8.10)$$

Из системы уравнений (8.8-8.10) найдем векторы $\dot{U}_{A0}, \dot{U}_{A1}, \dot{U}_{A2}$ через исходные векторы $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$.

Для расчета \dot{U}_{A0} необходимо сложить уравнения (8.8), (8.9) и (8.10) и сократить с учетом оператора α ($1 + \alpha^2 + \alpha = 0$). Тогда получим

$$\dot{U}_{A0} = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), \text{ В.} \quad (8.11)$$

Таким образом, для нахождения векторов нулевой последовательности необходимо геометрически сложить три исходных вектора и разделить на три.

Для нахождения векторов прямой последовательности необходимо геометрически сложить векторы (8.8), (8.9) и (8.10), при этом уравнение (8.9) необходимо предварительно умножить на α , а уравнение (8.10) – на α^2 :

$$\dot{U}_{A1} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha\dot{U}_B + \alpha^2\dot{U}_C), \text{ В.} \quad (8.12)$$

То есть, для определения векторов прямой последовательности необходимо геометрически сложить исходные векторы, при этом вектор \dot{U}_B необходимо повернуть вправо на 120° , а вектор \dot{U}_C – влево на 120° (или вправо на 240°). Полученный результат поделить на три.

Для расчета векторов обратной последовательности необходимо геометрически сложить векторы (8.8), (8.9) и (8.10), при этом уравнение (8.9) необходимо предварительно умножить на α^2 , а уравнение (8.10) – на α . Тогда получим:

$$\dot{U}_{A2} = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha^2\dot{U}_B + \alpha\dot{U}_C), \text{ В.} \quad (8.13)$$

То есть, для определения векторов обратной последовательности необходимо геометрически сложить исходные векторы, при этом вектор \dot{U}_B необходимо повернуть влево на 120° , а вектор \dot{U}_C – вправо на 120° (или влево на 240°). Полученный результат поделить на три. Необходимость анализа и расчета параметров несимметричных систем заключается в том, что они оказывают существенное влияние на процесс работы различного электрооборудования. Например, магнитные потоки нулевой последовательности (генерируемые токами нулевой последовательности) фаз проходят через статор двигателя, минуя ротор, а потоки прямой и обратной последовательностей фаз проходят через ротор.

При одном и том же токе прямой и нулевой последовательности соответствующие им магнитные потоки различны. Поэтому для асинхронного электродвигателя $Z_{0д} \neq Z_{1д} \neq Z_{2д}$.

Расчет методом симметричных составляющих состоит в том, что на основании принципа наложения токов, исходный несимметричный режим работы представляют как результат наложения трех симметричных режимов.

В первом симметричном режиме все токи, ЭДС и напряжения содержат только составляющие прямой последовательности фаз, а линии передачи, вращающиеся электромашины и трехфазные трансформаторы представлены на схемах их сопротивлениями для прямой последовательности.

Во втором симметричном режиме все токи, ЭДС и напряжения содержат составляющие только обратной последовательности, а машины и трансформаторы представлены их сопротивлениями обратной последовательности.

В третьем симметричном режиме все токи, ЭДС и напряжения содержат только составляющие нулевой последовательности, а машины и трансформаторы представлены соответствующими сопротивлениями нулевой последовательности.

Задание. Изучить схему подключения исследуемой ЛЭЦ трехфазного тока (подключение нагрузки по схеме «звезда» без нулевого провода) с несимметричной нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты симметричных составляющих исследуемой цепи, построить ее векторные диаграммы: несимметричных напряжения и тока, симметричных составляющих напряжений и токов.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать электрическую цепь по схеме «звезда» без нулевого провода (рис. 8.2).

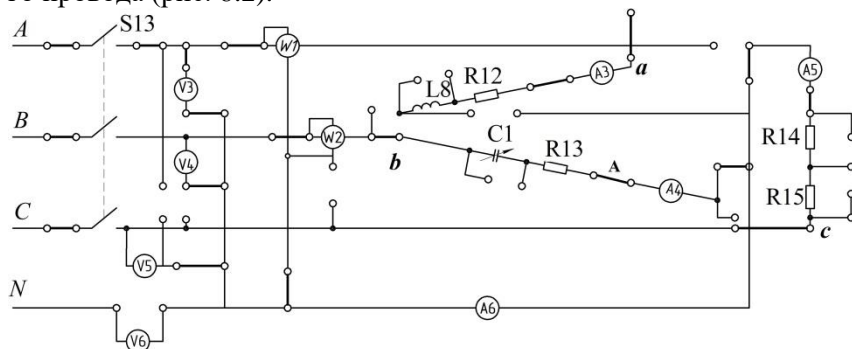


Рис. 8.2. Схема подключения лабораторной установки

2) Включить стенд. Включить тумблер S13.

3) Провести измерения фазных и линейных токов, напряжений и мощностей. Результаты занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1

Результаты измерений параметров несимметричной системы

$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$U_N,$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт

Таблица 8.2

Результаты расчета параметров несимметричной системы

$S_A,$ ВА	$S_B,$ ВА	$S_C,$ ВА	$\cos \varphi_A$	$\cos \varphi_B$	$\cos \varphi_C$	$P_\Sigma,$ Вт	$S_\Sigma,$ ВА	$\cos \varphi_\Sigma$	$Z_A,$ Ом	$Z_B,$ Ом	$Z_C,$ Ом

4) Провести расчет параметров несимметричной системы напряжений и токов. Результаты занести в таблицу 8.2.

5) Провести расчет параметров симметричных составляющих токов и напряжений. Результаты занести в таблицы 8.3 и 8.4.

Таблица 8.3

Результаты расчета симметричных систем напряжений

$\dot{U}_{A, B}$	$\dot{U}_{B, B}$	$\dot{U}_{C, B}$	$\dot{U}_{A0, B}$	$\dot{U}_{A1, B}$	$\dot{U}_{B1, B}$	$\dot{U}_{C1, B}$	$\dot{U}_{A2, B}$	$\dot{U}_{B2, B}$	$\dot{U}_{C2, B}$

Таблица 8.4

Результаты расчета симметричных систем токов

$\dot{I}_{A, A}$	$\dot{I}_{B, A}$	$\dot{I}_{C, A}$	$\dot{I}_{A0, A}$	$\dot{I}_{A1, A}$	$\dot{I}_{B1, A}$	$\dot{I}_{C1, A}$	$\dot{I}_{A2, A}$	$\dot{I}_{B2, A}$	$\dot{I}_{C2, a}$

6) Построить векторные диаграммы напряжений и токов несимметричной системы, и симметричных составляющих.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем суть метода симметричных составляющих?
2. Перечислить применяемые симметричные системы.
3. От каких факторов зависит угол фазы нулевой последовательности?
4. Каково влияние обратной последовательности на работу асинхронно-го электродвигателя?
5. Каково влияние нулевой последовательности на работу трехфазного трансформатора?

Лабораторная работа № 9

Исследование пассивного взаимного четырехполюсника

Цель работы: изучить назначение, базовые схемы и формы записи уравнений четырехполюсника; исследовать характеристики линейного взаимного пассивного активно-реактивного четырехполюсника и схемы его замещения.

Четырехполюсником называется обобщенная часть электрической цепи, рассматриваемая относительно четырех ее зажимов.

Примерами четырехполюсников могут быть трансформаторы, линии электропередачи, транзисторы.

Четырехполюсник изображается в виде прямоугольника с четырьмя выводами, в виде зажимов (рис. 9.1).

Если четырехполюсник активный (то есть содержит в своем составе источник энергии), то в прямоугольнике проставляется буква «А», если стоит буква «П» или нет буквы, то четырехполюсник – пассивный.

Пассивные четырехполюсники подразделяются, в свою очередь, на пассивные самостоятельные (способные усиливать входной сигнал за счет внешних источников энергии) и пассивные несамостоятельные (неспособные усиливать сигнал по мощности).

Иногда четырехполюсники имеют не четыре вывода, а шесть. Например, ab , cd и ac (рис. 9.1). В этом случае принципы работы не меняются.

Как правило, большинство четырехполюсников являются проходными, т.е. одна пара выводов является входной, например ab , а другая, например cd , – выходной. Входные параметры имеют индекс «1», выходные – индекс «2».

В данном случае четырехполюсник является передаточным звеном между источником питания и нагрузкой. К зажимам ab подключен внешний источник энергии, а к зажимам cd – нагрузка.

Важным условием работы четырехполюсника является неизменность его характеристических параметров. То есть, входные и выходные токи и напряжения могут меняться, но схемы внутренних соединений и величины сопротивлений должны оставаться неизменными.

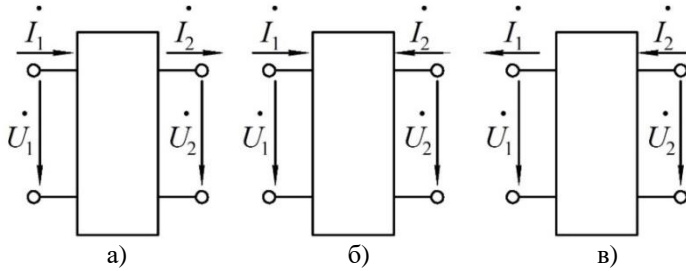


Рис. 9.1. Схемы двухполюсников для различных форм записи уравнений:

а – схема *A*-формы; б – схема *Z*-, *Y*-, *H*- и *G*-форм; в – схема *B*-формы

Четырехполюсник характеризуется двумя парами напряжений и токов, а так как число возможных сочетаний из четырех по два равно шести, соответственно, возможны шесть форм записи уравнений четырехполюсника:

A-форма:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, B, \\ \dot{I}_1 = C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2, A. \end{cases} \quad (9.1)$$

A-форме соответствует схема, представленная на рисунке 9.1, а. Существуют также *Z*-, *Y*-, *H*- и *G*-формы (рис. 9.1, б) и *B*-форма (рис. 9.1, в). Отличие данных схем в направлении токов первичных и вторичных цепей.

Коэффициенты четырехполюсника являются комплексными числами. Их параметры зависят от величин сопротивлений схемы четырехполюсника, наличия реактивных сопротивлений и частоты. Данные коэффициенты можно определить расчетным или опытным путем. Для расчетного определения коэффициентов необходимо знать внутреннюю схему четырехполюсника и параметры его элементов. Для взаимных четырехполюсников соблюдается условие взаимности:

$$AD - BC = 1. \quad (9.2)$$

Рассмотрим пример расчета коэффициентов *A*-формы. Для этого ко входным зажимам *ab* подключим источник ЭДС, а к зажимам *cd* нагрузку \underline{Z}_H (рис. 9.2, а). При этом должно соблюдаться условие

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_{ab} = \dot{U}_1, B. \quad (9.3)$$

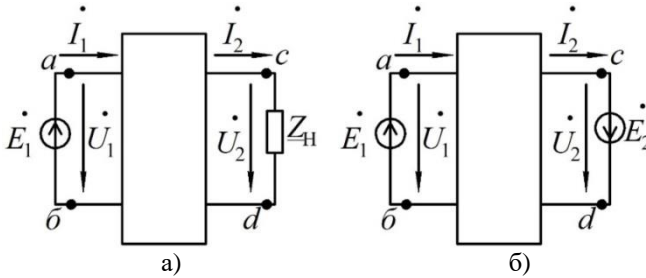


Рис. 9.2. Схема нагруженного двухполюсника

Величина падения напряжения на нагрузке составит:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_H = \dot{U}_{cd}, \text{ В.} \quad (9.4)$$

Согласно теореме компенсации нагрузке возможно заменить источником ЭДС, включенным встречно току I_2 с соблюдением условия:

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2, \text{ В.} \quad (9.5)$$

Тогда получим схему, представленную на рисунке 9.2б.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа и теоремой взаимности можно получить уравнения для токов ветвей \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , через параметры источников ЭДС \dot{E}_1 , \dot{E}_2 и комплексных проводимостей \underline{Y}_{11} , \underline{Y}_{12} , \underline{Y}_{21} , \underline{Y}_{22} :

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_1 \underline{Y}_{11} - \dot{E}_2 \underline{Y}_{12}, \text{ А,} \quad (9.6)$$

$$\dot{I}_2 = \dot{E}_1 \underline{Y}_{21} - \dot{E}_2 \underline{Y}_{22}, \text{ А,} \quad (9.7)$$

Для линейных взаимных четырехполюсников, согласно принципу взаимности $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$, из уравнения (9.7) получим:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} + \dot{I}_2 \frac{1}{\underline{Y}_{21}}, \text{ В.} \quad (9.8)$$

Если подставить полученное уравнение (9.8) в уравнение (9.6) и решив его относительно тока, получим:

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_2 \frac{\underline{Y}_{11} \cdot \underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12} \cdot \underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{21}} + \dot{I}_2 \frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}}, \text{ В.} \quad (9.9)$$

Сопоставив пары уравнений (9.8) и (9.9) с (9.6) и (9.7) и заменив величины \dot{E}_1 на \dot{U}_1 , а \dot{E}_2 на \dot{U}_2 , получим величины коэффициентов уравнений четырехполюсника:

$$A = \frac{Y_{22}}{Y_{21}}, \quad (9.10)$$

$$B = \frac{1}{Y_{21}}, \text{ Ом}, \quad (9.11)$$

$$C = \frac{Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{21}}, \text{ сим}, \quad (9.12)$$

$$D = \frac{Y_{11}}{Y_{21}}. \quad (9.13)$$

Если поменять местами источник ЭДС и нагрузку, не меняя при этом параметры четырехполосника (обозначения ветвей не меняются), то получим новую схему (рис. 9.3, а), такая схема называется схемой обратного подключения четырехполосника. Аналогично предыдущему случаю заменим сопротивление источником ЭДС. Тогда получим схему, представленную на рисунке 9.3б.

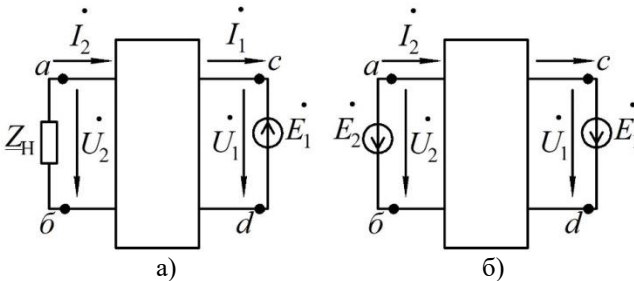


Рис. 9.3. Схема обратного подключения двухполосника

Проведя аналогичные выкладки, получим уравнения:

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \frac{Y_{11}}{Y_{21}} + \dot{I}_2 \frac{1}{Y_{21}}, \text{ В}. \quad (9.14)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{E}_2 \frac{Y_{11} \cdot Y_{22} - Y_{12} \cdot Y_{21}}{Y_{21}} + \dot{I}_2 \frac{Y_{22}}{Y_{21}}, \text{ В}. \quad (9.15)$$

Из данных уравнений видно, что коэффициенты A и D поменялись местами, однако по модулю они остались равны друг другу.

Если схема соединений четырехполосника или параметры его элементов неизвестны, то коэффициенты определяются

экспериментально. Для этого четырехполосник испытывают в трех режимах работы поочередно.

1) Холостой ход при прямом подключении (вторичная ветвь разомкнута). Ток вторичной цепи $I_{2x} = 0$ А равен нулю. Необходимо определить входное сопротивление:

$$\underline{Z}_{1x} = \frac{\dot{U}_{1x}}{\dot{I}_{1x}} = z_{1x} e^{j\varphi_{1x}} = \frac{A}{C}, \text{ Ом.} \quad (9.16)$$

2) Короткое замыкание при прямом подключении (вторичная ветвь замкнута). В данном случае напряжение вторичной цепи равно нулю $\dot{U}_{2к} = 0$ В. Необходимо определить входное сопротивление:

$$\underline{Z}_{1к} = \frac{\dot{U}_{1к}}{\dot{I}_{1к}} = z_{1к} e^{j\varphi_{1к}} = \frac{B}{D}, \text{ Ом.} \quad (9.17)$$

3) Короткое замыкание при обратном подключении (первичная цепь замкнута). Необходимо помнить, что напряжения и токи меняются местами, но параметры ветвей не меняются. В данном случае напряжение вторичной цепи равно нулю $\dot{U}_{1к} = 0$ В. Необходимо определить входное сопротивление:

$$\underline{Z}_{2к} = \frac{\dot{U}_{2к}}{\dot{I}_{2к}} = z_{2к} e^{j\varphi_{2к}} = \frac{B}{A}, \text{ Ом.} \quad (9.18)$$

Четвертым уравнением является условие взаимности, выражение (9.2). Далее, решая совместно систему четырех уравнений (9.2), (9.16-9.18), определим коэффициент A :

$$A = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1x} \cdot \underline{Z}_{1к}}{\underline{Z}_{2к}(\underline{Z}_{1x} - \underline{Z}_{1к})}}. \quad (9.19)$$

Рассчитав данный коэффициент (он является безразмерным) и воспользовавшись формулами (9.16-9.18) легко определяются все остальные коэффициенты B , C и D .

На практике, как правило, нет необходимости знать схему четырехполосника и параметры его элементов. В этом случае по найденным коэффициентам строится эквивалентная схема и определяются параметры ее элементов.

В электротехнике используются T - и Π -схемы замещений (рис. 9.4).

В электротехническом плане обе схемы замещения эквивалентны друг другу, но для замещения линий электропередачи используется, как правило, Π -схема, а для трансформаторов – T -схема.

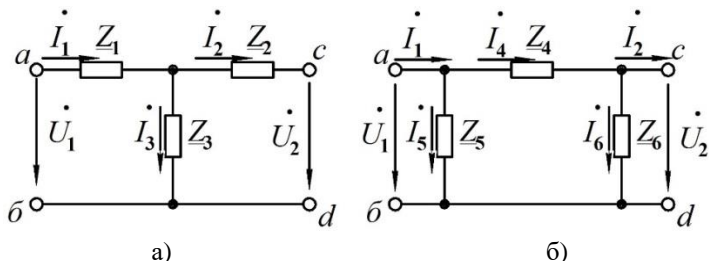


Рис. 9.4. Эквивалентные схемы четырехполюсников:
а – T -схема; б – Π -схема

Главной задачей в этом случае является расчет параметров данных схем, то есть сопротивлений $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6$.

Рассмотрим процесс такого расчета на примере T -схемы (рис. 9.4, а). Для этого необходимо выразить входные (первичные) параметры схемы через выходные (вторичные), с помощью закона Ома получим:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_1 + \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = \dot{U}_2 \frac{1}{\underline{Z}_3} + \dot{I}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right), \text{ А}; \quad (9.20)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 + \dot{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 + \dot{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 = \\ &= \dot{U}_2 \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right) + \dot{I}_2 \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right), \text{ В}. \end{aligned} \quad (9.21)$$

Выражение (9.21) получено с учетом выражения (9.20). Сопоставив однотипные выражения (9.21) с (9.1), а (9.20) с (9.2), нетрудно получить искомые коэффициенты четырехполюсника:

$$\left\{ \begin{aligned} A &= \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right), B = \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right), \text{ Ом} \\ C &= \frac{1}{\underline{Z}_3}, \text{ сим}, D = \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right). \end{aligned} \right\} \quad (9.22)$$

Соответственно, из полученных выражений находим величины комплексных сопротивлений схемы замещения:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_3 &= \frac{1}{C}, \text{ Ом,} \\ \underline{Z}_1 &= \frac{A-1}{C}, \text{ Ом,} \\ \underline{Z}_2 &= \frac{D-1}{C}, \text{ Ом.} \end{aligned} \right\} \quad (9.23)$$

Параметры элементов Π -схемы замещения рассчитываются аналогично.

Таким образом возможно определить сначала комплексные коэффициенты четырехполосника, а затем параметры элементов его схемы замещения.

Задание. Изучить схемы подключения исследуемой цепи четырехполосника с активно-реактивной нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров в режимах холостого хода и короткого замыкания. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик четырехполосника и его T -схемы замещения, а далее построить его векторную диаграмму.

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать испытуемую схему четырехполосника (рис. 9.5).
- 2) Включить стенд тумблером «Сеть».
- 3) Провести опыт холостого хода. Для этого включить схему и установить необходимое входное напряжение.
- 4) Снять показания приборов (токи и напряжения) и занести их в таблицу 9.1.
- 5) Отключить схему и для проведения опыта короткого замыкания собрать следующую схему (рис. 9.6).
- 6) Провести опыт короткого замыкания. Для этого включить схему и установить необходимое входное напряжение.
- 7) Снять показания приборов (токи и напряжения) и занести их в таблицу 9.1.
- 8) Отключить цепь и для проведения опыта короткого замыкания, при обратном подключении четырехполосника, собрать следующую схему (рис. 9.7).

9) Провести опыт короткого замыкания в обратном направлении. Для этого включить схему и установить необходимое входное напряжение.

10) Снять показания приборов (токи, напряжения и мощность) и занести их в таблицу 9.1.

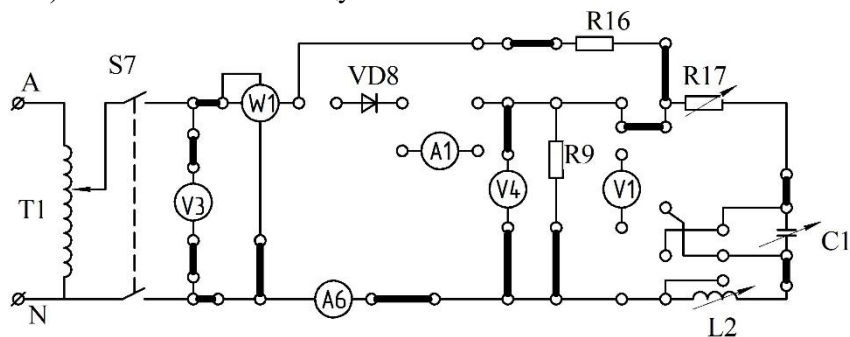


Рис. 9.5. Схема холостого хода при прямом подключении

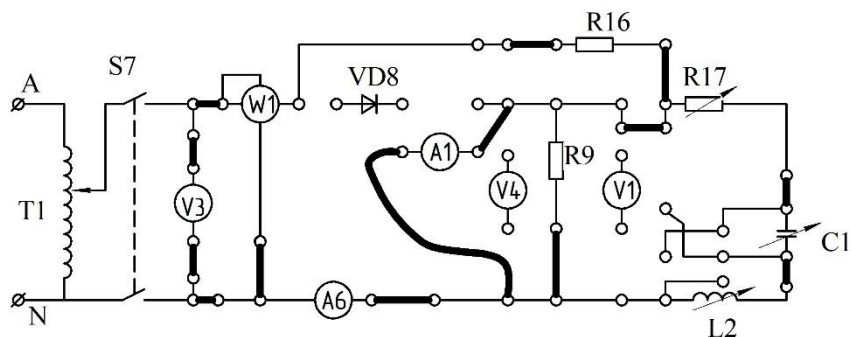


Рис. 9.6. Схема короткого замыкания при прямом подключении

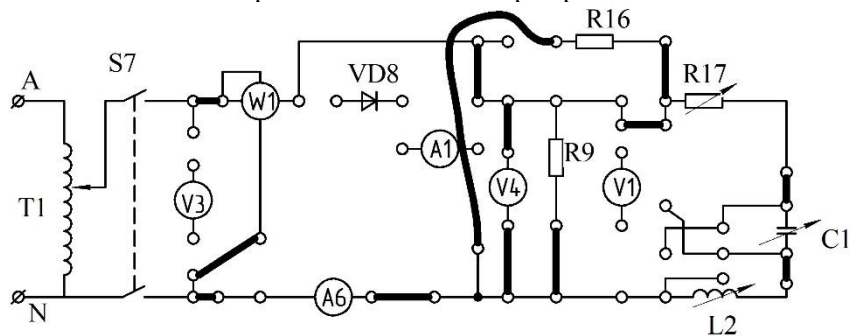


Рис. 9.7. Схема короткого замыкания при обратном подключении

11) Провести расчет параметров четырехполюсника: Z_{1x} , Z_{1k} , Z_{2k} по формулам (9.16-9.18), а также коэффициенты мощности и занести в таблицу 9.2.

12) Коэффициенты четырехполюсника необходимо рассчитать по формуле (9.19), а затем выполнить вычисления, используя формулы (9.16), (9.17) и (9.18). Показания занести в таблицу 9.3.

13) По формулам (9.23) провести расчет комплексных сопротивлений эквивалентной схемы и построить ее. Результаты занести в таблицу 9.3.

Таблица 9.1

Результаты измерений параметров четырехполюсника

U_{1x} , В	I_{1x} , А	P_{1x} , Вт	U_{1k} , В	I_{1k} , В	P_{1k} , Вт	U_{2k} , В	I_{2k} , А	P_{2k} , Вт
V3	A6	W1	V3	A6	W1	V4	A6	W1

Таблица 9.2

Результаты расчетов параметров четырехполюсника

$\cos \varphi_{1x}$	$\cos \varphi_{1k}$	$\cos \varphi_{2k}$	φ_{1x} , Град.	φ_{1k} , Град.	φ_{2k} , Град.	Z_{1x} , Ом	Z_{1k} , Ом	Z_{2k} , Ом

Таблица 9.3

*Результаты расчетов параметров элементов схемы
замещения*

A	B, Ом	C, сим	D	Z_1 , Ом	Z_2 , Ом	Z_3 , Ом

14) По результатам измерений и расчетов построить векторные диаграммы для каждого опыта. Сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Какое устройство называют четырехполюсником?
2. Привести классификацию четырехполюсников.
3. Каким образом рассчитывают коэффициенты четырехполюсника?
4. Какие известны формы записи четырехполюсников?
5. Для каких устройств, какие схемы замещения используют?

Лабораторная работа № 10

Исследование индуктивно-связанных цепей

Цель работы: исследовать схему и характеристики цепей содержащих индуктивно-связанные катушки и освоить методику экспериментального определения взаимной индуктивности.

При прохождении электрического тока через витки катушки в ее сердечнике возникает магнитный поток. В том случае если катушки расположены на одном сердечнике (даже если сердечник не стальной) их магнитные потоки взаимодействуют. Магнитный поток каждой из катушек вызывает ЭДС, индуцируемую в витках соседней катушки. Это явление получило название индуктивной связи электромагнитных катушек.

Магнитный поток в сердечнике обусловлен током в витках катушки и определяется зависимостью:

$$\Phi = \frac{wI}{R_{\text{маг}}}, \text{ Вб.} \quad (10.1)$$

На рисунке 10.1 показаны магнитные потоки индуктивно-связанных катушек: Φ_{21} и Φ_{12} – потоки взаимной индукции; Φ_{S1} , Φ_{S2} – потоки рассеяния.

Полный магнитный поток, создаваемый током каждой катушки, состоит из потока рассеяния (в том случае если катушка не бронирована) и потока взаимной индукции. Совместно они образуют поток самоиндукции. Для первой катушки $\Phi_{11} = \Phi_{S1} + \Phi_{21}$, для второй катушки $\Phi_{22} = \Phi_{S2} + \Phi_{12}$.

Эти потоки определяют величины собственных индуктивностей L_1 и L_2 катушек.

Связь потокоцепления взаимной индукции одной электрической цепи с током другой характеризуется взаимной индуктивностью M . Если потокоцепление Ψ_{12} первой катушки обусловлено током i_2 второй катушки, то взаимная индуктивность определяется как:

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} = \frac{W_1 \Phi_{12}}{i_2}, \text{ Гн,} \quad (10.2)$$

аналогично для второй катушки:

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{W_2 \Phi_{21}}{i_1}, \text{ Гн.} \quad (10.3)$$

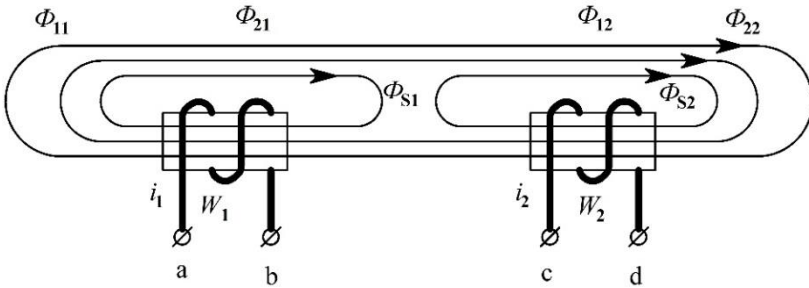


Рис. 10.1. Схема магнитных потоков индуктивно-связанных катушек

Для линейных электрических цепей взаимная индуктивность $M_{12} = M_{21} = M$ зависит от геометрических размеров, числа витков и взаимного расположения катушек.

Если токи в катушках изменяются по синусоидальному закону, то действующие значения ЭДС взаимной индукции определяются зависимостями

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{1M} = -j\omega M I_2 = -jX_M I_2 \\ E_{2M} = -j\omega M I_1 = -jX_M I_1 \end{array} \right\} \quad (10.4)$$

Степень индуктивной связи двух элементов характеризуется коэффициентом связи:

$$K = \sqrt{\frac{\Phi_{21} \cdot \Phi_{12}}{\Phi_1 \cdot \Phi_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (10.5)$$

Важное значение имеет то, как между собой подключены катушки – встречно или согласно.

Тип соединения определяется направлением навивки обмоток в катушках и взаимным расположением катушек. На рисунке 10.2 показана методика изображения направления соединения катушек, в зависимости от направления навивки обмоток. При согласном

соединении жирные точки ставятся возле одноименных выводов катушек, при встречном – возле разноименных.

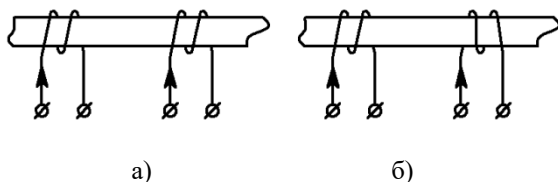


Рис. 10.2. Схемы взаимного подключения индуктивно-связанных катушек:
а – согласное подключение; б – встречное подключение

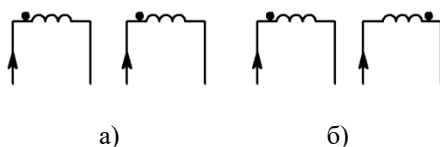


Рис. 10.3. Условные обозначения на схемах соединения индуктивно-связанных катушек:
а – согласное включение; б – встречное включение

При согласном соединении ($M > 0$) и $(\Psi_1 - \Psi_2) \leq \pi$. Следовательно $P_{1M} > 0$, $P_{2M} < 0$, т.е. в первую катушку поступает мощность P_1 , которая больше мощности, расходуемой в первой катушке на тепловые потери на величину мощности P_{1M} , передаваемой из первой катушки во вторую. Во вторую катушку сеть поставляет мощность на величину P_{2M} меньшую, чем мощность тепловых потерь во второй катушке.

При встречном соединении ($M < 0$) и $(\Psi_1 - \Psi_2) \leq \pi/2$, $P_{1M} < 0$, а $P_{2M} > 0$ – мощность передается из второй катушки в первую.

Экспериментальное определение взаимной индуктивности M можно произвести двумя способами:

1) По величине реактивного сопротивления цепи при последовательном соединении катушек в случаях согласного и встречного включений (метод сопротивлений). В этом случае получаем

$$X_{\text{согл}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M), \text{ Ом}; \quad (10.6)$$

$$X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M), \text{ Ом}. \quad (10.7)$$

Если составить разность данных выражений, то получим

$$X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M - L_1 - L_2 + 2M) = 4\omega M, \text{ Ом.} \quad (10.8)$$

Отсюда получаем выражение для определения взаимной индуктивности:

$$M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4\omega}, \text{ Гн.} \quad (10.9)$$

2) Трансформаторная схема. Первая катушка подключается к источнику синусоидальной ЭДС через амперметр, а к зажимам второй подключается вольтметр с высоким внутренним сопротивлением (рис. 10.4). Таким образом, данная схема представляет собой воздушный трансформатор (без стального сердечника), вторичная обмотка которого работает в режиме холостого хода.

При таком способе величина взаимной индукции определяется по зависимости:

$$M_T = \frac{U_3}{\omega I_3}, \text{ Гн.} \quad (10.10)$$

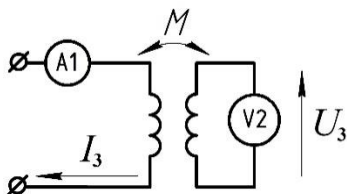


Рис. 10.4. Трансформаторная схема подключения катушек

Задание. Изучить схемы подключения исследуемых индуктивно-связанных цепей при согласном и встречном соединении катушек. Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. На основании полученных данных провести необходимые расчеты характеристик исследуемых цепей, а далее построить векторные диаграммы (для согласного и встречного подключений).

Порядок выполнения работы.

1) Собрать исследуемую цепь для определения параметров катушек согласно рисунку 10.5.

2) Установить необходимое напряжение на входе цепи так, чтобы ток в цепи был равен 0,6 А. Измерить напряжение и мощность. Полученные данные занести в таблицу 10.1.

3) Далее отключить первую катушку и подключить вторую (перемычки переустановить из позиций «1-1», «2-1» и «3-1», в позиции «1-2», «2-2» и «3-2» (рис. 10.5)). Установить значение тока в цепи равное 0,6 А. Провести измерения аналогичные пункту 2. Результаты занести в таблицу 10.1.

4) По данным измерений вычислить параметры катушек по формулам (10.11). Результаты измерений и расчетов записать в таблицу 10.1.

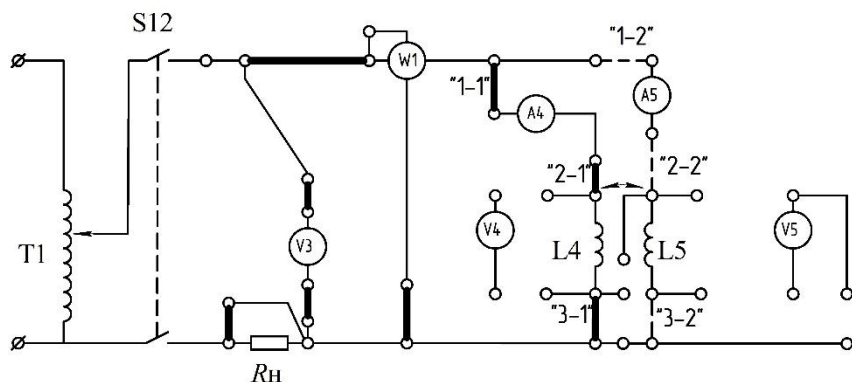


Рис. 10.5. Схема поочередного подключения катушек для экспериментального определения их параметров

Таблица 10.1

Результаты определения параметров катушек индуктивности

Обозначение катушки	Измерено			Рассчитано			
	I, A	U, B	$P, Bт$	$Z, Ом$	$R, Ом$	$X, Ом$	$L, Гн$
1 (L4)	0,6						
2 (L5)							
Обозначение измерительных приборов							
–	A4, A5	V4, V5	W1	–	–	–	–

5) По схеме (рис. 10.6) собрать электрическую цепь для исследования характеристик последовательного соединения индуктивно-связанных катушек методом реактивных сопротивлений, при согласном включении.

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{P}{I^2}, \text{ Ом}, \quad Z = \frac{U}{I}, \text{ Ом}, \\ L &= \frac{X}{\omega}, \text{ Гн}, \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}, \text{ Ом}. \end{aligned} \right\} (10.11)$$

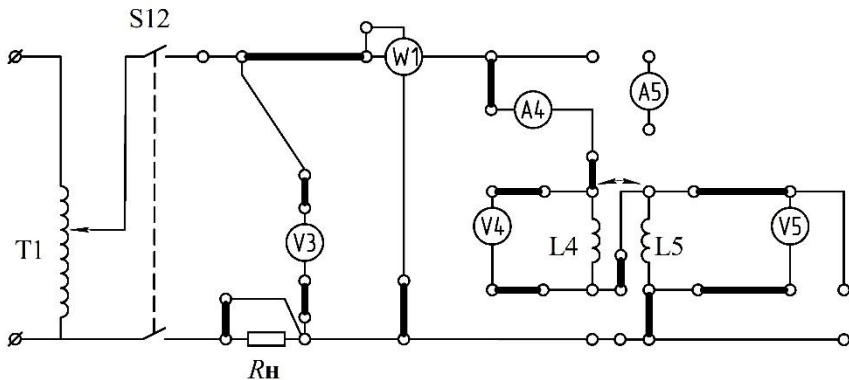


Рис. 10.6. Схема согласного подключения катушек

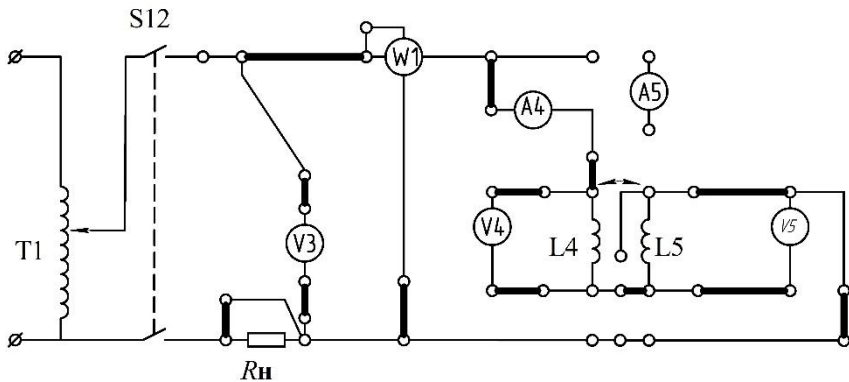


Рис. 10.7. Схема встречного подключения катушек

6) Включить стенд и ЛАТР (тумблеры «Сеть», S12, S45) и установить напряжение на входе цепи $U = 110$ В (по вольтметру V3). Измерить ток, мощность и напряжения для согласного включения катушек. Показания занести в таблицу 10.2.

7) Отключить тумблер S12. Не меняя входное напряжение (регулировку ЛАТРа не менять!), переключить соединение

катушек с согласного на встречное (согласно схеме, представленной на рисунке 10.7). Включить тумблер S12. Произвести замеры аналогичных параметров. Результаты занести в таблицу 10.2.

8) На основании полученных данных провести необходимые расчеты по формулам (10.12) и заполнить таблицу 10.3.

$$\left[\begin{array}{l} Z_1 = \frac{U_1}{I}, \text{ Ом}, \quad Z_2 = \frac{U_2}{I}, \text{ Ом}, \quad Z = \frac{U}{I}, \text{ Ом}, \\ X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2}, \text{ Ом}, \quad X_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2}, \text{ Ом}, \quad X = \sqrt{Z^2 - R_\Sigma^2}, \text{ Ом}, \\ \cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}, \quad \varphi = \arccos \varphi, \text{ град.}, \quad M_C = \frac{X_{\text{согл.}} - X_{\text{встр.}}}{4\omega} \end{array} \right] \quad (10.12)$$

Таблица 10.2

Результаты эксперимента по определению взаимной индуктивности катушек методом сопротивлений

Схема подключения	U, В	I, А	U ₁ , В	U ₂ , В	P, Вт
Согласное	110				
Встречное					
Обозначение измерительных приборов					
–	V3	A4	V4	V5	W1

Таблица 10.3

Результаты расчетов по определению взаимной индуктивности катушек

Схема подключения	Z ₁ , Ом	Z ₂ , Ом	Z, Ом	X ₁ , Ом	X ₂ , Ом	X, Ом	cos φ	φ, град.	M _C , Гн	K
Согласное										
Встречное										

9) Для определения величины взаимной индуктивности методом трансформации собрать цепь согласно схеме (рис. 10.8).

10) Включить тумблер S12 и установить величину тока первой катушки $I_3 = 0,5$ А. Замерить величину напряжения на второй катушке U_3 и занести полученные данные в таблицу 10.4. Провести расчеты величин взаимной индуктивности M_T по формуле (10.10), суммарной погрешности измерений и расчетов ΔM . По величине погрешности сделать вывод о сопоставимости или несопоставимости данных методов.

11) Используя полученные данные построить векторные диаграммы токов и напряжений для схем согласного и встречного включения катушек.

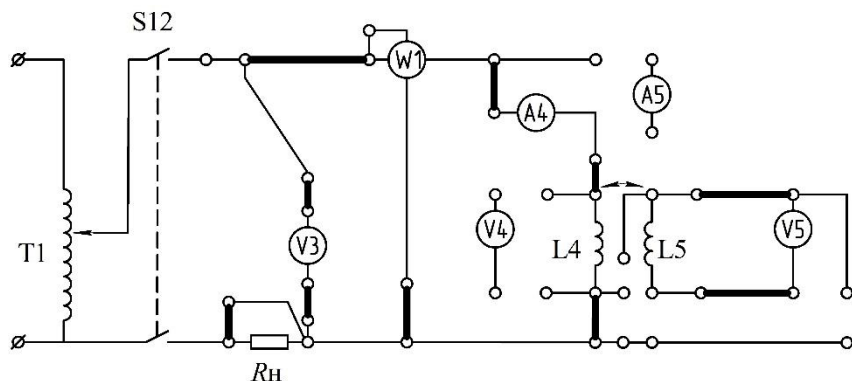


Рис. 10.8. Схема соединения индуктивно-связанных катушек по методу трансформации

Таблица 10.4

Результаты эксперимента по определению взаимной индуктивности катушек методом трансформации

Установлено	Измерено	Расчитано	Погрешность
I_3, A	U_3, B	$M_T, \text{Гн}$	$\Delta M = \frac{M_C - M_T}{M_C} 100\%$
0,5			
Обозначение измерительных приборов			
A4	V5	–	–

Вопросы для самоконтроля

1. В чем отличие согласного включения индуктивно-связанных катушек от встречного, с точки зрения электромагнитных процессов?
2. Что понимают под взаимной индуктивностью?
3. От каких факторов зависит величина взаимной индуктивности двух катушек?
4. Если токи катушек не совпадают друг с другом по фазе, возникнет ли явление взаимной индуктивности?
5. Как влияет индуктивная связь на эквивалентные реактивные сопротивления катушек при согласном и встречном включении?

Лабораторная работа № 11

Исследование характеристик трансформатора без стального сердечника

Цель работы: исследовать характеристики однофазного двух-обмоточного трансформатора, не имеющего стального сердечника.

Трансформатор представляет собой статическое устройство, предназначенное для преобразования числового значения переменного напряжения одной величины в аналогичное напряжение другой величины, а также для электрического разделения цепей и преобразования числовых значений сопротивлений.

Передача энергии из одной цепи (первичной) в другую (вторичную) производится трансформатором за счет явления взаимной индукции.

Трансформатор имеет как минимум две обмотки, находящиеся на общем сердечнике. В «воздушном» трансформаторе сердечник выполнен не из электротехнической стали (ферромагнитного материала), а из какого-либо конструкционного материала, не обладающего ферромагнитными свойствами. Такой сердечник играет роль каркаса, удерживающего установленные на нем электромагнитные катушки (обмотки). Магнитная проницаемость такого сердечника постоянна (примерно равна единице).

Первичная обмотка характеризуется параметрами R_1 и L_1 , вторичная, соответственно R_2 и L_2 ; величина их взаимной индуктивности – M (рис. 11.1). Если ко вторичной цепи подключена нагрузка, то ее сопротивление можно обозначить Z_H .

Направления токов в первичной и вторичной цепях нужно выбрать таким образом, чтобы катушки были включены согласно. Но так как вторичная обмотка не имеет внешнего источника ЭДС, то подключение в любом случае окажется согласным. Составим уравнения для обоих контуров по второму закону Кирхгофа. Получим уравнения в комплексной форме записи:

– для первичной цепи:

$$\dot{I}_1 R_1 + j\omega \dot{I}_1 L_1 + j\omega \dot{I}_2 M = \dot{E}; \quad (11.1)$$

– для вторичной цепи:

$$\dot{I}_2 R_2 + j\omega \dot{I}_2 L_2 + j\omega \dot{I}_1 M + \dot{U}_H = 0. \quad (11.2)$$

Необходимо построить векторную диаграмму трансформатора (рис. 11.2). Предположим, что нагрузка имеет активно-индуктивный характер (в подавляющем большинстве так и есть), то есть

$$\underline{Z}_H = Z_H e^{j\varphi_H}, \text{ Ом.} \quad (11.3)$$

Для начала построения диаграммы совместим ток, проходящий через нагрузку \dot{I}_2 , с вещественной осью диаграммы.

Падение напряжения на нагрузке \dot{U}_H опережает ток \dot{I}_2 на угол φ_H . Падение напряжения на активном элементе $\dot{I}_2 R_2$ совпадает с направлением тока \dot{I}_2 .

Вектор индуктивного падения напряжения $j\omega \dot{I}_2 L_2$ опережает вектор тока \dot{I}_2 на угол 90° . В соответствии с уравнением (11.2) вектор падения напряжения на сопротивлении самоиндукции $j\omega \dot{I}_1 M$ необходимо провести так, чтобы геометрическая сумма падений напряжений во вторичной цепи была равна нулю.

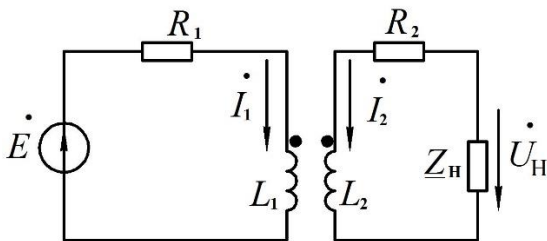


Рис. 11.1. Схема трансформатора без стального сердечника (воздушного)

Далее необходимо построить контур векторов для первичной цепи трансформатора.

Вектор тока \dot{I}_1 отстает от вектора падения напряжения $j\omega \dot{I}_1 M$ на 90° . Вектор падения напряжения на активном сопротивлении первичной цепи $\dot{I}_1 R_1$ совпадает по фазе с вектором тока \dot{I}_1 , а вектор падения напряжения на сопротивлении самоиндукции $j\omega \dot{I}_1 L_1$ опережает вектор тока \dot{I}_1 на 90° .

Вектор падения напряжения на сопротивлении взаимной индуктивности $j\omega \dot{I}_2 M$ опережает вектор тока \dot{I}_2 на 90° .

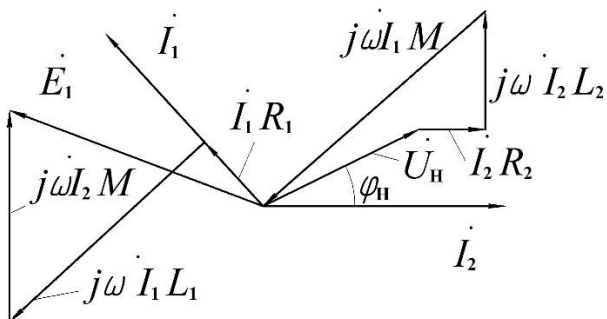


Рис. 11.2. Векторная диаграмма трансформатора

В соответствии с уравнением (11.1) геометрическая сумма построенных векторов первичного контура равна \dot{E} .

Далее для расчета параметров трансформатора необходимо решить систему уравнений (11.1) и (11.2). При этом, предварительно, в уравнение (11.2) необходимо подставить значение падения напряжения на нагрузке

$$\dot{U}_H = \dot{I}_2 \underline{Z}_H = \dot{I}_2 (R_H + jX_H), \text{ В.} \quad (11.4)$$

Решив данные уравнения относительно неизвестного тока \dot{I}_1 , получим:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{(R_1 + R_{вн}) + j(X_1 - X_{вн})}, \text{ А,} \quad (11.5)$$

где $R_{вн}$ и $X_{вн}$ – вносимые из вторичного контура в первичный активное и реактивное сопротивления, Ом.

Полученные вносимые сопротивления (из данного же решения) соответственно равны:

$$R_{вн} = \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_H)^2 + (\omega L_2 + X_H)^2} (R_2 + R_H), \text{ Ом,} \quad (11.6)$$

$$X_{вн} = \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_H)^2 + (\omega L_2 + X_H)^2} (\omega L_2 + X_H), \text{ Ом.} \quad (11.7)$$

Вносимые сопротивления (рис. 11.3) представляют собой такие сопротивления, которые следовало бы «внести» в первичную цепь, то есть включить последовательно с R_1 и X_1 , чтобы учесть

влияние нагрузки вторичной цепи трансформатора на ток в его первичной цепи (рис. 11.3).

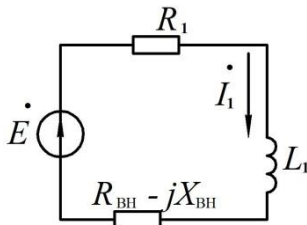


Рис. 11.3. Приведенная схема трансформатора с комплексным вносимым сопротивлением

Связь потокоцепления взаимной индукции одной электрической цепи с током другой характеризуется взаимной индуктивностью M . Если потокоцепление Ψ_{12} первой катушки обусловлено током i_2 второй катушки, то взаимная индуктивность определяется по формуле

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} = \frac{W_1 \Phi_{12}}{i_2}, \text{ Гн}, \quad (11.8)$$

аналогично для второй катушки:

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} = \frac{W_2 \Phi_{21}}{i_1}, \text{ Гн}. \quad (11.9)$$

Для линейных электрических цепей взаимная индуктивность $M_{12} = M_{21} = M$ и зависит от геометрических размеров, числа витков и взаимного расположения катушек.

Степень индуктивной связи двух элементов характеризуется коэффициентом связи:

$$K = \sqrt{\frac{\Phi_{21} \cdot \Phi_{12}}{\Phi_1 \cdot \Phi_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (11.10)$$

Задание. Изучить схемы подключения исследуемых индуктивно-связанных катушек в составе воздушного трансформатора. Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемой цепи, а далее построить ее векторные диаграммы (для режимов холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой).

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему испытуемого воздушного трансформатора (без стального сердечника) согласно рисунку 11.4.

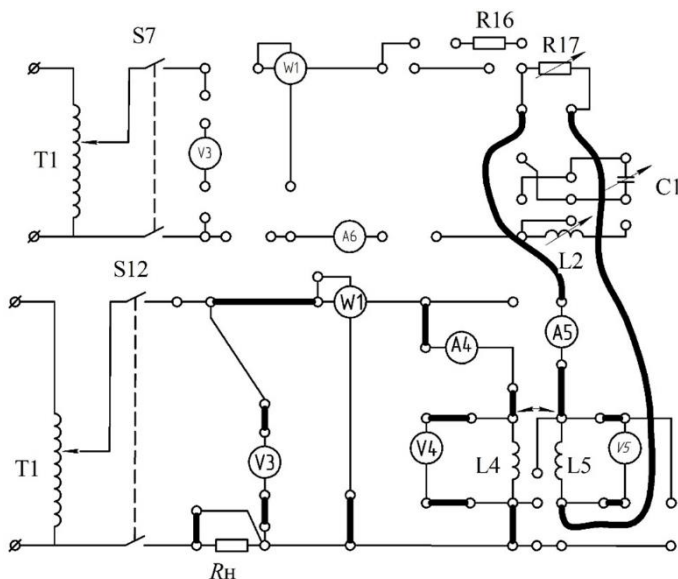


Рис. 11.4. Схема подключения испытуемого трансформатора

2) Включить стенд (тумблером «Сеть»). Включить тумблер S12. Временно отсоединить одну из перемычек, идущих от катушки L5 к сопротивлению R17 создав, тем самым, режим холостого хода.

3) Включить ЛАТР (тумблером S45). Установить напряжение на входе цепи равным 45 В (по вольтметру V3).

4) Провести измерения параметров U_1 , I_1 , U_2 , I_2 , P_1 , P_2 . Полученные данные занести в таблицу 11.1.

5) Не меняя входное напряжение, установить на место временно отсоединенную перемычку. Сопротивление нагрузки R17 установить равным 100 Ом.

6) Провести измерения напряжения, тока и мощности в обеих катушках трансформатора. Показания занести в таблицу 11.1.

7) Далее, установить сопротивление R17 равным 80 Ом. Провести измерения согласно пункту 6. Выполняя аналогичные действия, заполнить таблицу 11.1.

8) Провести расчеты всех требуемых параметров исследуемой цепи трансформатора (по формулам 11.11) и заполнить таблицу 11.1.

Таблица 11.1

Результаты испытания воздушного трансформатора

R ₁₇ , Ом	Измерено						Рассчитано				
	U ₁ , В	I ₁ , А	P ₁ , Вт	U ₂ , В	I ₂ , А	P ₂ , Вт	S ₁ , ВА	cos φ ₁	S ₂ , ВА	cos φ ₂	η
х.х.					0	0			0	0	0
100											
80											
60											
40											
20											
0 (к.з.)				0					0	–	
Обозначение измерительных приборов											
–	V4	A4	W1	V К-50	A К-50	W К-50	–	–	–	–	–

$$S = U \cdot I, \text{ ВА}; \quad \cos \varphi = \frac{P}{S}; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad M = \frac{U_2}{\omega I_1} \text{ Гн.} \quad (11.11)$$

9) По результатам эксперимента и согласно проведенным расчетам построить векторную диаграмму трансформатора для режима под нагрузкой.

Для расчетов, при построении диаграмм, принять следующие параметры катушек: (L4) $L_1 = 0,04$ Гн; (L5) $L_2 = 0,34$ Гн; $M = 0,15$ Гн; $R_1 = 38$ Ом; $R_2 = 97$ Ом.

10. Построить нагрузочные характеристики трансформатора: $I_1 = f(I_2)$, А, $P_1 = f(I_2)$, Вт, $U_2 = f(I_2)$, В, $P_2 = f(I_2)$, Вт, $\eta = f(I_2)$. Все графики построить в одних координатных осях.

Проанализировать полученные результаты, сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение понятию «трансформатор».
2. Перечислить режимы работы трансформатора.
3. На каком явлении основан принцип работы трансформатора?
4. Каково назначение и области применения трансформаторов?
5. Под влиянием каких факторов происходит сдвиг по фазе вторичного напряжения трансформатора относительно первичного?

Лабораторная работа № 12

Исследование ЛЭЦ периодического несинусоидального тока

Цель работы: исследовать характеристики линейных электрических цепей периодических несинусоидальных токов (ЛЭЦПНТ), а также влияние линейных реактивных элементов на форму кривой несинусоидального тока.

Несинусоидальным называется ток, который изменяется во времени по несинусоидальному закону.

Существует 5 причин возникновения несинусоидальных токов в электрической цепи:

✓ Если источники ЭДС (тока) выдают в цепь несинусоидальную ЭДС (ток), а все элементы цепи линейные.

✓ Если источники ЭДС (тока) выдают в цепь синусоидальную ЭДС (ток), но в цепи присутствуют один или несколько нелинейных элементов.

✓ Если источники ЭДС (тока) выдают в цепь несинусоидальную ЭДС (ток) и в цепи присутствуют один или несколько нелинейных элементов.

✓ Если источники ЭДС (тока) выдают в цепь синусоидальную или постоянную ЭДС (ток), а один или несколько элементов цепи периодически меняют свои параметры.

✓ Если в цепи присутствуют источники ЭДС (тока), выдающие синусоидальные ЭДС (токи) различных частот относительно друг друга.

Расчет линейной цепи несинусоидального тока производится методом наложения. Для этого периодическую несинусоидальную ЭДС представляют в виде последовательного соединения нескольких ЭДС кратных частот. Амплитуда и начальные фазы этих ЭДС находятся путем разложения в тригонометрический ряд Фурье, так как несинусоидальные функции ЭДС и токов в электрических цепях удовлетворяют условиям Дирихле. Ряд Фурье может быть представлен в виде суммы гармоник:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \psi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots \\ \dots + A_k \sin(k\omega t + \psi_k), \quad (12.1)$$

или в виде суммы синусных и косинусных составляющих этих гармоник:

$$f(t) = A_0 + B_1 \sin \omega t + B_2 \sin 2\omega t + \dots + C_1 \cos \omega t + C_2 \cos 2\omega t, \quad (12.2)$$

где A_0 – постоянная составляющая;

$A_1 \sin(\omega t + \psi_1)$ – первая или основная гармоника;

$A_k \sin(k\omega t + \psi_k)$ – высшая гармоника порядка k ;

A_k – амплитуда гармоники (ЭДС, тока или напряжения);

$\psi_1, \psi_2 \dots \psi_k$ – начальные фазы гармоник.

$$\operatorname{tg} \psi_k = \frac{C_k}{B_k}. \quad (12.3)$$

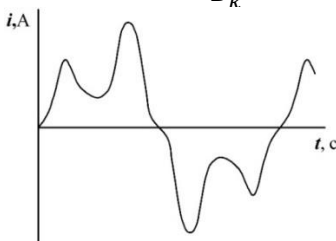


Рис. 12.1. Пример кривой несинусоидального тока, полученной методом наложения двух синусоид с трехкратным различием по частоте

Расчет токов в цепи производится для каждой из гармоник в отдельности, с учетом того, что сопротивление цепи определяется номером гармоники:

$$X_L = k\omega L, \text{ Ом}; \quad X_C = \frac{1}{k\omega C}, \text{ Ом}. \quad (12.4)$$

Нельзя суммировать комплексные значения токов и напряжений отдельных гармоник, так как их частоты различны.

Для определения действующих значений измеряемых величин применяют приборы электромагнитной, электродинамической и тепловой систем.

Приборы магнитоэлектрической системы реагируют на среднее значение тока или напряжения за период. Магнитоэлектрические с выпрямлением – на среднее значение за половину периода; амплитудные электронные вольтметры (мультиметры) – на максимальное значение, с дальнейшим вычислением действующего значения величины по алгоритму, рассчитанному на синусоидальный ток, то есть с соотношением $I_m / I = \sqrt{2}$. Вследствие этого, при

измерении несинусоидальных величин, цифровые мультиметры обладают высокой погрешностью и использовать их недопустимо.

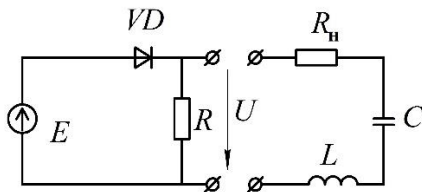


Рис. 12.2. Схема простейшего источника несинусоидального напряжения

Для характеристики несинусоидальных кривых вводятся следующие коэффициенты:

✓ коэффициент формы:

$$k_{\phi} = \frac{I}{I_{\text{cp}}} ; \quad (12.5)$$

✓ коэффициент искажения:

$$k_u = \frac{I_1}{I} ; \quad (12.6)$$

✓ коэффициент амплитуды:

$$k_a = \frac{I_m}{I} . \quad (12.7)$$

Задание. Изучить схемы соединения исследуемых цепей несинусоидального тока, при наличии и отсутствии реактивных элементов. Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. На основании полученных параметров провести необходимые расчеты характеристик исследуемых цепей. Исследовать осциллограммы напряжений на элементах цепей и зарисовать их (для всех исследованных случаев).

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 12.3).
- 2) Включить стенд, исследовать форму кривой напряжения (на сопротивлении R_9) источника несинусоидального напряжения. Входное напряжение установить равным 100 В.

Осциллограмма напряжения U_m исследуемого источника должна быть зарисована с экрана ЭО (электронный осциллограф) в тетрадь. По ней необходимо определить амплитуду напряжения U_m .

3) Провести измерения необходимых характеристик цепи и занести их в таблицу 12.1. Рассчитать коэффициенты k_a и k_ϕ . Результаты занести в таблицу 12.1.

4) После проведения опыта осциллограф должен быть градуирован. Для этого, не изменяя коэффициент вертикального усиления, осциллограф нужно подключить к известному синусоидальному напряжению, амплитуда которого A_m измеряется по осциллограмме в миллиметрах.

Если в последующих экспериментах коэффициент усиления осциллографа по оси «у» не изменяется, то повторная градуировка не нужна.

Масштаб напряжения на осциллограммах определяется по зависимости:

$$m_U = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{A_m}, \frac{\text{В}}{\text{мм}}, \quad (12.8)$$

где A_m – амплитудное значение осциллограммы, мм.

Масштаб тока определяется по следующей зависимости:

$$m_I = \frac{m_U}{R}, \frac{\text{А}}{\text{мм}}, \quad (12.9)$$

где R – сопротивление, к которому подключен осциллограф, Ом.

5) Далее подключить реактивные элементы параллельно резистору R_9 (рис. 12.4). Вследствие сдвига фаз на реактивных элементах ток, бывший пульсирующим, еще более исказится. Необходимо зарисовать полученную осциллограмму и проанализировать ее.

6) Выполнить расчеты всех необходимых параметров и заполнить таблицу 12.1.

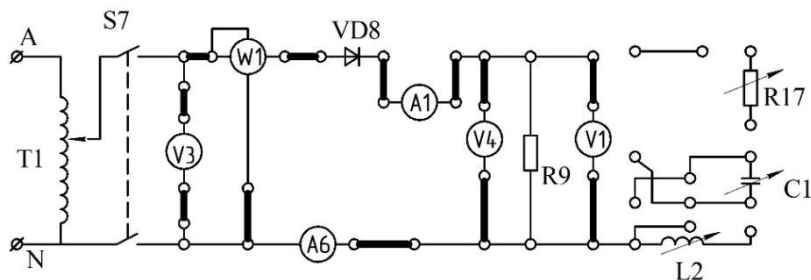


Рис. 12.3. Схема подключения несинусоидального источника ЭДС

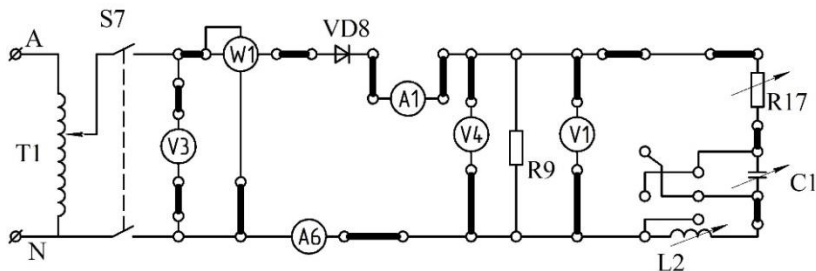


Рис. 12.4. Схема подключения несинусоидального источника ЭДС с реактивной нагрузкой

Таблица 12.1

Результаты исследования параметров несинусоидального тока

Прибор	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Величина
Измерено				
A6	Действующее значение несинусоидального тока	I	А	
A1	Среднее значение несинусоидального тока	I_{cp}	А	
V3	Действующее значение напряжения на входе цепи	$U_{вх}$	В	
V1	Среднее значение несинусоидального напряжения	U_{cp}	В	
V4	Действующее значение несинусоидального напряжения	U	В	
W1	Активная мощность тока	P	Вт	
ОЭ	Амплитуда напряжения	U_m	В	
Вычислено				
	Масштаб напряжения	m_u	В/мм	
	Масштаб тока	m_i	А/мм	
	Коэффициент формы	k_ϕ	-	
	Коэффициент амплитуды	k_a	-	
	Сопротивление	$R_9 = U/I$	Ом	
	Входное сопротивление	$R_{вх} = U_{вх}/I$	Ом	
	Амплитуда тока	$I_m = U_m/R_9$	А	
	Коэффициент мощности	$\cos \varphi = P/U \cdot I$	-	

Вопросы для самоконтроля

1. Как определить амплитуду напряжения, если имеется его изображение на экране осциллографа и масштаб m_u ?
2. Записать общие формулы разложения несинусоидальной функции в ряд Фурье, в тригонометрической и в комплексной форме записи.
3. Пояснить, как влияют параметры R , L , C цепи на форму кривой несинусоидального тока.
4. Пояснить, приборами каких систем возможно производить измерения параметров несинусоидальных токов, почему.
5. Каковы особенности разложения симметричных кривых в ряд Фурье?

Лабораторная работа № 13

Исследование характеристик ЛЭЦПНТ графоаналитическим методом

Цель работы: изучить графоаналитический метод исследования линейной электрической цепи периодического несинусоидального тока (ЛЭЦПНТ). Провести исследование параметров ЛЭЦПНТ графоаналитическим методом.

Периодическими несинусоидальными токами и напряжениями называются токи и напряжения, которые изменяются во времени по несинусоидальному закону.

Для анализа несинусоидальной функции $f(x)$ ее необходимо разложить в ряд Фурье. Аргумент данной функции зависит от времени

$$x = \omega t = \frac{2\pi}{T} t, \text{ рад}, \quad (13.1)$$

где T – период несинусоидальной функции, с;

t – текущий момент времени, с.

В общем виде ряд Фурье для любой периодической функции, например $Y = f(x)$, записывается так:

$$Y = f(x) = Y_0 + Y_1' \sin x + Y_2' \sin 2x + \dots + Y_1'' \cos x + Y_2'' \cos 2x + \dots, \quad (13.2)$$

где Y_0 – постоянная составляющая;

Y_1' – амплитуда синусной составляющей первой гармоники;

Y_2' – амплитуда синусной составляющей второй гармоники;

Y_1'' – амплитуда косинусной составляющей первой гармоники;

Y_2'' – амплитуда косинусной составляющей второй гармоники.

Так как несинусоидальные функции являются криволинейными (существенно искаженными), то перечисленные параметры необходимо находить посредством интегрирования исходной несинусоидальной функции. Так, постоянная составляющая рассчитывается, как интеграл от всей функции за один полный ее период:

$$Y_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx. \quad (13.3)$$

Постоянная составляющая может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Коэффициенты первой гармоники как синусной, так и косинусной составляющих, рассчитываются по соответствующим функциям. Для первой гармоники:

$$Y_1' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin x dx. \quad (13.4)$$

Аналогично и для косинусной составляющей:

$$Y_1'' = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos x dx. \quad (13.5)$$

Количество исследуемых гармоник может быть очень большим, поэтому данные выражения справедливы для любого номера гармоники, или в общем виде получим:

$$\begin{aligned} Y_k' &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin kx dx, \\ Y_k'' &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos kx dx. \end{aligned} \quad (13.6)$$

Гармоникой несинусоидальной функции называется ее синусоидальная составляющая, имеющая частоту *кратную* частоте исходной несинусоидальной функции. Гармоника, частота которой равна частоте несинусоидальной функции, называется первой или основной.

Проводить расчеты и представлять результаты отдельно по синусным и косинусным составляющим затруднительно, поэтому удобнее их представить в виде одной (объединенной гармоники), например, синусной составляющей. Это возможно, так как косинусная составляющая опережает синусную на 90 градусов. То есть их векторы являются катетами, а объединенная гармоника – есть гипотенуза (рис. 13.1). Тогда получим:

$$Y_k = \sqrt{(Y'_k)^2 + (Y''_k)^2}. \quad (13.7)$$

Кроме того, объединенная синусная гармоника сдвинута по фазе относительно исходной синусной составляющей соответствующего номера, так как она содержит в себе и косинусную составляющую. Угол сдвига по фазе Ψ_k есть угол наклона вектора объединенной гармонике к вещественной оси (рис. 13.1). На рисунке угол Ψ_k заменен углом $\alpha = \Psi_k$. Определяется он через отношение противолежащего катета к прилежащему:

$$\operatorname{tg} \Psi_k = \frac{Y''_k}{Y'_k}. \quad (13.8)$$

В результате данных преобразований получим объединённую синусоидальную гармонику несинусоидальной функции

$$Y_k \sin(kx + \Psi_k) = Y'_k \sin kx + Y''_k \cos kx. \quad (13.9)$$

Гармоники, у которых k четное число, называются четными, а у которых k нечетное число – нечетными.

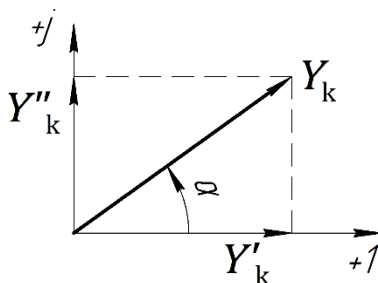


Рис. 13.1. Векторная диаграмма k -й гармоники функции

Несинусоидальные функции подразделяются на две группы:

- ✓ геометрически правильной формы (треугольной, трапецидальной, прямоугольной (меандр)). Их функции уже рассчитаны и изложены в справочниках;
- ✓ геометрически неправильной (произвольной) формы. Они раскладываются в ряд Фурье графоаналитическим методом.

Так как интеграл является суммой ординат бесконечно малых участков функции, то его можно заменить (с определенной

погрешностью) суммой конечного числа слагаемых. Чем большее количество слагаемых взять, тем выше будет точность анализа.

В процессе анализа необходимо разделить период исследуемой функции, равный 2π , на m -е количество равных участков, с номерами от 1 до n (рис. 13.2). Длина каждого участка составит

$$\Delta x = \frac{2\pi}{m}. \quad (13.10)$$

Таким образом, интегральные функции (13.3) и (13.6) будут представлять собой сумму. Например, постоянная составляющая

$$Y_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_1^{n=m} f_n(x) \Delta x = \frac{1}{2\pi} \sum_1^m f_n(x) \frac{2\pi}{n} = \frac{1}{n} \sum_1^m f_n(x), \quad (13.11)$$

где n – текущий индекс участка, в интервале от 1 до m ;

$f_n(x)$ – значение функции $f(x)$, при $x = (n - 0,5)\Delta x$, т.е. в середине n -го участка (рис. 13.2).

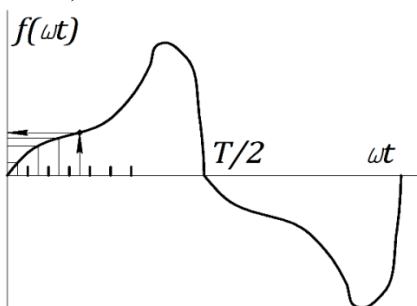


Рис. 13.2. Схема измерения несинусоидальной функции

Соответственно, синусная составляющая после интегрирования будет иметь вид

$$Y'_k = \frac{2}{2\pi} \sum_1^m f_n(x) \frac{2\pi}{n} \sin_n kx = \frac{2}{n} \sum_1^m f_n(x) \sin_n kx. \quad (13.12)$$

Соответственно ей и косинусная составляющая примет вид

$$Y''_k = \frac{2}{2\pi} \sum_1^m f_n(x) \frac{2\pi}{n} \cos_n kx = \frac{2}{n} \sum_1^m f_n(x) \cos_n kx. \quad (13.13)$$

Количество гармоник, на которые раскладывается несинусоидальная функция, зависит от необходимой точности расчетов. Обычно рассчитывается 1, 3, 5-я. Четные гармоники не рассчитываются, так как они симметричны относительно оси абсцисс. Количество участков m , на которые делится период функции, принимается четным и равным 12, 18, 24, 48 и т.д.

При построении гармоник на общем графике необходимо масштаб по оси абсцисс для k -гармоники брать в k раз большим, чем для первой.

Задание. Исследовать несинусоидальные функции напряжения и тока в линейной цепи. Снять и зарисовать осциллограммы функций. Произвести их промеры (оцифровывание), а затем разложить в ряд Фурье, состоящий из постоянной составляющей 1, 3 и 5-й гармоник, проанализировать результаты исследований и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать электрическую цепь по схеме (рис. 13.3).
- 2) Включить стенд, исследовать форму кривой напряжения источника несинусоидального напряжения. Входное напряжение установить равным 100 В.

Осциллограмма напряжения U_m исследуемого источника должна быть зарисована с экрана ЭО (электронный осциллограф) в тетрадь. По ней необходимо определить амплитуду напряжения U_m .

- 3) После проведения опыта осциллограф должен быть градуирован. Для этого, не изменяя коэффициент вертикального усиления, осциллограф нужно подключить к известному синусоидальному напряжению, амплитуда которого A_m измеряется по осциллограмме в миллиметрах.

Масштаб напряжения на осциллограммах определяется по зависимости:

$$m_U = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{A_m}, \frac{\text{В}}{\text{мм}}, \quad (13.14)$$

где A_m – амплитудное значение осциллограммы, мм.

- 4) Далее подключить реактивные элементы параллельно резистору R_0 (рис. 13.4). Вследствие сдвига фаз на реактивных

элементах ток, бывший пульсирующим, еще более исказится. Необходимо зарисовать полученную осциллограмму и проанализировать ее.

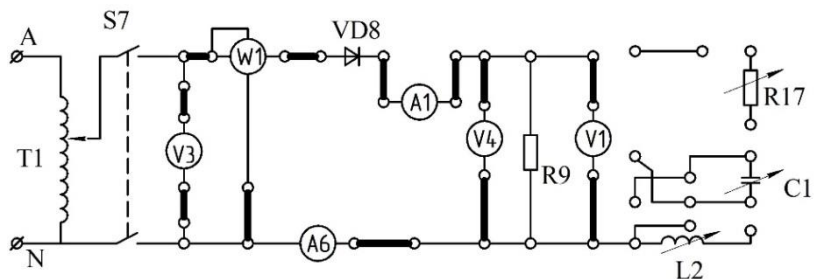


Рис. 13.3. Схема подключения несинусоидального источника ЭДС

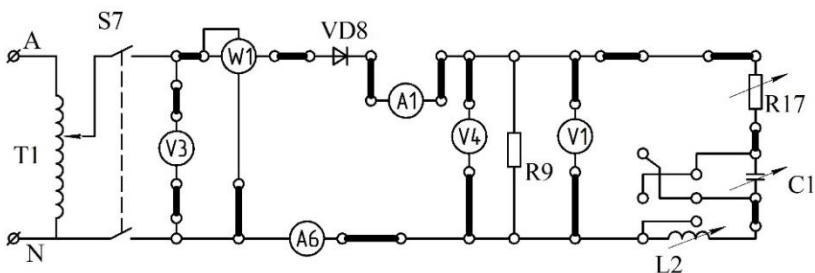


Рис. 13.4. Схема подключения несинусоидального источника ЭДС с реактивной нагрузкой

5) Оцифровать осциллограмму. Провести разложение несинусоидальной кривой на составляющие ряда Фурье в соответствии с формулами (13.11), (13.12) и (13.13). Записать ряд Фурье.

Вопросы для самоконтроля

1. Каково назначение импульсных блоков питания в источниках света?
2. Поясните принцип работы импульсных источников питания.
3. По какой причине импульсный источник питания является генератором несинусоидальных колебаний тока и напряжения в сети.
4. Чем опасны гармоники кратные трем, генерируемые ИБП, для сетей трехфазного тока?
5. Перечислите способы защиты электросети от высших гармоник, генерируемых ИБП.

Лабораторная работа №14

Исследование энергосберегающих источников света с импульсными блоками питания

Цель работы: изучить назначение, устройство и принцип работы импульсных блоков питания и энергосберегающих источников света; исследовать электротехнические характеристики перечисленных устройств и их влияние на качество электроэнергии, питающей сети.

Современные энергоэффективные источники света, компактные люминесцентные и светодиодные, обладают ярко выраженной нелинейной вольт-амперной характеристикой. К тому же, светоизлучающий элемент таких ламп запитан не напрямую от сети, а через специальный блок питания, встроенный в лампу. Во многих электрических приборах применяются так называемые бестрансформаторные блоки питания.

Такие блоки питания, преобразующие напряжение одного вида в другой, могут быть:

- ✓ встроены внутрь корпуса потребителя, как на многих микропроцессорных приборах;
- ✓ или изготовлены отдельными модулями с соединительными проводами по образцу обычного зарядного устройства.

В современной электротехнике успешно используются два принципа преобразования энергии для электрических потребителей, основанные:

- 1) на использовании аналоговых трансформаторных устройств для передачи мощности во вторичную схему;
- 2) импульсных блоках питания.

Такие устройства имеют принципиальные отличия в конструкции, работают по разным технологиям.

Трансформаторные блоки питания. Первоначально создавались только такие конструкции. Они изменяют структуру напряжения за счет работы силового трансформатора, питающегося от сети 220 В, в котором происходит понижение амплитуды синусоидальной гармоники, направляемой далее на выпрямительное

устройство, состоящее из силовых диодов, включенных, как правило, по схеме моста.

После этого пульсирующее напряжение сглаживается параллельно подключенной емкостью, подобранной по величине допустимой мощности, и стабилизируется полупроводниковой схемой с силовыми транзисторами.

Импульсные блоки питания (ИБП). Подобные конструктивные разработки получают все большее распространение в электротехнических приборах благодаря:

- ✓ доступности комплектования распространенной элементной базой;
- ✓ надежности в исполнении;
- ✓ возможностям расширения рабочего диапазона выходных напряжений.

Практически все источники импульсного питания незначительно отличаются по конструкции и работают по одной, типичной схеме.

В состав основных деталей источников питания входят:

- ✓ сетевой выпрямитель, собранный из входных дросселей, электромеханического фильтра, обеспечивающего отстройку от помех и развязку статики с конденсаторами, сетевого предохранителя и диодного моста;
- ✓ накопительная фильтрующая емкость;
- ✓ ключевой силовой транзистор;
- ✓ задающий генератор;
- ✓ схема обратной связи, выполненная на транзисторах;
- ✓ оптопара;
- ✓ импульсный источник питания, со вторичной обмотки которого исходит напряжение для преобразования в силовую цепь;
- ✓ выпрямительные диоды выходной схемы;
- ✓ цепи управления выходного напряжения, например, на 12 В с подстройкой, изготовленной на оптопаре и транзисторах;
- ✓ фильтрующие конденсаторы;
- ✓ силовые дроссели, выполняющие роль коррекции напряжения и его диагностики в сети.

Принцип работы ИБП. Импульсный блок питания выдает стабилизированное питающее напряжение за счет использования принципов взаимодействия элементов инверторной схемы.

Напряжение сети 220 В поступает по подключенным проводам на выпрямитель. Его амплитуда сглаживается емкостным фильтром за счет использования конденсаторов, выдерживающих пики порядка 300 В, и отделяется фильтром помех.

Входной диодный мост выпрямляет проходящие через него синусоиды, которые затем преобразуются транзисторной схемой в импульсы высокой частоты и прямоугольной формы с определенной скважностью. Они могут быть:

- ✓ с гальваническим отделением сети питания от выходных цепей;
- ✓ без выполнения гальванической развязки.

Импульсные блоки обладают рядом преимуществ, перечисленных выше, и существенными недостатками. Важнейшим из недостатков является импульсность потребления тока из питающей сети. Импульсность потребления равносильна периодическому включению и отключению нагрузки.

Если к сети подключено небольшое количество ИБП с потребителями, то существенного влияния на сеть не оказывается, однако в последнее время количество электропотребителей с ИБП существенно возросло.

Проблема в том, что импульсность порождает весь спектр высших гармоник тока и напряжения, что существенно снижает качество электроэнергии питающей сети.

Высшие гармоники сказываются на работе других электроприборов, приводя к пробоям и коротким замыканиям, ускоренному старению изоляции и т.д.

В трехфазных сетях из высших гармоник наиболее опасны гармоники кратные трем. Так как именно они образуют токи нулевой последовательности, накладываются в нулевом проводе. Тогда как нулевые жилы кабелей и вводы трансформаторов не рассчитаны на высокие токи. Это приводит к повреждению кабелей и питающих трансформаторов.

Важной проблемой является и то, что сети и ее элементы обладают индуктивностью и емкостью, импульсное потребление тока приводит к возникновению переходных процессов в электросети, как следствие скачкам напряжения и тока.

Исследования необходимо проводить на различных видах ламп: люминесцентной, светодиодной.

Принципиальная схема подключения люминесцентной лампы приведена на рисунке 14.1.

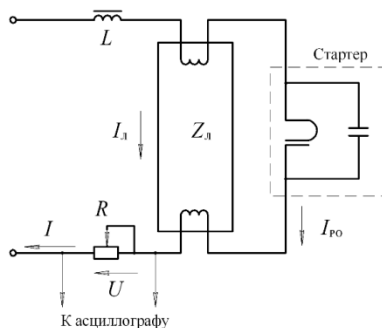


Рис. 14.1. Принципиальная схема подключения люминесцентной лампы типа ЛБ

Люминесцентная лампа является типичным нелинейным элементом в цепи синусоидального тока, поэтому на схеме ее можно изобразить в качестве нелинейного сопротивления.

Для исследования осциллограммы падения напряжения на лампе выводы осциллографа подключаются непосредственно к выводам лампы (рис. 14.2). Для наблюдения формы кривой тока осциллограф необходимо подключить к выводам какого-либо балластного сопротивления R . Оно имеет небольшую величину (около 1-5 Ом) и необходимо для преобразования тока в падение напряжения на нем и подачи этого напряжения на осциллограф. Так как сопротивление R линейное, то форма кривой падения напряжения повторит форму кривой тока лампы (14.2).

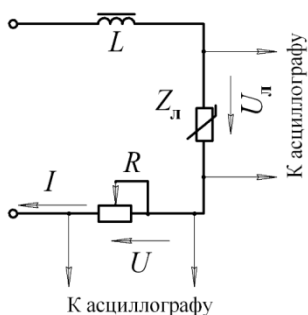


Рис. 14.2. Схема для исследования люминесцентной лампы

В результате исследований получена периодическая несинусоидальная функция падения напряжения на люминесцентной лампе (рис. 14.3).

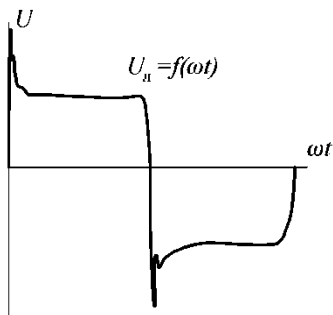


Рис. 14.3. Осциллограмма падения напряжения на люминесцентной лампе

Импульсность блока питания лампы приводит к существенному искажению функции напряжения.

Аналогичные исследования проведены на светодиодной лампе, схема подключения которой представлена на рисунке 14.4.

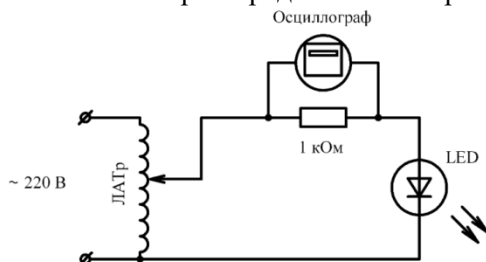


Рис. 14.4. Схема подключения светодиодной лампы

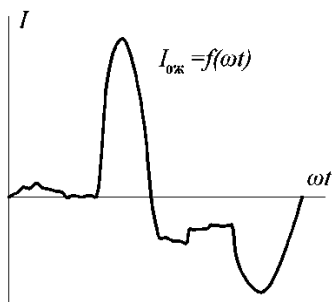


Рис. 14.5. Осциллограмма тока светодиодной лампы

Ток, потребляемый светодиодной лампой, также имеет явно несинусоидальный характер, с ярко выраженными импульсами и интервалами времени, когда ток отсутствует.

При большом количестве параллельно подключенных ламп такого типа их токи накладываются, вызывая еще большее искажение тока в сети и снижение качества электроэнергии.

Задание. Изучить устройство и принцип работы энергосберегающих источников света, а также схемы импульсных блоков питания. Изучить схемы исследуемых цепей лабораторных установок. Провести исследования электротехнических параметров электронных импульсных блоков питания энергосберегающих источников света. Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. Зарисовать осциллограммы падений напряжений и токов на входах исследуемых устройств. На основании измеренных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемых цепей.

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать цепь согласно рисунку 14.6.

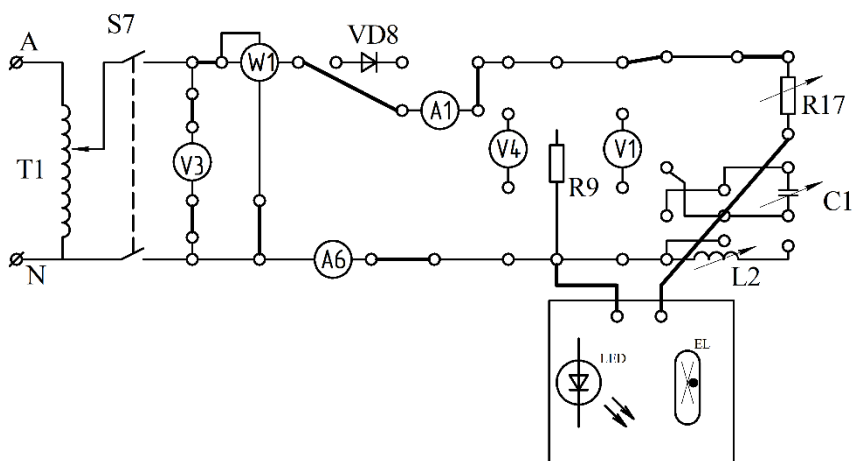


Рис. 14.6. Схема исследования источников света с ИБП

- 2) Включить сеть, ЛАТР (тумблер S7), установить напряжение равным 220 В.

3) Включить люминесцентную лампу. Снять показания приборов и зафиксировать их.

4) Подключить осциллограф к выводам лампы и снять осциллограмму напряжения на лампе. Затем подключить осциллограф к выводам резистора R17. Снять и зарисовать осциллограммы формы тока лампы.

5) Отключить люминесцентную лампу и включить светодиодную.

6) Произвести действия, указанные в пп. 2-5. Отключить стенд.

7) Провести анализ осциллограмм, полученных с обеих ламп, сделать выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие последствия вызывает нелинейность ВАХ энергосберегающих источников света?

2. Какими критериями оценивается качество электроэнергии?

3. Каково назначение электронных блоков питания источников света?

4. Чем опасны гармоники кратные трем, генерируемые импульсными блоками питания, для цепей трехфазного тока?

5. Каким образом несинусоидальный ток в цепи питания светильника возможно наблюдать посредством осциллографа?

Лабораторная работа №15

Исследование переходных процессов в ЛЭЦ

Цель работы: исследовать явление, условия возникновения и характеристики переходных процессов, возникающих при подаче Π -образного сигнала в ЛЭЦ с последовательным соединением активно-реактивных элементов.

При коммутациях или авариях в электрической цепи имеют место переходные процессы – процессы перехода цепи из одного установившегося режима работы в другой, отличающегося чем-либо от предыдущего, например амплитудой, величиной ЭДС, частотой, конфигурацией цепи.

Периодическими являются режимы синусоидального и постоянного токов, а также отсутствия тока в цепи.

Переходные процессы вызываются коммутацией в цепи. Коммутация – это процесс замыкания и размыкания выключателей (рис. 15.1).

Переходные процессы обычно являются быстро протекающими. Длительность переходных процессов составляет, как правило, от 10^{-9} до 10^{-1} с, и крайне редко может достигать 10^2 с.

В цепях с реактивными элементами L и C за время переходного процесса происходит перераспределение энергии, запасенной в конденсаторе в форме электрического поля:

$$W_C = \frac{CU^2}{2}, \text{ Дж}, \quad (15.1)$$

а в индуктивной катушке в форме магнитного поля:

$$W_L = \frac{LI^2}{2}, \text{ Дж}. \quad (15.2)$$

Составим уравнения по второму закону Кирхгофа для схемы (15.1) при замкнутом ключе.

Сумма падений напряжений на активном и реактивном элементах равна ЭДС:

$$u_L + Ri = E, \quad (15.3)$$

или

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E. \quad (15.4)$$

Таим образом, уравнение (15.4) представляет собой дифференциальное уравнение переходного процесса.

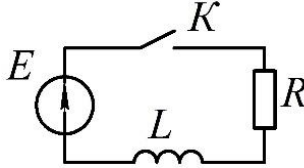


Рис. 15.1. Схема для создания переходного процесса

Общий интеграл линейного дифференциального уравнения равен сумме частного решения неоднородного уравнения и общего уравнения однородного уравнения.

Частное решение уравнения (15.4) равно:

$$i = \frac{E}{R}. \quad (15.5)$$

Решением однородного уравнения является показательная функция вида $A \cdot e^{pt}$.

Постоянные коэффициенты A и p не зависят от времени. В данном случае они составляют:

$$A = -\frac{E}{R}, \text{ A}, \quad p = -\frac{R}{L}, \text{ c}^{-1}. \quad (15.6)$$

Следовательно, решение уравнения (15.4) будет иметь вид

$$i = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}, \text{ A}. \quad (15.7)$$

Частное решение неоднородного уравнения называется принужденной составляющей тока, а полное решение однородного – свободной составляющей.

Исходя из схемы, представленной на рисунке 15.1, и законов Кирхгофа можно составить уравнение:

$$\begin{bmatrix} i_{\text{пр}} = \frac{E}{R}, \text{ A,} \\ i_{\text{св}} = -\frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L}t}, \text{ A,} \\ i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}, \text{ A.} \end{bmatrix} \quad (15.8)$$

Так как переходные процессы возможны только в цепях, содержащих инерционные элементы L и C , поэтому процесс не может произойти мгновенно.

Действительно, скачкообразное изменение энергии привело бы к выделению в индуктивностях и емкостях бесконечно больших мощностей, что лишено физического смысла.

Принимают, что коммутация происходит в момент времени $t = 0$ с. Поэтому переходные процессы подчиняются двум законам коммутации.

Первый закон коммутации. Ток через индуктивный элемент L непосредственно до коммутации $i_L(0-)$ равен току через тот же индуктивный элемент непосредственно после коммутации $i_L(0+)$:

$$i_L(0-) = i_L(0+). \quad (15.9)$$

Второй закон коммутации. Напряжение на емкостном элементе C непосредственно до коммутации $u_C(0-)$ равно напряжению на этом же емкостном элементе непосредственно после коммутации $u_C(0+)$:

$$u_C(0-) = u_C(0+). \quad (15.10)$$

Начальные значения тока в индуктивности и напряжения на емкости в первый момент времени после коммутации называются независимыми начальными условиями, так как они определяются непосредственно из законов коммутации.

Все остальные токи и напряжения на элементах цепи в первый момент времени после коммутации определяются из расчета схемы для момента времени $t = (0+)$ и называются зависимыми начальными условиями.

Следует указать, что все токи и напряжения, не связанные законами коммутации, могут изменяться скачкообразно.

Задание. Изучить схемы подключения исследуемых цепей с активной и активно-реактивной нагрузкой. Провести необходимые измерения параметров исследуемых схем. Зарисовать осциллограммы на элементах R , L и C . На основании полученных параметров провести требуемые расчеты характеристик исследуемых цепей.

Порядок выполнения работы.

1) Подключить осциллограф к выводам ГПН (рис. 15.2). Установить частоту ГПН равную 50 Гц. Включить стенд и ГПН.

2) С помощью осциллографа измерить величины t_1 , t_2 , T , U_m , зарисовать осциллограмму (она должна быть похожа на осциллограмму, изображенную на рисунке 15.3). Полученные данные занести в таблицу 15.1.

3) Установить частоту ГПН равную 1 кГц. Выполнить действия согласно пункту 2.

В целях проверки необходимо учитывать, что

$$T = t_1 + t_2 = 0,02 \text{ с.} \quad (15.11)$$

4) Собрать цепь по схеме (рис. 15.4). Исследовать переходной процесс в цепи R , C . Установить величину индуктивности L_2 одноименным переключателем в позицию «2». Установить частоту ГПН равную 50 Гц. С помощью осциллографа измерить величины напряжений на выводах ГПН и RC элементах. Показания занести в таблицу 15.2. Зарисовать осциллограммы с элементов R и C .

Те же измерения выполнить при частоте ГПН 1 кГц.

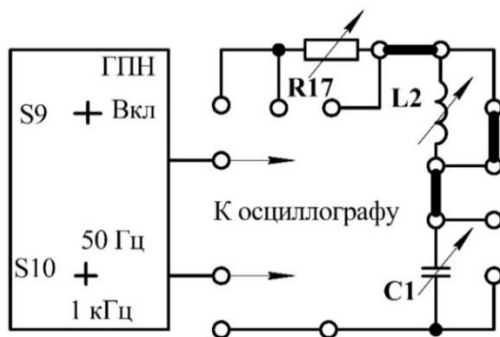


Рис. 15.2. Схема для исследования характеристик ГПН

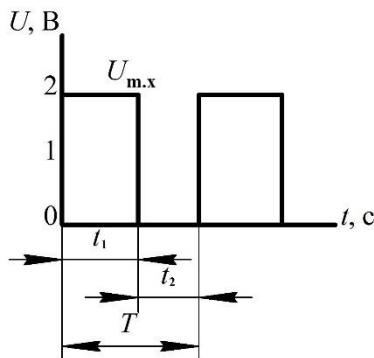


Рис. 15.3. Осциллограмма выходного напряжения ГПН

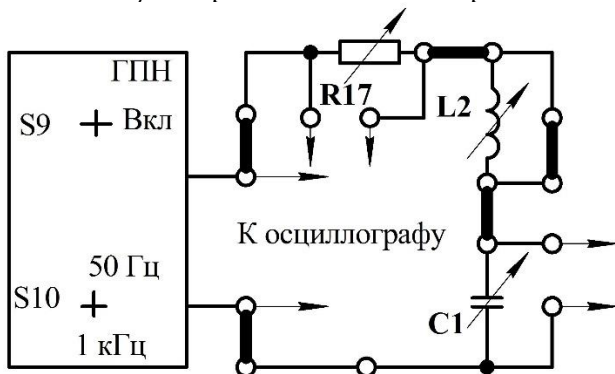


Рис. 15.4. Схема подключения RC-цепи

5) Собрать цепь по схеме (рис. 15.5). Исследовать переходной процесс в цепи R, L . Установить величину индуктивности $L2$ одноименным переключателем в позицию «2». Установить частоту ГПН равную 50 Гц. С помощью осциллографа измерить величины напряжений на выводах ГПН и RL элементах. Показания занести в таблицу 15.2. Зарисовать осциллограммы с элементов R и L .

Те же измерения выполнить при частоте ГПН 1 кГц.

6) Собрать цепь по схеме (рис. 15.6). Исследовать переходной процесс в цепи RLC . Установить величину индуктивности $L2$ одноименным переключателем в позицию «2». Установить частоту ГПН равную 50 Гц. С помощью осциллографа измерить величины напряжений на выводах ГПН и RLC элементах. Показания занести в таблицу 15.2. Зарисовать осциллограммы с элементов R, L и C .

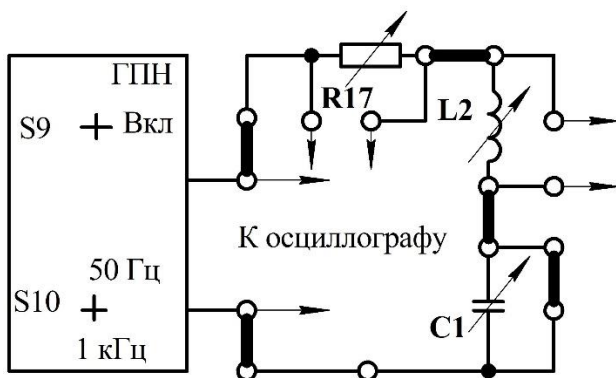


Рис. 15.5. Схема подключения RL -цепи

7) Определить по экспериментальным осциллограммам и расчетным путем по параметрам RLC угловую частоту затухающих колебаний ω :

$$\omega_{\text{эксп}} = \frac{2\pi}{T_{\text{эксп}}}, \text{ с}^{-1}, \quad \omega_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}, \text{ с}^{-1}. \quad (15.12)$$

Результаты записать в таблицу 15.2.

Ток цепи рассчитывается по формуле

$$I_m = \frac{U_m R}{R_{17}}, \text{ А}. \quad (15.13)$$

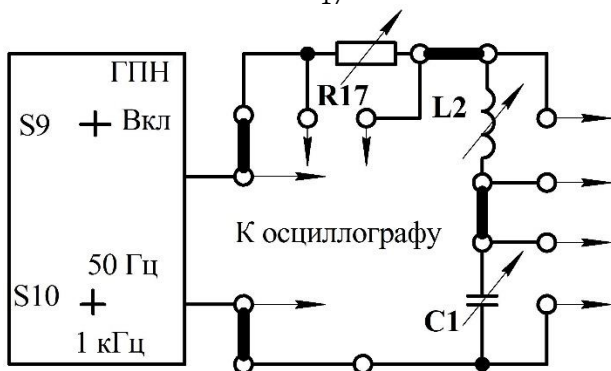


Рис. 15.6. Схема подключения RLC -цепи

Таблица 15.1

Результаты определения параметров ГПН

№ п/п	f , Гц	t_1 , с	t_2 , с	T , с	$U_{m,x}$, В
1	50				
2	1000				

Таблица 15.2

Результаты исследования переходных процессов

№ п/п	f , Гц	Осциллограмма на элементе	t_1 , с	t_2 , с	U_{mR} , В	U_{mL} , В	U_{mC} , В	I_m , А
1	50	<i>R</i>				-	-	
2	50	<i>C</i>			-	-		-
3	1000	<i>R</i>				-	-	
4	1000	<i>C</i>			-	-		-
5	50	<i>R</i>				-	-	
6	50	<i>L</i>			-		-	-
7	1000	<i>R</i>				-	-	
8	1000	<i>L</i>			-		-	-
9	50	<i>R</i>				-	-	
10	50	<i>L</i>			-		-	-
11	50	<i>C</i>			-	-		-
12	1000	<i>R</i>				-	-	
13	1000	<i>L</i>			-		-	-
14	1000	<i>C</i>			-	-		-

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте законы коммутации.
2. Изложите суть классического метода расчета переходных процессов в электрических цепях.
3. Что понимают под начальными условиями? Как они определяются?
4. Что называется постоянной времени переходного процесса τ и что она определяет?
5. Запишите условие, при котором переходный процесс в контуре *RLC* носит: аperiодический характер; колебательный характер.

Лабораторная работа № 16

Исследование характеристик переходного процесса зарядки конденсатора при ограничении тока

Цель работы: исследовать явление и характеристики переходного процесса зарядки конденсатора при ограничении зарядного тока сопротивлением.

Под переходным процессом понимают процесс перехода от одного устойчивого режима работы электрической цепи к другому, отличающемуся от первого рядом параметров (током, напряжением, сопротивлением и т.д.). Переходный процесс возникает как в результате аварийных ситуаций (короткое замыкание, обрыв провода, удар молнии и т.д.), так и в результате повседневных включений, отключений и переключений электрических цепей и электрооборудования. Переходные процессы протекают очень быстро, но они, как правило, сопровождаются явлениями, которые нарушают нормальную работу электроприемников, создают радиопомехи, искажения сигналов, перенапряжения и броски токов, способные вызвать аварию.

Изучение переходных процессов позволяет сформулировать 2 основных закона коммутации:

- ток и магнитный поток индуктивности в момент коммутации сохраняют те значения, которые они имели до коммутации и в дальнейшем начинают изменяться именно с этих значений;
- напряжение и заряд емкости сохраняют в момент коммутации те значения, которые они имели до коммутации и в дальнейшем начинают изменяться именно с этих значений.

Токи и напряжения, действующие во время переходного процесса, называются переходными – $i_{п}$, $u_{п}$. Они складываются из двух составляющих:

- свободная составляющая $i_{св}$ ($u_{св}$), она появляется за счет энергии, запасаемой в емкостях и индуктивностях цепи, с течением времени эта энергия растрачивается на активных сопротивлениях и уменьшается до нуля;

– установившаяся (принужденная) составляющая $i_{уст}$, $u_{уст}$, она наступает, когда переходный процесс затухает. Токи и напряжения этого режима определяются действующей в послекоммутационной цепи ЭДС (синусоидальной, постоянной и т.д.).

Таким образом, ток и напряжение переходного процесса можно определить как сумму:

$$\left. \begin{aligned} i_{\Pi} &= i_{св} + i_{уст}, \text{А} \\ u_{\Pi} &= u_{св} + u_{уст}, \text{А.} \end{aligned} \right\} \quad (16.1)$$

Характер переходного процесса в значительной степени зависит от начальных условий. Под начальными условиями понимают значения токов и напряжений в момент коммутации при $t = 0$.

Так как напряжения на индуктивностях и активных сопротивлениях, и токи через емкости и активные сопротивления изменяются быстро, их значения до и после коммутации могут быть различными. В этой связи различают докоммутационные и послекоммутационные начальные значения.

Докоммутационными называют значения токов и напряжений непосредственно перед коммутацией и обозначают $t = (0 -)$.

Послекоммутационными называют значения токов и напряжений непосредственно после коммутации и обозначают $t = (0 +)$.

Классический метод расчета переходных процессов предусматривает составление системы уравнений по законам Ома и Кирхгофа, для мгновенных значений токов и напряжений в послекоммутационной схеме. Эта система приводится к единому уравнению для интересующего тока или напряжения. В общем случае это будет неоднородное дифференциальное уравнение, порядок которого определяется числом независимых индуктивностей и емкостей, общее решение этого уравнения позволяет найти свободную составляющую переходного процесса, а частное решение определяется видом функции принужденной составляющей.

Рассмотрим переходный процесс заряда конденсатора.

Схема цепи для заряда показана на рисунке 16.1.

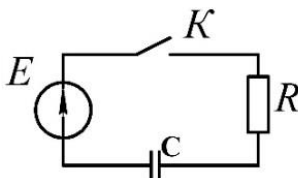


Рис. 16.1. Схема цепи зарядки конденсатора

Будем считать, что до включения выключателя K напряжение на конденсаторе было равно нулю. После замыкания K в цепи возникает ток и конденсатор заряжается до тех пор, пока напряжение на нем не достигнет напряжения источника E . Для этой цепи, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, можно записать

$$R_3 i + u_c = U_3, \text{ В}, \quad (16.2)$$

так как

$$i = C \frac{du_c}{dt}, \text{ А}, \quad (16.3)$$

то получим

$$R_3 C \frac{du_c}{dt} + u_c = U_3, \text{ В}. \quad (16.4)$$

Когда конденсатор полностью зарядится, установившееся напряжение будет равно $u_{уст} = U_3$.

Выражение для свободного напряжения $u_{св}$ определяется решением однородного дифференциального уравнения

$$R_3 C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0, \text{ В}. \quad (16.5)$$

Решение этого уравнения имеет вид $u_{св} = Ae^{pt}$,

$$p + \frac{1}{R_3 C} = 0, \quad (16.6)$$

корень этого уравнения равен $p = -\frac{1}{R_3 C}$.

С учётом найденных выражений $u_{св}$ и $u_{уст}$ получается

$$u_{п} = u_{св} + u_{уст} = U_3 + Ae^{pt}, \text{ В}. \quad (16.7)$$

Постоянную интегрирования A найдём из начальных условий и законов коммутации. В момент коммутации конденсатор не был заряжен, т.е. $u_{св} = 0$.

В соответствии со вторым законом коммутации напряжение на конденсаторе не может изменяться скачком и, следовательно, при $t = (0+)$

$$u_{п} = U_3 + A = 0, \text{ В}. \quad (16.8)$$

Откуда получаем, что $A = -U_3$, следовательно

$$u_n = U_3 - U_3 e^{pt} = U_3 - U_3 e^{-t/\tau}, \text{ В,} \quad (16.9)$$

где $\tau = R_3 C$ – постоянная времени заряда, с.

Постоянная времени характеризует длительность протекания переходного процесса, τ определяет время, в течение которого u_n уменьшается (увеличивается) в e раз по сравнению с первоначальным значением. Чем больше τ , тем дольше длится переходный процесс. Переходный процесс считается законченным через (3-4) τ .

Переходный ток определяется выражением:

$$i_n = \frac{U_3}{R_3} e^{-\frac{t}{\tau}}, \text{ А.} \quad (16.10)$$

График изменения напряжения и тока при зарядке конденсатора показан на рисунке 16.2.

В первый момент после коммутации $t = (0+)$ напряжение на конденсаторе равно $u_n = 0$ В, а ток зарядки изменяется скачком и равен

$$i = \frac{U_3}{R_3}, \text{ А.} \quad (16.11)$$

Затем напряжение экспоненциально возрастает до U_3 , а ток по мере заряда конденсатора уменьшается до 0. Касательная к кривой тока или напряжения численно равна τ . Чем больше $\tau = R_3 C$, тем дольше длится переходный процесс.

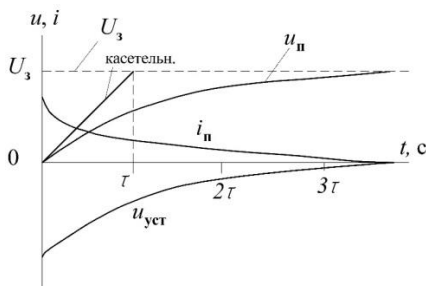


Рис. 16.2. Графики тока и напряжения при переходном процессе заряда конденсатора

Электронное реле времени – это устройство релейного типа с нормируемым временем срабатывания или отпускания реле после подачи или снятия входного управляющего сигнала.

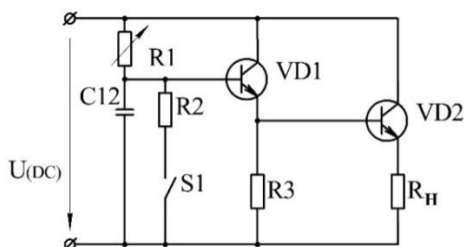


Рис. 16.3. Принципиальная схема транзисторного реле с времязадающей RC-цепью

В электронном реле времени на биполярных транзисторах (VT3, VT4) типа *N-P-N* (рис. 16.3) задаваемая выдержка времени создается за счет переходного процесса, возникающего при заряде предварительно разряженного конденсатора C12, через регулируемый резистор R1. Изменением сопротивления R1 можно регулировать длительность переходного процесса и, следовательно, время срабатывания реле.

Задание. Изучить схему подключения исследуемой цепи, входящей в состав электронного реле времени. Провести необходимые измерения параметров исследуемой схемы. На основании полученных параметров провести расчеты характеристик исследуемой цепи, а далее построить графики функций заряда конденсатора от сопротивления, ограничивающего ток заряда конденсатора.

Порядок выполнения работы.

Принцип работы электронного реле времени следующий: при срабатывании электромагнитного реле KV (электромагнитное реле РЭС-9 с переключающими контактами KV), после подачи управляющего сигнала (включение питания тумблером SA8), возникает переходный процесс, по окончании которого срабатывает транзисторное реле.

Электронный секундомер определяет время, а лампа HL4 сигнализирует о срабатывании реле. Конденсатор C12 емкостью 200 мкФ и резистор R1 соединены с базой транзистора VT3,

опыты проводятся при различных значениях сопротивления резистора R1, а также при изменении сопротивления в цепи транзистора VT4 с помощью делителя сопротивлений SA10.

1) Собрать схему подключения, представленную на рисунке 16.4, поставив рукоятки переключения резистора R1 в нулевое положение.

2) Включить стенд, величину сопротивления R1 установить равной нулю (0 кОм), а величину сопротивления $R_{Э-Б}$ (с помощью делителя SA10) равную 1 кОм.

3) Включить секундомер SA30, включить тумблер SA8 и снять показания секундомера.

4) Далее в обратном порядке отключить схему (SA8) и отключить секундомер SA30.

5) Установить сопротивление R1 равное 2 кОм, а положение делителя SA10 не менять. Повторить действия согласно пп. 3 и 4.

6) Повторяя аналогичные действия снять показания секундомера (время срабатывания электронного реле времени) и заполнить таблицу 16.1.

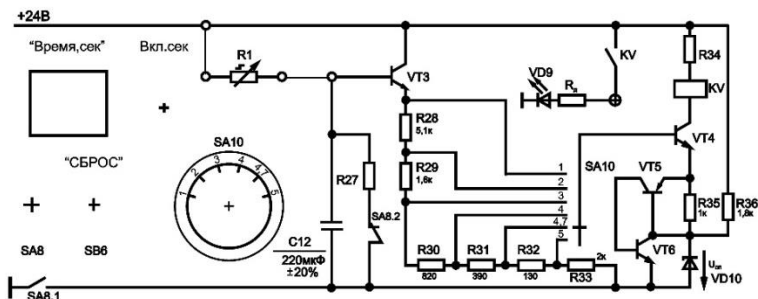


Рис. 16.4. Схема подключения исследуемой цепи с реле времени

Таблица 16.1
Результаты исследования времени заряда конденсатора t
при ограничении тока заряда

Номер опыта	$R_{Э-Б}$, Ом (SA10)	Ограничивающее сопротивление R_1 , кОм					
		0	2	4	6	8	10
1	1						
2	2						
3	3						
4	4						
5	4,7						
6	5						

7) Построить графики функций времени срабатывания реле $t = f(R_1)$ (в одних координатных осях для любых четырех из шести номеров опытов, аналогично – графики $t = f(R_{Э.Б.})$ в одних координатных осях для любых четырех столбцов R_1 .

Вопросы для самоконтроля

1. В чем назначение RC -цепи в составе реле времени?
2. Поясните принцип работы электронного реле времени на биполярном транзисторе.
3. Возможно ли вместо конденсатора использовать катушку индуктивности? Пояснить ответ.
4. Каково назначение транзисторов в исследуемой схеме транзисторного реле?
5. Как изменится время срабатывания исследуемого реле при увеличении емкости конденсатора $C12$?

Лабораторная работа №17

Исследование феррорезонанса напряжений

Цель работы: исследовать явление феррорезонанса напряжений в последовательной нелинейной электрической цепи, условия его возникновения и характеристики.

Под феррорезонансом в цепи, содержащей катушку с ферромагнитным магнитопроводом (нелинейную катушку) и конденсатор, понимают явление совпадения по фазе первых гармоник напряжения и тока на входе цепи или ее участке.

В отличие от линейного резонанса, феррорезонанс может быть достигнут не только изменением частоты, емкости или индуктивности, но и изменением величины приложенного напряжения, изменяющего величину индуктивного сопротивления.

Для анализа феррорезонансных цепей используется метод эквивалентных синусоид. На рисунке 17.1 приведены вольт-амперные характеристики для действующих значений напряжения и тока. Результирующая ВАХ для схемы с последовательным соединением элементов строится на основании зависимости:

$$U = \sqrt{U_R^2 - (U_L - U_C)^2}, \text{ В.} \quad (17.1)$$

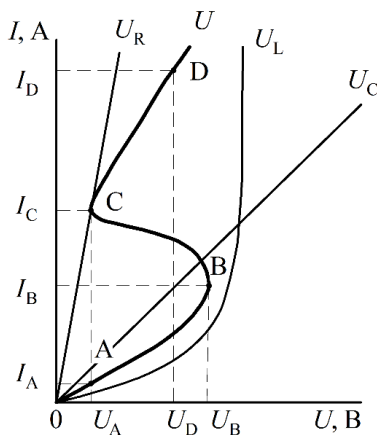


Рис. 17.1. Вольт-амперные характеристики элементов цепи

Из анализа характеристики $I = f(U)$ следует, что при увеличении входного напряжения в момент, соответствующий U_B , происходит скачкообразное увеличение тока от значения I_B до I_D . Одновременно скачкообразно изменяется и фаза тока; при $U = U_B$, ток I отстает по фазе от входного напряжения, так как здесь $U_L > U_C$, а при $U > U_B$ ток опережает приложенное напряжение, так как $U_C > U_L$. Феррорезонансу напряжения соответствует точка «С».

В этой точке взаимно компенсируется напряжение на емкости и реактивная составляющая первой гармоники напряжения на катушке.

Феррорезонансные схемы находят применение для стабилизации переменного напряжения.

Задание. Исследовать вольт-амперные характеристики последовательной феррорезонансной цепи.

Порядок выполнения работы.

1) По схеме, приведенной на рисунке 17.2, собрать электрическую цепь. Определить ВАХ нелинейной индуктивности $L1$ по действующим значениям напряжения и тока. При этом ток в катушке дросселя не должен превышать значения $I = 0,5$ А. Результаты измерений занести в таблицу 17.1

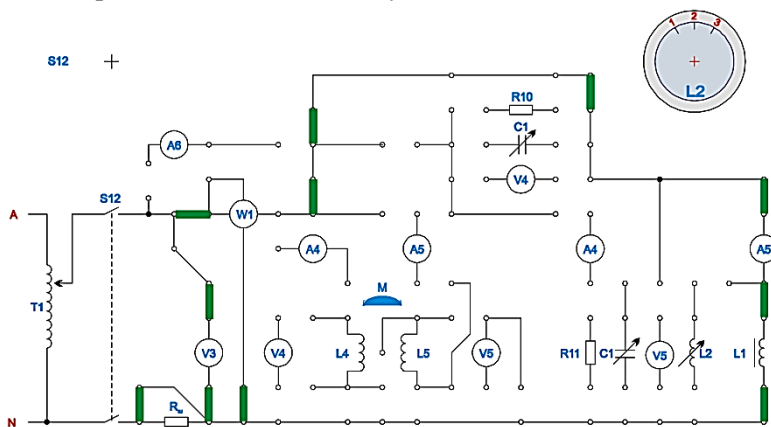


Рис. 17.2. Схема для исследования нелинейной индуктивной катушки

2) По опытным данным построить ВАХ $U_L = f(I)$ нелинейного дросселя.

В этой же системе координат построить ВАХ емкости, а также результирующую ВАХ цепи.

3) Определить экспериментальную зависимость $I = f(U)$ при последовательном соединении нелинейной индуктивности L1 и конденсатора. Для этого необходимо собрать цепь по схеме (рис. 17.3). Увеличивая напряжение U_1 , на входе от нулевого значения отметить значение напряжения U_B , при котором наступает скачкообразное увеличение тока от I_B до I_D в соответствии с рисунком 17.1. Затем, плавно уменьшая напряжение U_1 , определить U_C , при котором наступает скачкообразное уменьшение тока. Результаты измерений и расчетов записать в таблицу 17.2.

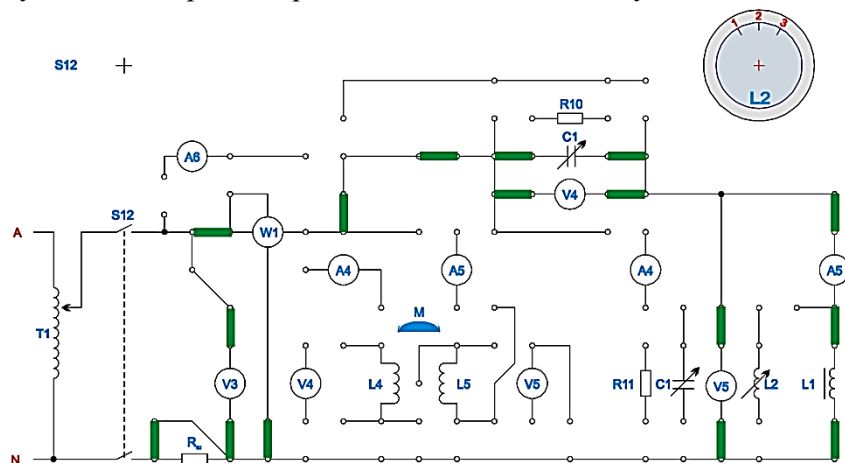


Рис. 17.3. Последовательная схема для исследования феррорезонанса напряжений

Таблица 17.1
Результаты исследования параметров нелинейной катушки индуктивности

№ п/п	Измерено		
	U , В	I , А	P , Вт
1			
2			
3			
4			
5			

Таблица 17.2

*Результаты исследования параметров
последовательной феррорезонансной цепи*

$U, В$									
$U_C, В$									
$U_L, В$									
$I, А$									
$P, Вт$									

4) На основании опытных данных построить результирующую ВАХ цепи.

5) Зарисовать осциллограмму напряжения для режимов:

- ✓ до феррорезонанса;
- ✓ в момент феррорезонанса;
- ✓ после феррорезонанса.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение феррорезонанса напряжений и феррорезонанса токов.

2. Чем отличается феррорезонанс напряжений от резонанса напряжений в линейной цепи?

3. Почему в феррорезонансной цепи возникают скачки тока (напряжения)?

4. Почему сопротивление феррорезонансной последовательной цепи до скачка тока (к большему значению) имеет индуктивный характер, а после скачка – емкостный?

5. Какие участки реальной ВАХ феррорезонансной цепи являются устойчивыми, а какие – неустойчивыми?

6. Как влияет частота входного напряжения на характеристики феррорезонансной цепи?

7. Приведите примеры практического применения феррорезонансных явлений.

Лабораторная работа №18

Исследование феррорезонанса токов

Цель работы: исследовать явление феррорезонанса токов в параллельной нелинейной электрической цепи, условия его возникновения и характеристики.

Под феррорезонансом в цепи, содержащей катушку с ферромагнитным магнитопроводом и конденсатор, понимают явление совпадения по фазе первых гармоник напряжения и тока на входе цепи или ее участке.

В отличие от линейного резонанса, феррорезонанс может быть достигнут не только изменением частоты, емкости или индуктивности, но и изменением величины приложенного напряжения, изменяющего величину индуктивного сопротивления.

В цепи с параллельным соединением катушки с магнитопроводом и конденсатора возникает феррорезонанс токов. Для эквивалентных синусоид результирующая ВАХ строится на основании зависимости:

$$I = I_L - I_C, \text{ А.} \quad (18.1)$$

В случае реальной катушки результирующая ВАХ приведена на рисунке 18.1. До точки C ток конденсатора I_C по модулю больше тока катушки I_L и сопротивление цепи имеет емкостный характер. Точка C соответствует режиму феррорезонанса токов. Ток в неразветвленной цепи содержит активную составляющую первой гармоники и высшие гармоники. После точки C сопротивление цепи имеет индуктивный характер.

Резонансное индуктивное сопротивление цепи определяется зависимостью

$$X_L = \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R_K^2}, \text{ Ом.} \quad (18.2)$$

Соответственно, емкостное сопротивление:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}, \text{ Ом.} \quad (18.3)$$

При этом должно соблюдаться условие:

$$X_C = X_L \quad (18.4)$$

Феррорезонансные схемы находят применение для стабилизации переменного напряжения.

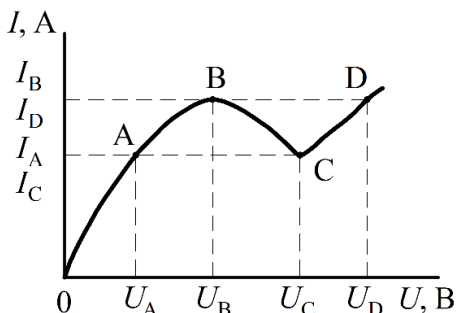


Рис. 18.1. Результирующая вольт-амперная характеристика

Задание. Исследовать вольт-амперные характеристики параллельной феррорезонансной цепи.

Порядок выполнения работы.

1) По схеме, изображенной на рисунке 18.2, собрать электрическую цепь. Определить ВАХ нелинейной индуктивности $L1$ по действующим значениям напряжения и тока. При этом ток в катушке дросселя не должен превышать значения $I = 0,5$ А. Результаты измерений занести в таблицу 18.1

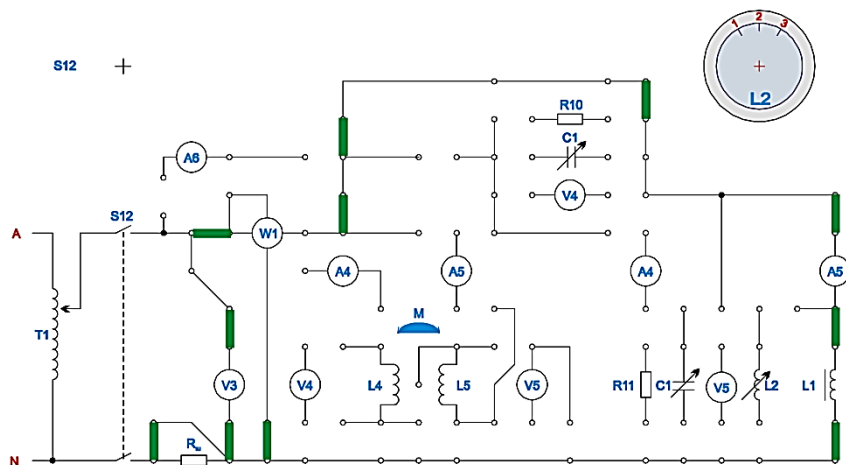


Рис. 18.2. Схема для исследования характеристики катушки индуктивности

Таблица 18.1

Результаты исследования параметров нелинейной катушки индуктивности

№ п/п	Измерения		
	U , В	I , А	P , Вт
1...5			

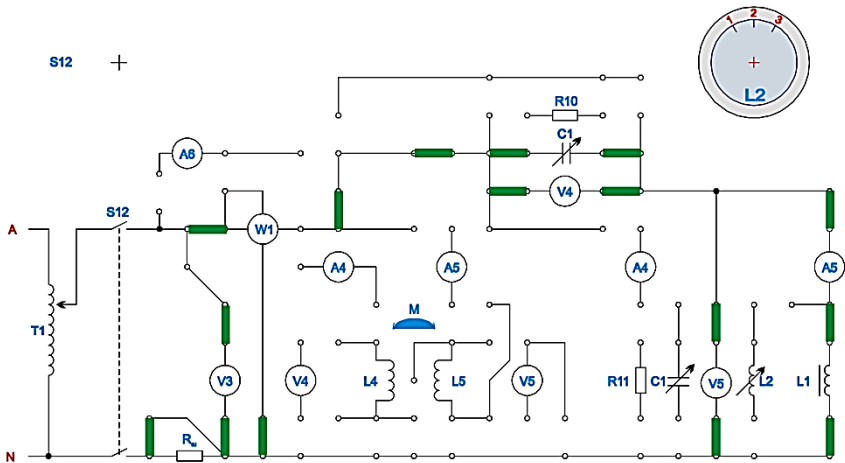


Рис. 18.3. Схема соединения лабораторной установки

2) По опытным данным построить ВАХ $I = f(U)$ цепи. Выбрать точку за коленом кривой I и подсчитать резонансную емкость.

Вопросы для самоконтроля

1. Дать определение понятию «феррорезонанс токов».
2. Перечислить условия возникновения феррорезонанса токов.
3. Ток феррорезонансной цепи является синусоидальным или нет?
4. Является ли феррорезонансный двухполюсник фазосдвигающим элементом?

Лабораторная работа №19

Исследование схем подключения и характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя в однофазном режиме

Цель работы: изучить схемы подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к однофазной сети синусоидального тока. Исследовать характеристики электродвигателя при питании от однофазной сети.

Во многих случаях электрический привод рабочих машин технически или экономически рациональнее осуществлять на однофазном переменном токе, чем на трехфазном. Привод на однофазном переменном токе находит применение в сельском хозяйстве (при незначительной потребляемой мощности и удаленности потребителя), в быту и т.д. Промышленностью выпускаются однофазные электродвигатели нескольких серий, но малых мощностей (до 800 Вт). Поэтому возникает необходимость использования трехфазных асинхронных двигателей как однофазных.

Трехфазный асинхронный электродвигатель, при питании его от однофазной сети, как и однофазный, имеет только пульсирующее магнитное поле, состоящее из двух вращающихся магнитных полей равных по величине и различных по направлению вращения. При этом на ротор двигателя действуют два равных по величине и противоположных по направлению момента – ротор стоит неподвижно. Поэтому двигатель не имеет начального (пускового) вращающего момента, для получения которого необходимо создать такую электрическую схему обмотки статора, которая обеспечила бы возникновение вращающегося магнитного поля и, следовательно, начального вращающего момента. Это достигается путем разделения трехфазной обмотки статора на две – рабочую и пусковую, в цепь пусковой обмотки включается активный (резистор) или фазосдвигающий элемент – индуктивное (дроссель) или емкостное (конденсатор) сопротивление.

Поскольку обмотка, в цепь которой включается пусковое сопротивление, пространственно сдвинута относительно двух других

обмоток, и ток в ней благодаря наличию указанного сопротивления сдвинут по фазе относительно тока в двух остальных, возникает вращающееся магнитное поле и начальный вращающий момент.

После разгона двигателя, когда частота вращения ротора близка к номинальной, пусковое сопротивление отключают. Двигатель продолжает вращаться, при этом мощность его составляет 50-60% от мощности, отдаваемой двигателем при работе в трехфазном режиме. Дело в том, что момент, который действует в направлении существующего вращения двигателя стал большим, чем он был при неподвижном роторе, а момент, действующий в противоположном направлении, уменьшился по сравнению с неподвижным состоянием. Разность этих двух моментов становится больше нуля, она и заставляет ротор вращаться.

Принципиальные схемы соединения обмоток статора трехфазного асинхронного электродвигателя при питании его от однофазной сети такие же, как при питании от трехфазной – «звезда» и «треугольник».

Выбор той или иной схемы определяется номинальными напряжениями сети и двигателя, а также требуемым пусковым моментом и необходимостью частичного или полного использования номинальной мощности двигателя. При выборе схемы включения электродвигателя необходимо руководствоваться следующими правилами:

а) если напряжение однофазной сети совпадает с меньшим напряжением, указанным в паспорте двигателя, то в качестве рабочей используется одна из фазных обмоток статора, а две другие выполняют роль пусковой обмотки (схема «треугольник»);

б) если же напряжение однофазной сети совпадает с большим напряжением, указанным в паспорте двигателя, в качестве рабочей используются две фазные обмотки, а третья выполняет роль пусковой (включение обмоток по схеме «звезда») (рис. 19.1, а, б).

В схеме (рис. 19.1, а) обмотки двух фаз статора образуют рабочую цепь двигателя, обмотки третьей фазы с включенным в ее цепь активным сопротивлением $R_{\text{пуск}}$ создают пусковую цепь. Пусковое активное сопротивление по своему значению должно быть близким к сопротивлению фазы обмотки статора переменного тока и рассчитанным на ток в 5-7 раз больше номинального

(на пусковой ток). Приближенный расчет значения $R_{\text{пуск}}$ можно произвести по следующей эмпирической формуле

$$R_{\text{пуск}} = \frac{\alpha \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}}{K_i P_{\text{н}}}, \text{ Ом}, \quad (19.1)$$

где α – коэффициент, зависящий от конструктивных характеристик двигателя ($\alpha = 0,3-1,3$);

$\eta_{\text{н}}$ – номинальный коэффициент полезного действия, %;

$\cos \varphi_{\text{н}}$ – номинальный коэффициент мощности;

K_i – кратность пускового тока ($K_i = 5-7$);

$P_{\text{н}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт.

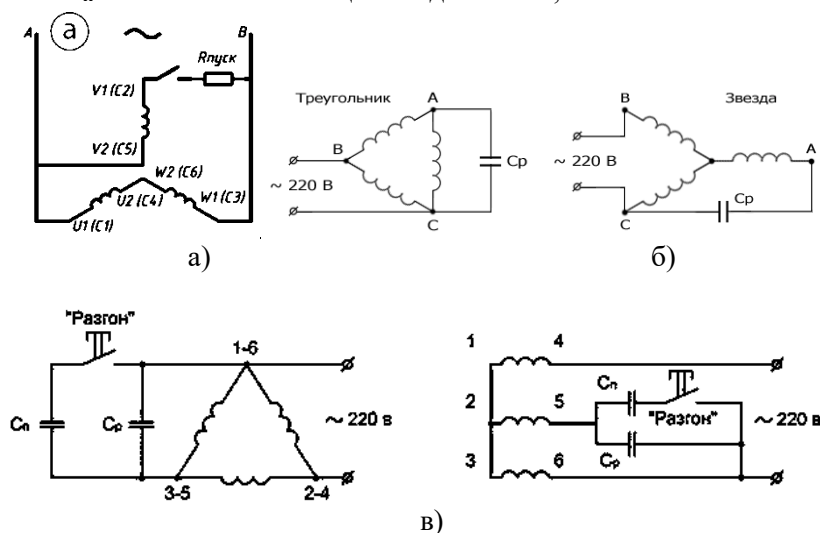


Рис. 19.1. Схемы подключения обмоток электродвигателя при работе в однофазном режиме:

- а – с пусковым активным сопротивлением; б – с рабочей емкостью;
- в – с рабочей и пусковой емкостями

Эти данные берут из каталога и заводского паспорта двигателя. Рассматриваемая схема наряду со своими достоинствами – простотой, незначительными экономическими затратами – имеет и существенный недостаток – малый пусковой момент (всего 0,1-0,12 от номинального вращающего момента двигателя), что ограничивает область ее применения только приводами с легкими условиями пуска.

В схемах, изображенных на рисунках 19.1б и 19.1в, в качестве пускового сопротивления используется конденсатор. Обычно пусковая цепь с включенным конденсатором во время работы двигателя остается под напряжением. Емкость этого конденсатора называется рабочей. Она определяется по формуле

$$C_p = \frac{1950 I_n}{U_n \cos \varphi_n}, \text{ мкФ.} \quad (19.2)$$

Номинальные значения тока I_n , напряжения U_n и коэффициента мощности $\cos \varphi_n$ берут из заводского паспорта двигателя.

Для определения C_p можно использовать и другую формулу

$$C_p = \frac{P_n 10^9}{6,28 f U^2}, \text{ мкФ,} \quad (19.3)$$

где f – частота тока сети, Гц;

U – напряжение сети, В;

P_n – номинальная мощность двигателя, кВт.

При стандартных российских параметрах сети $U = 220$ В и $f = 50$ Гц, формула упростится и принимает вид

$$C_p \approx 66 P_n, \text{ мкФ.} \quad (19.4)$$

Для увеличения пускового момента при тяжелых условиях пуска (пуск под нагрузкой и т.п.) в пусковую цепь двигателя включается дополнительно пусковая емкость $C_{\text{пуск}}$, которая после пуска должна быть обязательно отключена. С некоторым допущением значение пусковой емкости равно

$$C_{\text{пуск}} = (2 \dots 3) C_p, \text{ мкФ.} \quad (19.5)$$

Пусковой момент двигателя при пуске по схемам, приведенным на рисунках 19.1б и 19.1в, может достичь значения, равного 0,6-0,8 от номинального вращающего момента двигателя.

В качестве рабочей емкости используются металло-бумажные конденсаторы типа КБГ, БГТ, МБГЧ на рабочее напряжение не менее 1,3 номинального напряжения сети. В качестве пусковой емкости могут быть использованы более дешевые электролитические конденсаторы типа ЭП, специально предназначенные для этой цели (рабочее напряжение не менее 450 В). Конденсаторы выпускаются с номинальной емкостью: 1, 2, 4, 6, 8, 10 мкФ. Для получения большей емкости их соединяют параллельно.

Для управления электродвигателем, включенным по схеме с рабочей и пусковой емкостями, целесообразно использовать выключатель нажимной вибростойкий специальный типа ПНВС, имеющий специальные пусковые контакты, размыкающие цепь пусковой емкости с отпусканием кнопки «пуск». Возможно также применение магнитных пускателей и кнопочных постов, включаемых по специальным схемам.

Будучи включенным в однофазную сеть по схеме, приведенной на рисунке 19.1а, трехфазный асинхронный электродвигатель в рабочем режиме может развивать 50-60% своей номинальной мощности по сравнению с трехфазным режимом, а по схемам, приведенным на рисунках 19.1б, и 19.1в, – до 75%.

Электродвигатели мощностью свыше 2,8 кВт в однофазном режиме использовать не рекомендуется.

Одной из важнейших характеристик любого электродвигателя является его механическая характеристика. Уравнение механической характеристики представляет собой зависимость момента на валу двигателя от величины скольжения или оборотов $M = f(s)$.

Крутящий момент, развиваемый двигателем, можно рассчитать по формуле Клосса

$$M = \frac{2M_K}{\frac{S}{S_K} + \frac{S_K}{S}}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (19.6)$$

где $M_K = \lambda M_H$ – максимальный (критический) момент, развиваемый двигателем, Н·м;

$\lambda = 1,5-2,5$ – коэффициент перегрузки двигателя;

Критический момент двигателя зависит от его мощности и оборотов ротора при номинальном режиме работы

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H}, \text{ Н}\cdot\text{м}. \quad (19.7)$$

Вращающий момент двигателя можно определить и через параметры схемы замещения:

$$M = \frac{3U_{1\phi}^2 \cdot r_2''}{\omega_0 S \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{S} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]}, \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (19.8)$$

где $U_{1\phi}$ – фазное напряжение, В;

ω_0 – угловая частота вращения магнитного поля статора, с^{-1} ;

r_1 – сопротивление фазы статора, Ом;

r'_2 – приведенное сопротивление фазы ротора, Ом;

X_1 – индуктивное сопротивление фазы статора, Ом;

X'_2 – приведенное индуктивное сопротивление фазы ротора, Ом.

Угловая частота вращения магнитного поля статора зависит от частоты переменного тока сети и числа пар полюсов обмоток статора

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p}, \text{ с}^{-1}, \quad (19.9)$$

где f_1 – частота тока, Гц;

p – число пар полюсов.

Приведенные значения тока ротора $I'_2 = I_1$ определяют из выражения, аналогичного формуле Клосса:

$$I_1 = I'_2 \frac{U_{1\phi}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_1}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_2)^2}}, \text{ А.} \quad (19.10)$$

Из последних двух выражений следует, что при снижении напряжения $U_{1\phi}$ момент двигателя изменяется пропорционально $U_{1\phi}^2$, а ток $I_{1\phi}$. С увеличением нагрузки возрастает скольжение двигателя, которое может достигнуть критического значения, определяемого зависимостью

$$S_K = S_H \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (19.11)$$

При работе двигателя в номинальном режиме, частота вращения ротора несколько ниже частоты вращения магнитного поля статора. Отставание характеризуется скольжением

$$S_H = \frac{n_0 - n_2}{n_0}. \quad (19.12)$$

При работе двигателя в номинальном режиме, скольжение также имеет номинальное значение (3-5%).

Задание. Рассчитать по паспортным данным номинальный ток двигателя и номинальный момент. Пересчитать полученные

значения для фазного напряжения 127 В. Изучить и собрать схему испытания асинхронного двигателя. Провести исследования пуска электродвигателя с подобранными пусковыми конденсаторами. Снять характеристики электродвигателя под нагрузкой (несколько ступеней).

Порядок выполнения работы.

Для выполнения лабораторной работы собирается схема, представленная на рисунке 19.2.

Паспортные данные асинхронного двигателя:

Тип: АИР56А2УЗ;

$P_H = 0,18$ кВт;

$\eta_H = 65$ %;

$\cos \varphi = 0,78$;

$n_H = 2730$ об/мин;

$I_H = 0,5$ А;

$U_p = 220$ В;

$$\lambda \frac{M_K}{M_H} = 2,2; \quad \frac{M_n}{M_H} = 2,2; \quad \frac{I_n}{I_H} = 4.$$

На схеме нагрузкой АД является генератор постоянного тока М2, якорь которого коммутируется транзисторным ключом VT7, подключенным к широтно-импульсному преобразователю ШИП. Тумблером SA16 включается цепь возбуждения генератора М2, тумблером SA19 включают ШИП, SA18 – измеритель скорости, SA14 подает напряжение на схему управления АД, кнопка SB3 служит для пуска двигателя, кнопка SB4 – для останова, переключателем SA17 осуществляется переключение схемы соединения обмоток.

1) Установить SA17 в положение звезда «Y», резистор R43 в положение «min», включить SA14. Кнопкой SB3 запустить двигатель.

2) Подключить обмотку возбуждения нагрузочного генератора тумблером SA16, ШИП – тумблером SA19 и измеритель скольжения – тумблером SA18. Соппротивлением R43 установить ток в фазе статора АД равный $I'_{1Фн}$.

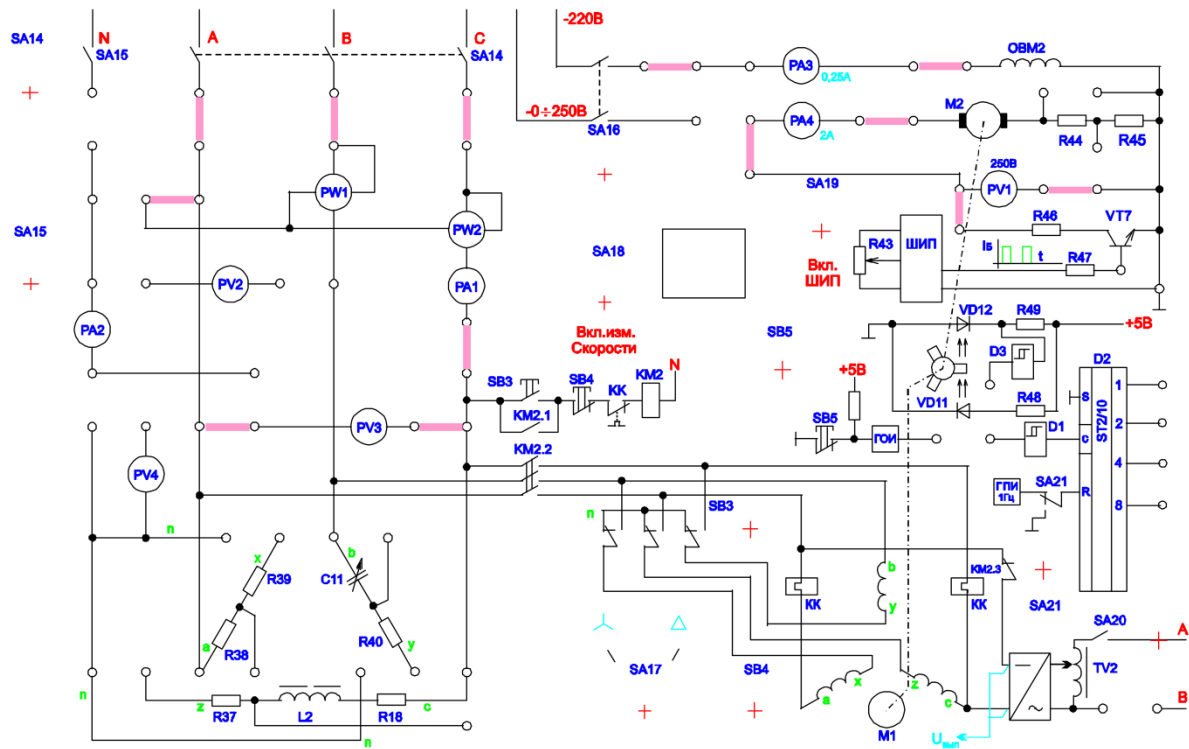


Рис. 19.2. Схема подключения исследуемого электродвигателя

3) Считая, что к валу АД приложена номинальная нагрузка для номинального режима $M'_H = M_0 + M_G$ и $M_G = C \cdot I_{ЯГ}$, определить M_0 , где M_0 – статический момент нагрузки холостого хода; M_G – момент генератора постоянного тока; $I_{ЯГ}$ – ток якоря генератора постоянного тока (прибор РА4);

4) Считая M_0 независимым от частоты вращения, изменяя $I_{ЯГ}$ с помощью R43, снять показания измерителя частоты вращения, ваттметра PW1, PW2, РА2 – ток фазы статора АД РА4 – ток якоря генератора и PV3 – линейные напряжения, приложенные к АД.

В работе исследуют и строят механическую характеристику и две рабочие характеристики: $\eta = f(P_2)$ и $\cos \varphi = f(P_2)$ при включении обмоток статора «звездой» и «треугольником». Фазное напряжение при этом оказывается в $\sqrt{3}$ раз меньше номинального, соответственно или равное ему.

Частоту вращения вала двигателя измеряют цифровым измерителем в относительных единицах. Для определения истинного значения нужно воспользоваться формулой

$$n = \frac{N \cdot 3000}{100} = 30N, \text{ мин}^{-1}, \quad (19.13)$$

где N – текущее показание измерителя.

Расчет КПД и $\cos \varphi_1$ двигателя проводят по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (19.14)$$

где P_2 – мощность на валу двигателя, кВт.

Мощность на валу двигателя определяется через крутящий момент и обороты вала

$$P_2 = \frac{\pi n_2}{30} M, \text{ Вт}, \quad (19.15)$$

где M – текущее значение момента на валу двигателя, Н·м;

n_2 – текущее значение частоты вращения двигателя, мин⁻¹;

P_1 – мощность, потребляемая двигателем, Вт.

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}, \quad (19.16)$$

где S_1 – полная мощность трехфазной системы, ВА.

Полная мощность определяется по зависимости

$$S_1 = 3U_\phi I_\phi, \text{ ВА}. \quad (19.17)$$

Следует помнить, что при подключении трехфазного электродвигателя в однофазную сеть, его токи, напряжения и момент снижаются

$$M'_H = \frac{M_H}{3}, \text{ Н} \cdot \text{ м}; \quad I''_{1\text{ФН}} = \frac{I_{1\text{ФН}}}{\sqrt{3}}, \text{ А}. \quad (19.18)$$

где M_H – момент при снижении напряжения в $\sqrt{3}$ раз.

$I_{1\text{ФН}}$ – ток при снижении напряжения в $\sqrt{3}$ раз.

Емкость, которую необходимо подключить к двигателю, рассчитывается по формуле

$$C = \frac{M_{\text{НГ}}}{I_{\text{яНГ}}}, \quad (19.19)$$

где $M_{\text{НГ}}$ – номинальный тормозной момент, Н·м;

$I_{\text{яНГ}}$ – номинальный ток якоря генератора, А.

По результатам измерений построить:

- ✓ механическую характеристику $M = f(S_2)$;
- ✓ две рабочих характеристики $\eta = f(P_2)$ и $\cos \varphi_1 = f(P_2)$.

Рассчитать механическую характеристику по формуле Клосса для пониженного напряжения и сравнить с результатами эксперимента.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение понятию скольжение.
2. Как рассчитать емкость рабочего и пускового конденсаторов?
3. Перечислите способы подключения трехфазного асинхронного электродвигателя к однофазной сети.
4. Какие элементы могут использоваться в качестве пусковых?
5. Как реверсировать трехфазный двигатель в однофазной сети?

Лабораторная работа №20

Исследование трехфазного трансформатора

Цель работы: изучить устройство, характеристики, принцип работы и регулировки трехфазного трансформатора.

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток, предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции первичной системы токов и напряжений во вторичную, отличающуюся от первичной величиной токов и напряжений. При этом полная мощность первичной системы равна полной мощности вторичной системы токов и напряжений.

Полная мощность трансформатора

$$S = U_1 I_1 \approx U_2 I_2. \quad (20.1)$$

На рисунке 20.1 показана электромагнитная схема однофазного трансформатора. Трансформатор состоит из магнитопровода (МП), на котором размещены две обмотки: первичная с числом витков w_1 и вторичная с числом витков w_2 . Первичная обмотка подключается к источнику переменного тока с напряжением u_1 , под воздействием переменного напряжения u_1 , в ней возникает переменный ток i_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ , замыкающийся по магнитопроводу. Поток индуцирует ЭДС e_1 в первичной обмотке, а во вторичной обмотке ЭДС e_2 :

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \text{ В}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}, \text{ В}. \quad (20.2)$$

Если ко вторичной обмотке подключить нагрузку (сопротивление Z_H), то в ней возникнет ток i_2 и будет расходоваться энергия мощностью $S_2 = u_2 i_2$. Эта мощность будет потребляться из первичной сети и передаваться (индуцироваться) во вторичную цепь с помощью магнитного поля Φ . Ток первичной обмотки возрастет до значения i_1 , при котором будет соблюдаться баланс мощностей.

Важнейшим параметром трансформатора является коэффициент трансформации напряжений – K . Под ним понимается отношение ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках:

$$K = \frac{e_1}{e_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (20.3)$$

Учитывая, что $E_1 \approx U_1$, а $E_2 \approx U_2$ коэффициент трансформации можно считать равным

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (20.4)$$

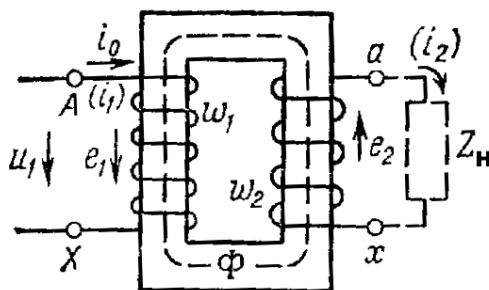


Рис. 20.1. Электромагнитная схема однофазного трансформатора

Трансформаторы классифицируют по ряду признаков:

- ✓ по числу фаз различают:
 - однофазные;
 - трехфазные;
- ✓ по мощности:
 - однофазные трансформаторы мощностью до 5 кВт и трехфазные мощностью до 6,3 кВт считаются маломощными;
 - трансформаторы большей мощности считаются силовыми;
- ✓ по назначению:
 - распределительные для передачи и распределения электроэнергии по электрическим сетям;
 - потребительские для питания потребителей низкого напряжения;

- специального назначения: печные, сварочные, выпрямительные и т. д.;
- автотрансформаторы для регулирования напряжения в сетях и у потребителя;
- измерительные трансформаторы, включаемые в схемы измерительных устройств и релейной защиты;
- испытательные и т. д.

Трансформатор состоит из 5 основных систем: магнитной, электрической, механической, охлаждения и регулирования напряжения.

Магнитная система предназначена для проведения основного магнитного потока трансформатора, она представляет собой магнитопровод.

Электрическая система предназначена для подведения первичного тока и напряжения к первичным обмоткам и снятия вторичного напряжения и тока со вторичных обмоток трансформатора. Она состоит из вводов и обмоток высокого и низкого напряжения продольной и главной изоляции.

Продольной называется изоляция обмоточного провода, а главной – изоляция между слоями обмотки, между обмотками и между магнитопроводами и обмотками.

Механическая система предназначена для крепления всех систем и узлов трансформатора она состоит из стержневых балок, швеллеров, крепежных шпилек, болтов и прочих механических элементов.

Система охлаждения предназначена для отведения тепла от магнитопровода и обмоток трансформатора, которое образуется при работе трансформатора. Она состоит из бака, заполненного охлаждающей жидкостью и приспособлений для охлаждения этой жидкости.

Система регулирования напряжения предназначена для поддержания на заданном уровне (стабилизации) напряжения у потребителей при измерении нагрузки питающих линий.

На рисунке 20.2 показано общее устройство трехфазного масляного трансформатора.

На стержнях магнитопровода 8 расположены обмотки низшего 9 и высшего 10 напряжения. Выводные изоляторы 2 и 3 служат для проведения выводов обмоток сквозь крышку бака. Магнитная

система с обмотками помещена в бак 12. Бак трансформатора и расширитель 7 заливают очищенным и высушенным трансформаторным маслом или специальной негорючей жидкостью для улучшения условий охлаждения.

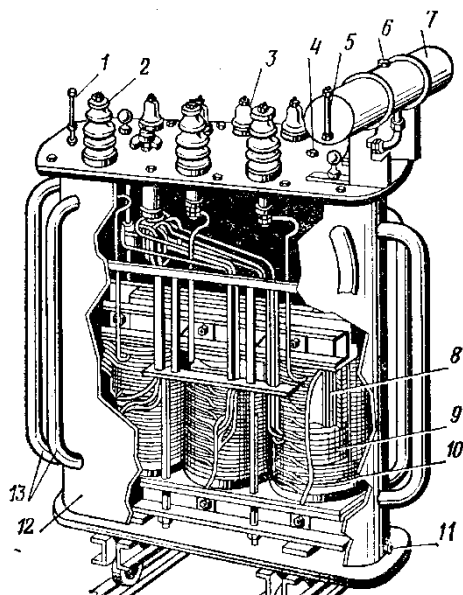


Рис. 20.2. Устройство трехфазного трансформатора средней мощности:

- 1 – термометр; 2 – выводы обмотки ВН; 3 – выводы обмотки НН;
- 4 и 6 – пробки для заливки масла; 5 – указатель уровня масла;
- 7 – расширитель; 8 – магнитопровод; 9 – обмотка НН; 10 – обмотка ВН;
- 11 – пробка для спуска масла; 12 – бак; 13 – трубы для охлаждения масла;
- 14 – переключатель напряжения трансформатора

Магнитная система трансформатора. Основным элементом магнитной системы является магнитопровод (рис. 20.3).

С целью уменьшения потерь на вихревые токи магнитопровод набирается из тонких листов электротехнической стали изолированных друг от друга.

Части магнитопровода, на которых размещены обмотки, называются стержнями, а части, не несущие обмоток, – ярами. По способу сочленения стержней с ярами различают трансформаторы со столбовыми и шихтованными магнитопроводами (рис. 20.3, а, б). Столбовые сердечники имеют большое магнитное сопротивление и поэтому применяются редко. Наибольшее

распространение получили шихтованные сердечники. В них стержни и ярма собираются в единую конструкцию из прямоугольных листов электрической стали. При этом нечетные и четные слои имеют различный порядок чередования (рис. 20.3, б).

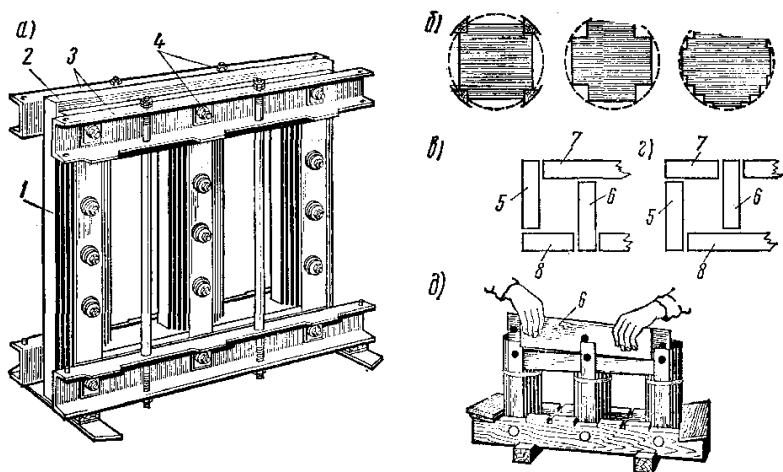


Рис. 20.3. Схема магнитопровода силового трехфазного трансформатора:

- а – общий вид; б – формы поперечного сечения стержней;
 в и г – расположение листов в двух смежных слоях сердечника; д – сборка сердечника; 1 – стержень; 2 – ярмо; 3 – опорная балка; 4 – стяжные шпильки;
 5 и 6 – листы крайнего и среднего стержней;
 7 и 8 – листы верхнего и нижнего ярем

Затем эти слои накладывают, стягиваются шпильками и балками друг на друга и образуют механически устойчивую конструкцию, обладающую малым магнитным сопротивлением, так как место стыка листов в одном слое перекрывается целыми листами в соседних слоях. Такой способ называется сборка или шихтование.

В качестве листов магнитопровода используется электротехническая горяченакальная сталь марок 1511, 1512, 1513 и холоднокальная текстурованная сталь марок 3411, 3412, 3413. Листы толщиной 0,35-0,5 мм изолируются один от другого тонкой оксидной пленкой или лаком.

Электрическая система трансформатора. Основным элементом электрической системы трансформатора является

обмотка. Конструкция обмоток должна удовлетворять требованиям высокой электрической и механической прочности, а также нагревостойкости. Технология изготовления обмоток должна быть простой и недорогой, допускать возможность ремонта. Электрические потери в обмотках трансформатора должны находиться в нормируемых пределах. Конструкции обмоток в зависимости от номинального тока и напряжения трансформатора очень разнообразны. Обмотки изготавливаются из медного (реже алюминиевого) провода. Для изготовления применяются круглые провода сечением 0,2-10 мм² и прямоугольные провода сечением 6-60 мм².

В качестве изоляции проводов используются лаковые и эмалевые покрытия, оплетка хлопчатобумажной тканью и кабельной бумагой в один или два слоя. В последнее время широкое распространение получила стекловолоконная изоляция, которая характеризуется высокой теплостойкостью. По способу размещения на стержнях и по взаимному расположению обмоток высокого (ВН) и низкого (НН) напряжения обмотки делятся на концентрические и чередующиеся. Концентрические обмотки размещаются на стержне соосно. На стержень крепится обмотка НН, а вокруг нее обмотка ВН. При таком размещении значительно облегчается изоляция обмотки от стержня. В чередующихся обмотках катушки ВН и НН чередуются по высоте стержня. Такие обмотки имеют более полную электромагнитную связь, но они сложнее в изготовлении. Поэтому в потребительских трансформаторах обычно применяются концентрические обмотки. Существует очень много конструкций концентрических обмоток. Среди них наибольшее распространение получили цилиндрические обмотки. Они подразделяются на однослойные, двухслойные и многослойные. И те, и другие изготавливаются из круглого и прямоугольного провода, который наматывается на каркас обмотки по винтовой линии. Однослойные и двухслойные цилиндрические обмотки применяются при больших токах и рекомендуются для обмоток низкого напряжения.

Многослойные обмотки чаще используются при изготовлении обмоток ВН.

Главная изоляция трансформатора обеспечивает изоляцию магнитопровода от обмоток ВН и НН, а также изоляцию обмоток между собой. Она состоит из изоляционных цилиндров, шайб, прокладок и втулок (рис. 20.4).

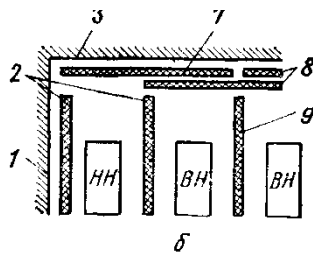


Рис. 20.4. Конструкция главной изоляции трансформатора класса напряжения 35 кВ:

1 – стержень магнитопровода; 2 – изоляционные цилиндры; 3 – ярмо;
7 – изоляционная шайба; 8 – изоляционные прокладки; 9 – междуфазная перегородка; ВН и НН – обмотки высшего и низшего напряжений

Выводы высокого и низкого напряжения служат для присоединения обмоток к внешней сети. Они размещаются в специальных отверстиях крышки бака трансформатора. Основу конструкции вывода представляет токоведущий стержень, встроенный в фарфоровый изолятор. Нижние концы стержней размещены внутри бака, а верхние находятся снаружи трансформатора. К нижним концам присоединяются выводы обмоток, а к верхним – внешняя сеть.

Механическая система предназначена для крепления всех систем трансформатора между собой и крепления выносной части трансформатора внутри бака. Она состоит из стяжных шпилек, швеллеров, балок, распорных клиньев, опорных планок и т.д.

Система охлаждения. При работе трансформатора происходит нагрев обмоток и магнитопровода за счет потерь энергии в них. Предельный нагрев частей трансформатора ограничивается допустимой температурой изоляции. Превышение этой температуры недопустимо, потому что приводит к разрушению изоляции.

Применяются 2 основных способа охлаждения трансформатора – воздушное и масляное охлаждение.

Трансформаторы с воздушным охлаждением получили название сухих. (В маркировке трансформатора указываются буквы: С – воздушное естественное охлаждение; Сз – защищенное исполнение; СГ – герметизированное исполнение.)

Однако воздушная система охлаждения малоэффективна и поэтому применение ее ограничено какими-либо специальными условиями.

Масляное охлаждение трансформаторов подразделяются на несколько типов. Тип охлаждения указывается в маркировке трансформатора специальными буквами:

- ✓ естественное масляное охлаждение (М);
- ✓ масляное охлаждение с дутьем и естественной циркуляцией масла (Д);
- ✓ масляное охлаждение с дутьем и принудительной циркуляцией масла (ДЦ);
- ✓ масляно-водяное охлаждение с принудительной циркуляцией масла (Ц).

Потребительские трансформаторы 10/0,4 кВ имеют естественное масляное охлаждение, остальные типы охлаждения рекомендуются для мощных сетевых трансформаторов и в инженерной практике сельского хозяйства не встречаются.

В зависимости от мощности трансформаторы с естественным масляным охлаждением имеют различную конструкцию бака.

Трансформаторы мощностью до 40 кВА имеют гладкие стенки бака. При мощности от 63 до 160 кВА к стенкам бака привариваются трубчатые теплообменники для охлаждения масла, а при больших мощностях бак снабжается целевым радиатором для охлаждения масла.

Трансформаторы с естественным масляным охлаждением имеют мощности до 16000 кВА. Остальные способы охлаждения рекомендуются для более мощных трансформаторов.

Система регулирования напряжения.

Напряжение электрических сетей колеблется в зависимости от их нагрузки. Поэтому возникает необходимость в регулировании (точнее стабилизации) напряжения на зажимах потребителей. Регулирование осуществляют изменением коэффициента трансформации путем переключения части витков первичной или вторичной обмоток.

Различают два способа регулирования напряжения: 1 – переключение ответвлений обмоток при отключении трансформатора от сети (переключение без возбуждения – ПБВ); 2 – переключение ответвлений под нагрузкой (регулирование под нагрузкой – РПН).

Трансформаторы малой и средней мощности на обмотке ВН имеют 5 ответвлений, среднее из которых x_3 – соответствует номинальному, а остальные соответствуют напряжениям, отличающимся от номинального на $\pm 2,5\%$ (x_4 и x_2) и $\pm 5\%$ (x_5 и x_1).

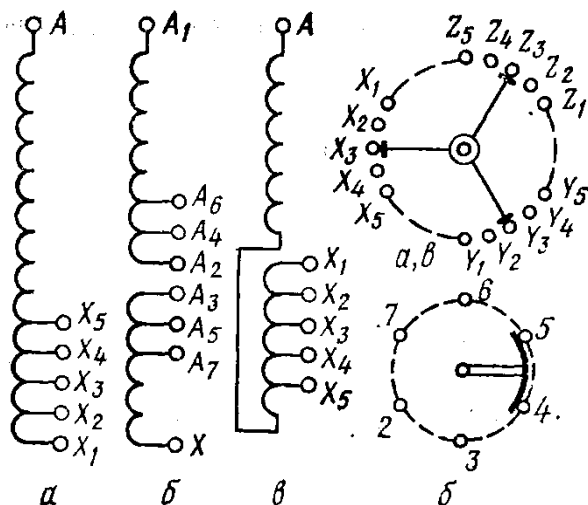


Рис. 20.5. Схемы регулировочных ответвлений первичной обмотки трансформатора (фаза А) и схематическое устройство ПБВ:
а – ответвления у конца обмотки; б – принципиальная схема ПБВ

На рисунке 20.5б показана принципиальная конструкция ПБВ, реализующего эту схему переключения в трехфазной обмотке.

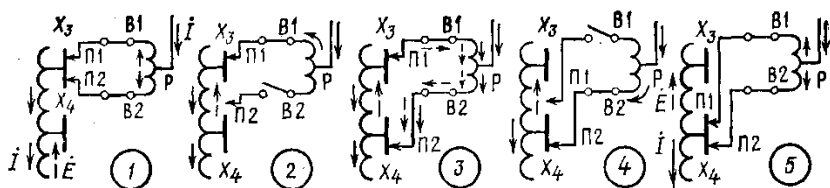


Рис. 20.6. Пять этапов работы схемы РПН с токоограничивающим реактором

Трансформаторы с РПН выпускают для мощностей от 63 до 200 000 кВА с пределами регулирования $\pm 16\%$ с $N = (6-9)$ ступенями на обмотке высшего напряжения. Переключение происходит без разрыва тока. Поэтому в момент переключения оказывается замкнутой часть обмотки между двумя соседними ответвлениями. Главной задачей является ограничение тока в контуре этих ответвлений в момент их одновременного включения.

Наиболее распространена схема РПН с токоограничивающим реактором. Переключающее устройство состоит из переключателей П1 и П2, размещенных в баке трансформатора, двух выключателей В1 и В2, находящихся в отдельном баке, размещенном на боковой стенке основного бака трансформатора, и приводного механизма с автоматикой, обеспечивающего согласованную работу переключателей П1 и П2 и выключателей В1 и В2. Переход с одного ответвления (X_3) на другое (X_4) происходит в пять этапов: 1–2–3–4 и 5, показанных на рисунке 20.6. Пунктирными стрелками показано направление ЭДС, индуцируемой в обмотке трансформатора, и уравнивающего тока в контуре, замкнутом на реактор (поз. «3»). Сплошными стрелками показано направление тока главной цепи. Размыканию контактов переключателей П1 и П2 предшествует их отключение при помощи выключателей В1 и В2.

В основном положении (поз. «1» и «5») половины токов, протекающих по двум половинкам реактора встречно, компенсируют друг друга и падение напряжения в реакторе мало. При размыкании любого из выключателей (поз. «2» и «4») реактор несколько ограничивает ток сети. При замыкании ответвлений X_3 и X_4 реактор ограничивает ток ответвления, мало влияя на ток сети. Дуга возникает только на контактах выключателей В1 и В2. Продукты разложения не загрязняют масло в основном баке.

Существует много вариантов ПБВ и РПН, которые имеют конструктивные отличия, но принцип действия и основные черты рассмотренных переключателей одинаковы.

Задание. Изучить теоретические сведения, касающиеся устройства, характеристик, регулировок и принципов работы трехфазных трансформаторов. Кратко законспектировать проработанные вопросы. Провести исследования вышеперечисленных характеристик на натуральных образцах, макетах трансформаторов и их узлов. Провести обобщение результатов исследований и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

- 1) Изучить общую конструкцию трансформатора и назначение его основных систем и узлов. Выполнить эскиз трансформатора в сборе, на котором выделить основные системы и узлы.
- 2) Изучить основные типы магнитопроводов, их конструкцию, порядок шихтовки крепления и изоляции магнитопровода и при-

меняемые материалы. Выполнить эскиз магнитопровода изучаемого трансформатора с указанием размеров и особенностей крепления и конструкции.

3) Изучить основные типы обмоток ВН и НН. Выполнить их эскизы и указать области применения. Показать на эскизе способы крепления обмоток на стержнях магнитопровода и способы усиления главной изоляции обмоток ВН.

4) Изучить основные типы изоляторов высокого и низкого напряжения и способы их крепления на крышке бака.

5) Изучить назначение механической системы трансформаторов, способы крепления выемной части внутри бака и к крышке трансформаторов.

6) Изучить назначение систем охлаждения, классификацию и области применения различных систем охлаждения трансформаторов.

7) Изучить назначение, принципиальные схемы, конструкции и рабочий процесс регуляторов напряжения ПБВ и РПН.

Вопросы для самоконтроля

1. Назначение, классификация и маркировка силовых трансформаторов, шкала мощностей, трансформаторов потребительских подстанций.

2. Поясните физическую суть преобразования электромагнитной энергии в трансформаторе на холостом ходу и под нагрузкой.

3. Опишите конструкции магнитных систем трансформаторов (типы магнитопроводов, способы их крепления, применяемые материалы, изоляция магнитопроводов).

4. Опишите электрическую систему трансформатора (конструкции обмоток, вводов изоляторов, назначение трансформаторного масла).

5. Опишите системы охлаждения трансформаторов.

Лабораторная работа №21

Исследование электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением

Цель работы: изучить устройство, принцип действия, способы пуска, торможения и регулирования электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

Электрический двигатель преобразует подводимую к нему электрическую энергию в механическую.

Основными частями двигателя постоянного тока являются:

- ✓ ярмо;
- ✓ главные и дополнительные полюса с обмотками;
- ✓ сердечник якоря с обмоткой;
- ✓ коллектор и щетки.

В зависимости от схемы включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря различают следующие типы двигателей постоянного тока: двигатели параллельного возбуждения, двигатели последовательного возбуждения, двигатели смешанного возбуждения, двигатели независимого возбуждения.

При работе электрической машины постоянного тока в режиме двигателя под действием напряжения, подводимого к якорю, в его обмотке появляется ток $I_{\text{я}}$. В результате взаимодействия этого тока с магнитным потоком, созданным обмоткой возбуждения двигателя, возникает вращающий момент $M = C_M \cdot I_{\text{я}} \Phi$, где C_M – постоянная, зависящая от конструкции машины. Как только якорь начнет вращаться, в проводниках его обмотки будет индуцироваться ЭДС E , направление которой противоположно направлению тока $I_{\text{я}}$, поэтому эту ЭДС называют «противо-ЭДС». Величина E зависит от частоты вращения якоря n и от магнитного потока Φ .

Приложенное к зажимам обмотки якоря двигателя напряжение равно сумме противо-ЭДС E и падения напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки якоря $I_{\text{я}}R_{\text{я}}$, т.е. $U = E + I_{\text{я}}R_{\text{я}}$.

При пуске двигателя в ход в первый момент после подключения его к сети якорь двигателя остается неподвижным и противо-ЭДС равна нулю, т.е. $E=0$. Поэтому при прямом пуске двигателя пусковой ток его обмотки якоря будет зависеть только от

напряжения сети и сопротивления обмотки якоря $I_{яп} = U/R_{я}$ и может превышать номинальное значение тока в обмотке якоря в 10-30 раз. Для уменьшения пускового тока можно осуществлять пуск двигателя при пониженном напряжении или с помощью добавочного сопротивления, вводимого в цепь обмотки якоря на время пуска, и тогда

$$I_{я} = \frac{U}{R_{я} + R_{п}}, \text{ А.} \quad (21.1)$$

По мере нарастания скорости двигателя пусковой реостат выводится, при этом в обмотке якоря появляется противо-ЭДС E

$$I_{я} = \frac{U - E}{R_{я}}, \text{ А.} \quad (21.2)$$

При установившемся режиме электромагнитный вращающий момент, развиваемый двигателем, уравнивается моментом сопротивления на валу двигателя $M = M_c$, который в свою очередь определяется суммой моментов: $M_c = M_0 + M_2$, где M_0 – момент, обусловленный механическими потерями на трение при вращении самого двигателя; M_2 – момент, создаваемый нагрузкой на валу двигателя.

Направление электромагнитного вращающего момента и, следовательно, направление вращения якоря двигателя зависят от направления магнитного потока и направления тока в обмотке якоря.

Чтобы изменить направление вращения двигателя, т.е. осуществить его реверсирование, необходимо изменить направление тока либо в обмотке возбуждения машины, либо в обмотке якоря. Обычно изменяют направление тока в обмотке якоря.

Частота вращения якоря двигателя определяется так:

$$n = \frac{U - (R_{я} + R_{доб})I_{я}}{C_E \Phi}, \text{ с}^{-1}. \quad (21.3)$$

Регулировать частоту вращения якоря возможно двумя способами:

1) С помощью реостата R_1 изменять ток возбуждения I_B , а, следовательно, и поток машины Φ . Следует помнить, что во время работы двигателя нельзя значительно уменьшать ток возбуждения I_B (а значит и Φ) или разрывать цепь возбуждения двигателя, так как это может привести к значительному увеличению тока

в обмотке якоря и быстрому нарастанию (выше номинальной) частоты вращения двигателя, двигатель может пойти «в разнос».

2) С помощью реостата R_2 , включенного последовательно с обмоткой якоря, изменять суммарное сопротивление цепи якоря, при постоянном напряжении сети.

Основные свойства двигателя определяются его механической характеристикой и рабочими характеристиками.

Рабочие характеристики. Рабочими характеристиками двигателя называют зависимости потребляемого двигателем тока $I_{\text{я}}$, момента на валу M , частоты вращения n и коэффициента полезного действия η от полезной мощности двигателя P_2 при $U = U_{\text{H}} = \text{const}$, и при постоянном сопротивлении в цепи возбуждения $R_1 = \text{const}$, $R_{\text{В}} = r_{\text{в}} + R_2$.

Механическая характеристика – это зависимость установившейся частоты вращения якоря двигателя от момента на его валу при постоянном напряжении сети U и сопротивлении цепи якоря $n = f(M)$.

Механическая характеристика, снятая при $R_1 = 0$ и $\Phi = \Phi_{\text{H}}$, называется естественной. При нагрузках на валу, не превышающих номинальную, частота вращения двигателя уменьшается мало, на 3-7% от n_0 (n_0 – частота вращения двигателя при холостом ходе). Частота вращения двигателя уменьшается пропорционально падению напряжения на внутреннем сопротивлении обмотки якоря, поэтому механическая характеристика – пологая прямая, т.е. механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения – жесткая.

Уравнение механической характеристики

$$n = \frac{U}{C_{\text{E}} \Phi_{\text{H}}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{доб}}}{C_{\text{E}} \cdot C_{\text{M}} \cdot \Phi_{\text{H}}^2} \cdot M, \text{ мин}^{-1}, \quad (21.4)$$

где U – напряжение источника питания двигателя, В;

Φ_{H} – номинальное значение магнитного потока двигателя, Вб;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление обмотки якоря, Ом;

$R_{\text{доб}}$ – сопротивление добавочного резистора в цепи якоря, Ом;

M – момент на валу двигателя, Н·м;

C_{E} – конструктивная постоянная двигателя;

C_{M} – моментная постоянная двигателя.

Конструктивная постоянная двигателя постоянного тока составляет приблизительно 10% от моментной постоянной:

$$C_E = 0,1C_M, \quad (21.5)$$

$$C_E \Phi = \frac{U_H - R_{Я} I_{ЯН}}{n_H}. \quad (21.6)$$

КПД двигателя рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (21.7)$$

где P_2 – мощность на валу двигателя, Вт;

P_1 – потребляемая двигателем мощность из сети;

$$P_1 = U \cdot I = U I_{Я} + U \cdot I_B, \quad \text{Вт}, \quad (21.8)$$

I – потребляемый двигателем ток, А;

ΔP – потери мощности в двигателе, Вт.

$$\Delta P = \Delta P_{Я} + \Delta P_B + \Delta P_M, \quad \text{Вт}, \quad (21.9)$$

$$\Delta P_{Я} = I_{Я}^2 \cdot R_{Я}, \quad \text{Вт}, \quad (21.10)$$

$$\Delta P_B = I_B^2 \cdot R_B = U_B \cdot I_B, \quad \text{Вт}, \quad (21.11)$$

где ΔP_M – магнитные и механические потери, они составляют несколько процентов от потребляемой мощности, Вт.

Сопротивление обмотки якоря:

$$R_{Я} = 0,5(1 - \eta_H) \frac{U_H}{I_{ЯН}}, \quad \text{Ом}. \quad (21.12)$$

Момент рассчитывается по формуле

$$M = C_M \cdot \Phi \cdot I_{Я}, \quad \text{Н} \cdot \text{м}, \quad (21.13)$$

при этом должно соблюдаться равенство

$$C_M \Phi = \frac{M_H}{I_{ЯН}}, \quad (21.14)$$

где M_H – номинальный ток якоря ДПТ, А.

Левая часть равенств, определяется при номинальном токе возбуждения.

Исследование двигателя постоянного тока с независимым возбуждением производится по схеме, представленной на рисунке 21.1.

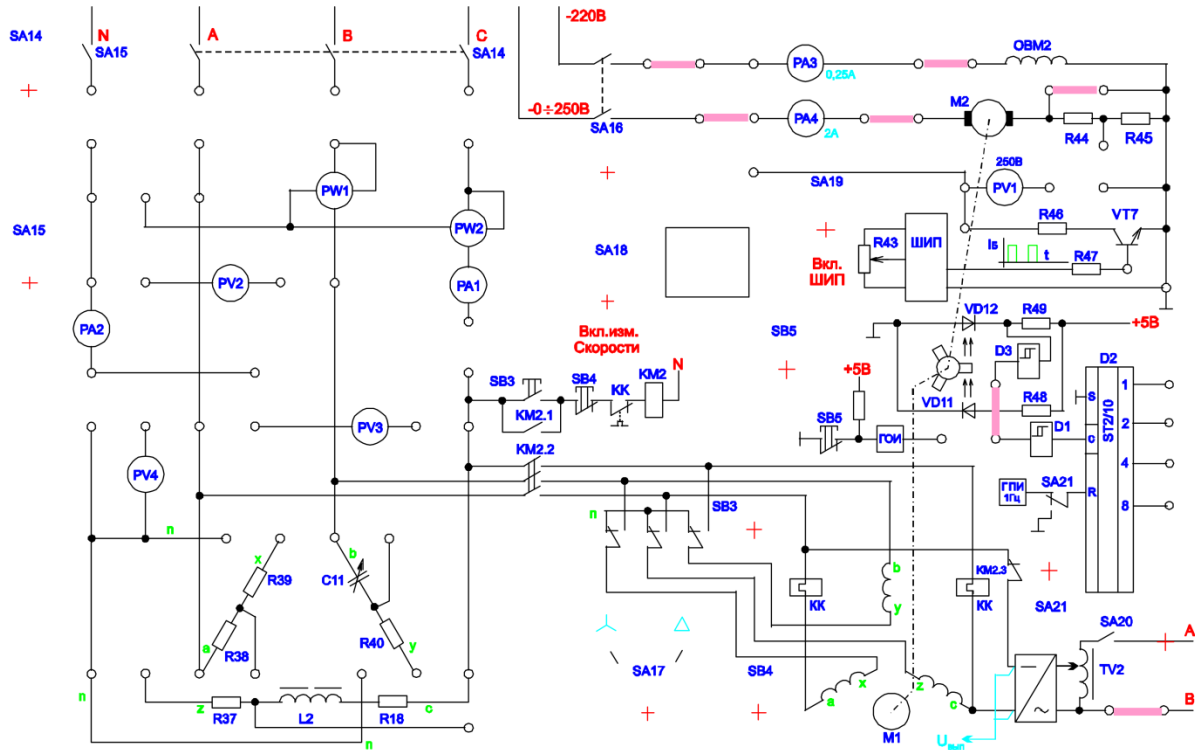


Рис. 21.1. Схема подключения цепи питания исследуемого двигателя постоянного тока

Паспортные данные ДПТ:

Тип – СЛ-369;

$P_H = 55$ Вт;

$U_H = 110$ В;

$I_{яH} = 0,8$ А;

$I_{вH} = 0,1$ А;

$M_H = 0,147$ Н·М;

$\eta = 0,55$;

$n_H = 3900$ об/мин.

Задание. Изучить теоретические сведения, касающиеся устройства, характеристик и принципа работы ДПТ с независимым возбуждением, кратко законспектировать их в рабочую тетрадь. Провести эксперименты по исследованию естественной и искусственной механических характеристик ДПТ. Построить полученные характеристики в одних координатных осях. Провести анализ результатов исследований и сделать выводы по результатам анализа.

Порядок выполнения работы.

1) Для построения естественной механической характеристики шунтируют добавочные резисторы в цепи якоря R44 и R45 и, изменяя нагрузку (SA20 включен) с помощью АД, включенного в режим динамического торможения (схема соединения обмоток «звезда»), измеряют ток якоря ДПТ и частоту вращения для нескольких значений нагрузки. Частоту вращения ДПТ на холостом ходу устанавливают с помощью УВ – 100%. Величина нагрузки регулируется изменением напряжения, подаваемого на обмотки АД с трансформатора TV2. **ВНИМАНИЕ! Напряжение изменять от 0.** Собрать на стенде цепь для испытания двигателя постоянного тока, в соответствии со схемой, представленной на рисунке 21.1, содержащей схему управляемого выпрямителя.

2) Для построения реостатной механической характеристики включают добавочные резисторы R44 и R45 в цепь якоря и повторяют действия, изложенные выше.

3) Построить естественную механическую характеристику двигателя. При отключенной нагрузке напряжение управляемого выпрямителя выставить таким, чтобы скорость вращения двигателя равнялась 100%. Резисторы R44, R45 зашунтированы.

4) Построить две реостатные механические характеристики двигателя. При зашунтированных R44, R45 с помощью управляемого выпрямителя установить частоту вращения 100% с отключенной нагрузкой. Расшунтировать R44 и, изменяя нагрузку, снять одну реостатную характеристику, затем расшунтировать R45, и снять вторую реостатную характеристику.

5) Зашунтировать добавочные резисторы в цепи якоря и, установив частоту вращения, изменяя момент нагрузки двигателя, определить при нескольких значениях моментов КПД двигателя.

Нагрузкой для ДПТ служит АД, включенный по схеме динамического торможения. Чтобы подключить нагрузку необходимо SA17 включить в положение «У», вывести галетные переключатели ЛАТРa TV2 в «0» и включить SA20. Нагрузка изменяется ЛАТРом TV2.

Для питания якоря двигателя постоянного тока используется управляемый выпрямитель соответствующий схеме (рис. 21.1).

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение электродвигателя постоянного тока.
2. Каковы преимущества и недостатки двигателей постоянного тока по сравнению с асинхронными электродвигателями?
3. Какие способы подключения обмотки возбуждения применяются?
4. Каким образом возможно регулировать частоту вращения якоря ДПТ?
5. От каких факторов зависит величина крутящего момента на валу электродвигателя?
6. В чем различие естественной и искусственной характеристик ДПТ?
7. Возможно ли осуществить реверсирование двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением? Если возможно, то каким образом его осуществить?
8. Может ли двигатель с параллельным возбуждением «уйти в разнос»?

Лабораторная работа №22

Исследование параметрического стабилизатора напряжения

Цель работы: изучить устройство, назначение и характеристики стабилитрона. Изучить принцип действия и исследовать характеристики параметрического стабилизатора напряжения.

Значение сопротивления нагрузки $R_{н.ЭКВ}$ определяют по формуле

$$R_{н.ЭКВ} = \frac{(R_{20} + R_1)(R_{22} + R_{23})}{R_{20} + R_1 + R_{22} + R_{23}}, \text{ Ом.} \quad (22.1)$$

Расчет динамического сопротивления стабилитрона R_d проводят по формуле

$$R_d = \frac{U_{ст.маx} - U_{ст.мин}}{I_{ст.маx} - I_{ст.мин}}, \text{ Ом,} \quad (22.2)$$

где $U_{ст.маx}$, $U_{ст.мин}$, – соответственно максимальное и минимальное значения напряжения стабилизации, В;

$I_{ст.маx}$, $I_{ст.мин}$ – соответственно максимальное и минимальное значения силы тока в период стабилизации, А.

Балластное сопротивление параметрического стабилизатора определяют из соотношения:

$$R_6 = R_{19} = \frac{U_{вх.маx} - U_{ст}}{I_{ст.маx} + I_H}, \text{ Ом,} \quad (22.3)$$

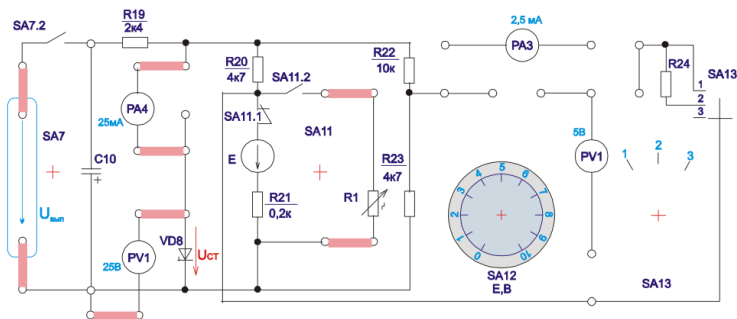


Рис. 22.1. Схема подключения лабораторной установки для исследования параметрического стабилизатора напряжения

Задание. Изучить схему лабораторной установки, собрать цепь и провести исследование характеристик стабилитрона в зависимости от напряжения питания цепи. Также исследовать характеристики стабилизатора в функции его нагрузки. По результатам эксперимента выполнить необходимые расчет, построить требуемые функциональные зависимости, проанализировать их и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

1) Изучить принцип действия параметрического стабилизатора напряжения и электрическую схему включения стабилитрона совместно с управляемым выпрямителем и измерительной схемой.

2) Рассчитать значение эквивалентного сопротивления нагрузки $R_{н.экв}$. При выполнении расчета $R_{н.экв}$ сопротивление резистивного датчика R_1 выбирается по усмотрению преподавателя в пределах от 0 до 10 кОм.

3) Рассчитать $U_{вх.мин}$ с заданными $R_6 = R_{19} = 2,4$ кОм и $R_{н.мин}$, при котором параметрический стабилизатор не выходит из режима стабилизации.

Для выполнения расчетов по работе заданы следующие условия: тип стабилитрона Д814А – установлены два последовательно. Паспортные данные:

$$U_{ст.} = 7,75 \text{ В};$$

$$\Delta U_{ст.} = 0,75 \text{ В};$$

$$r_{ст.} = 6 \text{ Ом};$$

$$I_{ст.мах.} = 40 \text{ мА};$$

$$I_{ст.мин.} = 3 \text{ мА};$$

сопротивление резисторов: $R_{19} = 2,4$ кОм; $R_{20} = 4,7$ кОм; $R_{22} = 10$ кОм; $R_{23} = 4,7$ кОм.

4) Для выполнения лабораторной работы собирается схема согласно рисунку 22.1 (тумблер SA3 устанавливается в верхнее положение «включено», тумблер переключения пределов регулирования напряжения ЛАТРа – в положение «0-100В»). Тумблер SA 11 должен находиться в верхнем положении. Исследуемая схема включается тумблером SA7. Исследуемым нелинейным элементом является стабилитрон VD8.

5) Определить $U_{вх.мин}$ экспериментально и $U_{ст.экспер.}$. Напряжение $U_{вх}$ измерить тестером.

6) Снять зависимость $U_{\text{вых.}} = f(U_{\text{вх.}})$ и $I_{\text{ст.}} = f(U_{\text{вх.}})$ при $R_{\text{н.}} = \text{const}$. Определить $I_{\text{ст. min}}$ экспериментально. Рассчитать $U_{\text{вх. min}}$ для $I_{\text{ст. min}}$ экспер. – сопоставить с измеренным. Результаты занести в таблицу 22.1.

7) Снять зависимость $U_{\text{вых.}} = f(R_{\text{н.}})$ при $U_{\text{вх.}}=35$ В. Для более точного построения зависимости взамен прибора PV1 можно использовать цифровой тестер. Результаты занести в таблицу 22.2.

8) Построить полученные функциональные зависимости по пункту 5 в одних координатных осях, а по пункту 6 – в других.

Таблица 22.1

Результаты исследований стабилизатора при $R_{\text{н.}} = \text{const}$

Установлено												
$U_{\text{вх.}}$, В	0	10	20	22	24	26	30	40	44	46	48	50
Измерено												
$U_{\text{вых.}}$, В												
$I_{\text{ст.}}$, А												
Рассчитано												
$I_{\text{н.}}$, А												

Таблица 22.2

Результаты исследования стабилизатора при $U_{\text{вх.}} = \text{const}$

Установлено									
R_1 , Ом									
Измерено									
$U_{\text{вх.}}$, В									
Рассчитано									
$R_{\text{н.}}$, Ом									
$I_{\text{н.}}$, А									

Вопросы для самоконтроля

1. Назначение стабилизаторов напряжения.
2. Принцип работы параметрического стабилизатора напряжения.
3. Какой элемент называют стабилитроном?
4. В чем отличие характеристики стабилитрона от диода?

Лабораторная работа №23

Исследование компенсационного стабилизатора напряжения

Цель работы: изучить устройство, принцип работы, методы расчета и особенности настройки стабилизатора напряжения; приобрести навыки их реализации на дискретных элементах и интегральных схемах.

Компенсационный стабилизатор напряжения (*КСН*) представляет собой управляемый делитель напряжения, состоящий из сопротивления нагрузки *H* и регулирующего элемента *РЭ*, работающего в линейном режиме. Выходное напряжение стабилизатора сравнивается с эталонным (опорным) и возникающий при этом сигнал рассогласования усиливается усилителем *У* и воздействует на *РЭ* стабилизатора таким образом, чтобы выходное напряжение стремилось достичь эталонного. В качестве источника опорного напряжения *ИОН* обычно используется параметрический стабилизатор, работающий с малыми токами нагрузки.

Основными параметрами *КСН* являются:

✓ Коэффициент полезного действия, равный отношению мощности, выделенной в нагрузке $P_{\text{вых}}$, к входной мощности $P_{\text{вх}}$, т.е.

$$\eta = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} \cdot I_{\text{вх}}. \quad (23.1)$$

✓ Коэффициент стабилизации, определяемый как отношение относительного приращения напряжения на входе стабилизатора $U_{\text{вх}}/U_{\text{вх}}$ к относительному приращению напряжения на выходе $U_{\text{вых}}/U_{\text{вых}}$ при постоянной нагрузке

$$K_{\text{ст}} = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}} = U_{\text{вых}} \cdot I_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} \cdot I_{\text{вх}}: \text{ при } R_{\text{н}} = \text{const}. \quad (23.2)$$

✓ Выходное сопротивление, равное отношению приращения напряжения на выходе стабилизатора $U_{\text{вых}}$ к приращению тока нагрузки $I_{\text{н}}$

$$R_{\text{вых}} = -\Delta U_{\text{вых}}/\Delta I_{\text{н}}, \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const}. \quad (23.3)$$

Наибольшее распространение находят *КСН* последовательного типа, в которых *РЭ* включен последовательно с нагрузкой (рис. 23.1).

При положительном сигнале рассогласования ($U_{\text{вых}} - U_{\text{оп}} > 0$) внутреннее сопротивление *РЭ* возрастает, падение напряжения на

нем увеличивается и соответственно уменьшается выходное напряжение.

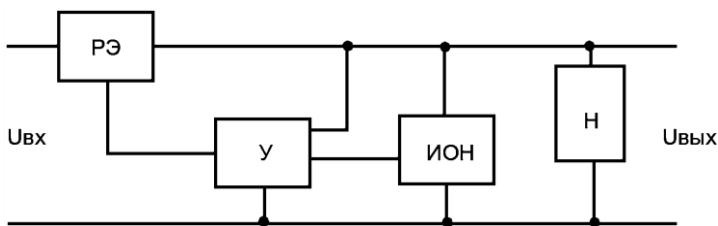


Рис. 23.1. Блок-схема КСН

При отрицательном сигнале рассогласования ($U_{\text{вых}} - U_{\text{оп}} < 0$), наоборот, внутреннее сопротивление РЭ и падение напряжения на нем уменьшается, что приводит к возрастанию выходного напряжения $U_{\text{вых}}$.

Принципиальная схема простейшего КСН, выполненная на дискретных элементах, представлена на рисунке 23.2.

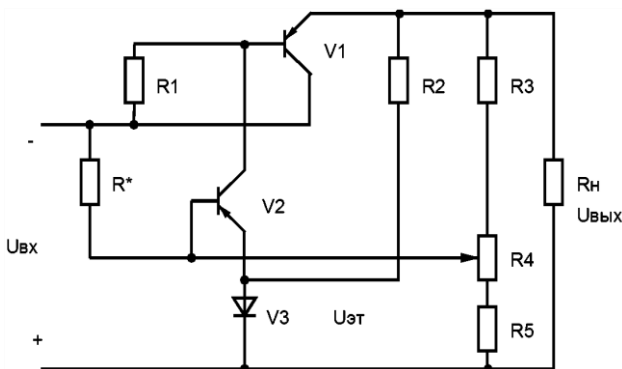


Рис. 23.2. Принципиальная схема КСН

Транзистор V1 является регулирующим элементом, схема сравнения выполнена на эмиттерном переходе транзистора V2, источником опорного напряжения является стабилитрон V3, функцию усилителя сигналов выполняет транзистор V2.

При увеличении напряжения на входе схемы напряжение на выходе также стремится увеличиться. При этом увеличивается напряжение на нижнем плече делителя R3, R4, R5. Напряжение эмиттера транзистора V2 застabilизировано с помощью стабилитрона V3. Таким образом, напряжение база-эмиттер транзистора V2

при увеличении входного напряжения становится более отрицательным. В результате коллекторный ток транзистора V2 возрастает. Протекая через R1, этот ток вызывает на нем увеличение падения напряжения. Потенциал базы V1 становится более положительным, транзистор подзапирается и напряжение на нем увеличивается. В результате выходное напряжение поддерживается практически неизменным.

В этой схеме усилитель постоянного тока на транзисторе V2 питается от нестабилизированного источника входного напряжения.

Поэтому при его изменении будет изменяться и выходное напряжение усилителя, что приводит к уменьшению коэффициента стабилизации схемы. Для ослабления влияния изменений входного напряжения на точность работы схемы вводят отрицательную обратную связь по входному напряжению с помощью резистора R*. Сопротивление этого резистора подбирается, как правило, экспериментально.

Другим способом улучшения коэффициента стабилизации схемы является замена резистора R1 стабилизатором тока на транзисторе, что эквивалентно применению резистора с большим динамическим сопротивлением и резкому повышению коэффициента стабилизации схемы.

КСН с регулирующим элементом, работающим в линейном режиме, имеют относительно низкий КПД ($\eta = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$), который составляет 40-60%. КСН одновременно является фильтром переменной составляющей входного напряжения, коэффициент сглаживания которого $K_{\text{сгл.}} = K_{\text{ст.}}$, где $K_{\text{сгл.}}$ – отношение пульсаций напряжения на входе стабилизатора к коэффициенту пульсаций выходного напряжения.

Плавная регулировка выходного напряжения в схеме (рис. 23.2) производится с помощью делителя напряжения R3, R4, R5.

Если пренебречь падением напряжения на эмиттерном переходе транзистора V2, то для выходного напряжения можно записать:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}}(I_{\text{б2}} + U_{\text{оп}}/(R_5 + R_4')) \cdot (R_3 + R_4'). \quad (23.4)$$

Ток через делитель $I_{\text{дел}}$ выбирают обычно на порядок выше, чем ток базы V2, что позволяет определить $U_{\text{вых}}$ из выражения

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ОН}}(1 + (R_3 + R_4)/(R_5 + R_4)). \quad (23.5)$$

Если базу транзистора V2 подключить непосредственно к нагрузке, то $U_{\text{ОН}} = U_{\text{ВЫХ}}$. При этом коэффициент стабилизации и выходное сопротивление равны:

$$K_{\text{СТ}} = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} \cdot (R_{\text{К1}}/(R_{\text{В3}} + R_{\text{ВХ62}})), \quad (23.6)$$

$$R_{\text{ВЫХ}} = ((R_{\text{Э2}} + R_{\text{В1}}) \cdot (1 + B_2) + R_{\text{62}})/(1 + B_1 \cdot B_2) = 1/B_1 \cdot (R_{\text{ВХ62}} + R_{\text{В3}}), \quad (23.7)$$

где $R_{\text{К1}}$, $R_{\text{Э2}}$, R_{62} – сопротивления коллектора, эмиттера и базы транзисторов VI и V2 соответственно, Ом;

$R_{\text{В3}}$ – динамическое сопротивление стабилитрона, Ом;

$R_{\text{ВХ62}}$ – входное сопротивление транзистора V2, Ом.

Для стабилизатора с делителем на выходе можно записать

$$R_{\text{ВЫХ дел.}} = K_{\text{ВЫХ}} / K_{\text{дел.}}, \quad (23.8)$$

где $K_{\text{дел.}} = (R_5 + R_4)/(R_3 + R_4 + R_5) = U_{\text{ОН}}/U_{\text{ВЫХ}}$ – множитель, обусловленный влиянием делителя на коэффициент стабилизации $K_{\text{СТ}}$, определенный при $U_{\text{ОН}} = U_{\text{ВЫХ}}$.

Таким образом, делитель напряжения в схеме стабилизатора уменьшает $K_{\text{СТ}}$ и повышает $R_{\text{ВЫХ}}$. Для получения большого коэффициента стабилизации в качестве усилителей постоянного тока можно использовать операционные усилители. Пример схемы такого стабилизатора приведен на рисунке 23.3.

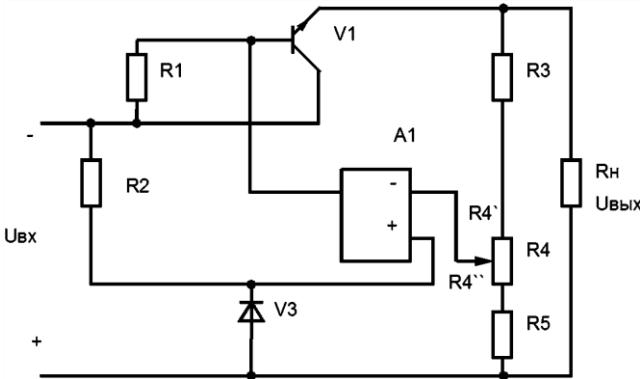


Рис. 23.3. Принципиальная схема КСН с ОУ

Для стабилизатора, приведенного на рисунке 23.3, коэффициент стабилизации

$$K_{\text{ст min}} = U_{\text{вых min}} / U_{\text{вх max}} \cdot R_{\text{к1}} / R_{\text{э1}} \cdot K_{\text{от}} / (1 + \beta_1) \cdot K_{\text{дел}}. \quad (23.9)$$

Схемы защиты стабилизаторов от перегрузок. Перегрузки стабилизаторов имеют место при переходных процессах и в аварийных режимах и могут привести к выходу из строя транзисторов, в первую очередь, регулирующих. Наиболее распространенным видом перегрузок являются токовые перегрузки, возникающие при коротких замыканиях в цепи нагрузки. При этом через транзистор РЭ протекает большой ток, что приводит к перегреву транзистора. Для ограничения максимального тока через транзистор РЭ в стабилизаторах напряжения используют различные схемы защиты, принцип действия которых основан на шунтировании управляющего перехода транзистора РЭ другим транзистором при превышении тока нагрузки заданного значения.

Фрагмент схемы стабилизатора с защитой от токов к.з. приведен на рисунке 23.4.

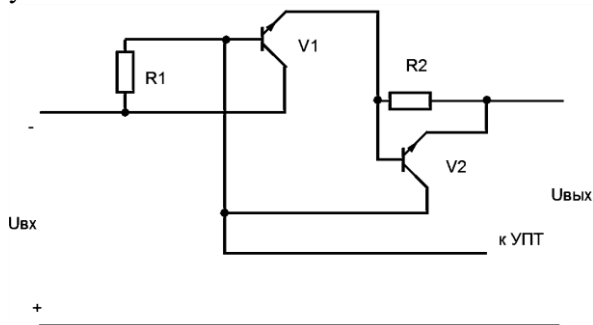


Рис. 23.4. Схема стабилизатора с защитой от токов к.з.

В нормальном режиме в этой схеме транзистор V2 заперт, так как падение напряжения на резисторе R2 не достаточно для его открывания и не влияет на работу V1. В режиме перегрузки U_{R2} увеличивается, транзистор V2 открывается и шунтирует базовую цепь V1, уменьшая тем самым базовый ток этого транзистора. Транзистор V1 запирается и уменьшает ток через нагрузку.

Интегральные компенсационные стабилизаторы (ИКС). ИКС выпускаются в виде отдельных микросхем серии К142ЕН с выходным регулированием напряжения от 3 до 30 В, с фиксированным напряжением 5, 6, 12 В и с двухполярным входным и вы-

ходным напряжениями и серии 275ЕН. Структура ИКС в целом соответствует структуре рассмотренных выше стабилизаторов на дискретных элементах, однако они могут дополнительно содержать цепи защиты и другие элементы.

Основная схема включения ИКС К142ЕН1Б приведена на рисунке 23.5. Внешний резистор R1 включен в цепь защиты схемы от короткого замыкания нагрузки. Конденсатор C1 определяет время восстановления номинального режима при импульсном изменении нагрузки и входного напряжения. Его емкость составляет в реальных схемах примерно 10 пФ. Конденсатор C2 позволяет уменьшить выброс выходного напряжения при импульсном изменении нагрузки и входного напряжения и подбирается экспериментально.

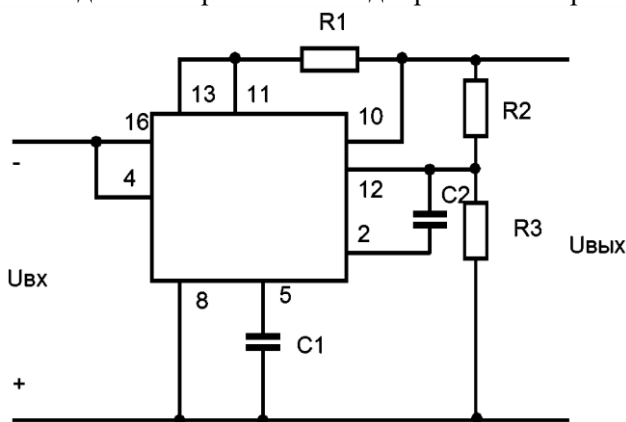


Рис. 23.5. Схема включения стабилизатора К142ЕН1Б

Задание. Изучить принцип работы схем компенсационных стабилизаторов напряжения и порядок расчета схем стабилизаторов, их качественных характеристик. Для заданного преподавателем выходного напряжения и номинального тока нагрузки по известным элементам схемы стабилизатора рассчитать величины сопротивлений R10 и R7, а также $K_{ст}$ и $R_{вых}$. Нарисовать схемы исследуемых стабилизаторов.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему стабилизатора напряжения без блока защиты на основе схемы, представленной на рисунке 23.6.

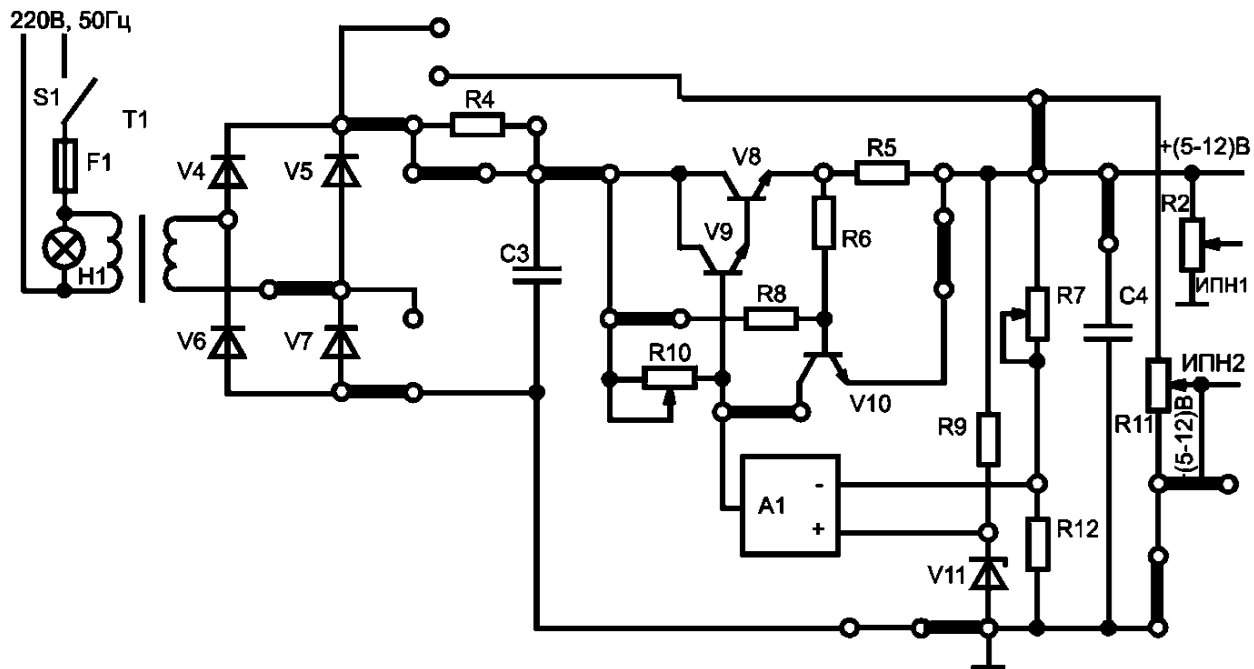


Рис. 23.6. Схема для сборки компенсационного стабилизатора напряжения

2) Установить на стенде рассчитанные ранее значения R10, R7 и R11. Включить стенд и замерить с помощью цифрового вольтметра выходное напряжение и сравнить с расчетным значением.

3) Установить заданные значения $U_{\text{вых}}$ и $I_{\text{ном}}$ и, изменяя входное напряжение (включая или отключая резистор R4), замерить входные и выходные напряжения. Определить реальный коэффициент стабилизации стабилизатора по формуле

$$K_{\text{ст}} = (\Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}) / (\Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}}). \quad (23.10)$$

Полученное значение сравнить с расчетным.

4) Изменяя сопротивление нагрузки R11 снять выходную характеристику стабилизатора $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{н}})$.

Ток изменяют от 0 до $I_{\text{н.мах}}$. Рассчитать реальное выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$ стабилизатора и сравнить с расчетным.

5) Рассчитать КПД стабилизатора, приняв токи на входе и выходе стабилизатора равными.

6) Собрать схему стабилизатора с защитой от токов короткого замыкания. Изменяя величину нагрузки резистором R11 определить $I_{\text{н.мах}}$, при котором срабатывает схема защиты. Определить ток нагрузки, который протекает через транзистор V8 после срабатывания защиты. Рассчитать мощность, которая рассеивается на этом транзисторе.

7) Сравнить все полученные экспериментальные данные с расчетными и объяснить возможные расхождения.

Вопросы для самоконтроля

1. Объяснить принцип работы КСН, назначение и взаимодействие его основных узлов.

2. Что такое коэффициент стабилизации и как его определить теоретически и практически.

3. Перечислите возможные способы увеличения коэффициента стабилизации.

4. Что такое внутреннее сопротивление стабилизатора, от чего оно зависит и как его определить?

5. Почему выходное сопротивление и коэффициент стабилизации зависят от коэффициента деления делителя.

6. С какой целью включается резистор R* в схеме стабилизатора.

7. В чем преимущество стабилизаторов напряжения в интегральном исполнении по сравнению со стабилизаторами на дискретных элементах.

8. Объясните, каким образом можно увеличить нагрузочную способность интегрального стабилизатора.

Лабораторная работа №24

Исследование управляемого тиристорного выпрямителя и сглаживающих фильтров

Цель работы: изучить схемы, принципы работы однополупериодного и мостового однофазных неуправляемых и управляемых выпрямителей; исследовать основные характеристики выпрямителей.

Неуправляемые выпрямители. Выпрямителем называется устройство, преобразующее переменное напряжение, полярность которого изменяется, в пульсирующее, полярность которого остается постоянной. Для получения постоянного напряжения из пульсирующего на выходе выпрямителя ставят сглаживающие фильтры. Таким образом, выпрямитель совместно с фильтром является устройством, преобразующим переменное напряжение в постоянное. При питании от однофазной сети применяются следующие схемы выпрямителей: однополупериодные; двухполупериодные (мостовая, с нулевым выводом).

Однополупериодная схема наиболее проста и содержит всего один диод $V1$ (рис. 24.1, *a*). В положительный полупериод напряжения на вторичной обмотке трансформатора диод $V1$ находится в проводящем состоянии и через него протекает ток в нагрузку; а в отрицательный – диод закрыт и тока в нагрузку нет. Следовательно, ток в нагрузке протекает в одном направлении и только в один положительный полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора $T1$.

Мостовая схема (схема Грца) выпрямителя (рис. 24.1, *б*) содержит четыре вентиля $V1-V4$; в положительный полупериод напряжения на вторичной обмотке трансформатора $T1$ пропускают ток вентили $V1, V4$, а в отрицательный – вентили $V2, V3$. При этом ток в нагрузке протекает в одном направлении, указанном стрелкой. К закрытому вентилю прикладывается обратное напряжение U_{vd} , повторяющее по форме напряжение вторичной обмотки трансформатора. Схемы выпрямителей представлены на рисунке 24.1.

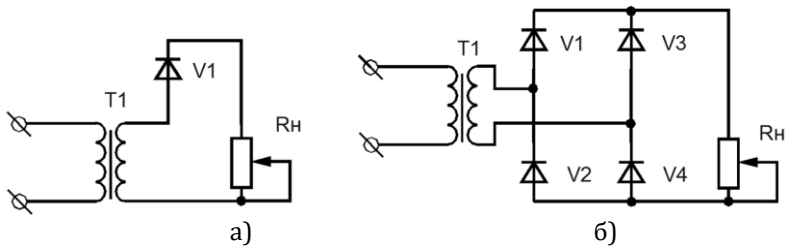


Рис. 24.1. Принципиальные схемы неуправляемых стабилизаторов напряжения:
 а – однополупериодный; б – двухполупериодный (мостовой)

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле равно E_{2m} , т.е. амплитуде напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Среднее значение выпрямленного напряжения:

$$U_{cp} = \frac{1}{n} \int E_{2m} \sin \omega t dt = \frac{2E_{2m}}{n}, \text{ В.} \quad (24.1)$$

Если учесть, что действующее значение напряжения на вторичной обмотке E_2 связано с амплитудным соотношением:

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}}, \text{ В,} \quad (24.2)$$

можно получить другое соотношение для определения среднего значения выпрямленного напряжения:

$$U_{cp} = 0,9E_2, \text{ В.} \quad (24.3)$$

В схеме Грца в первичной и вторичной обмотках при работе на активную нагрузку протекает синусоидальный ток. Схема Грца характеризуется хорошим использованием элементов выпрямителя и трансформатора. Поэтому в настоящее время она находит наибольшее применение для выпрямления однофазного тока.

Схема со средней точкой содержит два вентиля V1 и V2 и трансформатор T1, имеющий две одинаковые вторичные обмотки, включенные последовательно и согласно. В положительный полупериод сетевого напряжения открыт вентиль V1. В отрицательный полупериод открыт вентиль V2. При этом ток обоих вентилях протекает через нагрузку в одном направлении. Формы напряжения и тока такие же, как и в мостовой схеме. Однако амплитудное

значение обратного напряжения на вентиле в два раза больше, чем в схеме Греча. Недостатком схемы является плохое использование трансформатора, так как имеются две вторичные обмотки, работающие по полпериода каждая. Основная область применения данной схемы – низковольтные выпрямители. В ней последовательно с нагрузкой включен только один вентиль, что при низких выпрямленных напряжениях позволяет получить более высокий КПД.

Управляемые выпрямители. Управляемым называется такой выпрямитель, который, кроме выпрямления переменного напряжения, одновременно осуществляет регулирование напряжения. Управляемый выпрямитель (УВ) получается из обычного заменой в нем неуправляемых вентилях (диодов) управляемыми вентилями – тиристорами. Регулирование осуществляется задержкой открывания очередного тиристора в пределах полупериода сетевого напряжения. Угол задержки открытия тиристора называется углом управления α , отсчитываемым от момента естественного открывания вентиля, т.е. от момента, в который к вентилю начинает прикладываться положительное напряжение. Для выпрямителей, питающихся от однофазной сети, этот момент совпадает с моментом перехода сетевого напряжения через ноль.

Схема УВ, собранного по схеме с нулевой точкой, показана на рисунке 24.2.

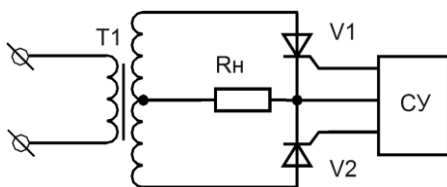


Рис. 24.2. Схема управляемого тиристорного выпрямителя

Преимущество этой схемы состоит в наличии общей точки катодов тиристоров $V1$ и $V2$. При этом упрощается подключение системы управления к выпрямителю. На вход выпрямителя подается переменное напряжение от двух вторичных обмоток $T1$. Эти напряжения сдвинуты на угол в 180 эл. градусов. Система управления (CU) вырабатывает импульсы управления, временное положение которых можно изменять в пределах полупериода сетевого напряжения. До подачи импульса управления тиристоры закрыты

и напряжение на нагрузке равно нулю. В момент подачи импульса управления открывается соответствующий тиристор и с этого момента к нагрузке прикладывается напряжение вторичной обмотки трансформатора. Изменяя угол управления α , можно регулировать среднее значение выпрямленного напряжения, которое определяется из выражения:

$$U_{\text{ср}} = U_{\text{ср.0}} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \text{ В}, \quad (24.4)$$

где $U_{\text{ср.0}} = 2E_{2\text{м}}/\pi$ – среднее значение выпрямленного напряжения, при угле управления $\alpha = 0$, т.е. выпрямленное напряжение обычного неуправляемого выпрямителя.

Последнее выражение определяет регулировочную характеристику УВ. Из него видно, что среднее значение выпрямленного напряжения при изменении угла от 0 до 180 градусов плавно уменьшается от значения $U_{\text{ср.0}}$ до 0. Таким образом, преимущество УВ состоит в возможности плавной регулировки среднего значения выпрямленного напряжения.

Недостатки УВ следующие:

- ✓ усложнение схемы, так как необходима система управления выпрямителем;
- ✓ увеличение коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения и ухудшение его гармонического состава. Это происходит за счет искажения формы выпрямленного напряжения и появления скачков напряжения в момент открывания тиристорov;
- ✓ появление сдвига по фазе между током и напряжением в первичной обмотке трансформатора. Таким образом, даже при чисто активной нагрузке УВ потребляет из сети реактивную мощность.

Если нагрузка начинается с емкости и тиристоры управляются короткими импульсами, то из-за появления угла отсечки при малых углах управления могут быть пропуски включения тиристорov (напряжение на конденсаторе больше, чем питающее напряжение). Поэтому УВ, как правило, не применяют для работы на нагрузку емкостного характера.

Пассивные фильтры. Так как выпрямленное напряжение – пульсирующее, для получения постоянного напряжения на выходе выпрямителя обычно ставят сглаживающий фильтр. Сглаживающий фильтр – это устройство, предназначенное для уменьшения переменной составляющей выпрямленного напряжения. Степень

пульсаций выпрямленного напряжения характеризуется коэффициентом пульсаций, который равен отношению амплитуды первой (основной) гармоники пульсаций U_{\max} к среднему значению выходного напряжения $U_{\text{ср}}$:

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\max}}{U_{\text{ср}}}. \quad (24.5)$$

Зная кратность пульсаций выпрямленного напряжения m , коэффициент пульсации выпрямленного напряжения можно определить по формуле

$$K'_{\text{п}} = \frac{2}{m^2 - 1}. \quad (24.6)$$

Сглаживающее действие фильтра характеризуется его коэффициентом сглаживания, который равен отношению коэффициента пульсаций на входе фильтра к коэффициенту пульсации на выходе фильтра:

$$K_{\text{сгл}} = \frac{K'_{\text{п}}}{K_{\text{п}}}. \quad (24.7)$$

Другим параметром фильтра, характеризующим его фильтрующие свойства, является коэффициент фильтрации:

$$K_{\text{ф}} = \frac{U'_{\max}}{U_{\max}}, \quad (24.8)$$

где U'_{\max} и U_{\max} – напряжение переменной составляющей соответственно на входе и выходе фильтра.

Емкостный фильтр представляет собой конденсатор $C_{\text{ф}}$, включенный параллельно нагрузке выпрямителя $R_{\text{н}}$ (рис. 24.3, а). Его действие основано на накоплении энергии в электрическом поле конденсатора в моменты, когда выпрямленное напряжение $U_{\text{выпр}}$ больше напряжения на конденсаторе $U_{\text{с}}$. При этом вентили выпрямителя открыты и пропускают ток. Когда выпрямленное напряжение становится меньше напряжения на конденсаторе, вентили закрываются, и ток в нагрузке поддерживается за счет энергии, накопленной в емкости $C_{\text{ф}}$.

Выпрямленное напряжение содержит постоянную составляющую и гармоники переменного напряжения с частотой, кратной частоте питающей сети. Максимальную амплитуду имеет первая гармоника. Поскольку для постоянного тока конденсатор

представляет бесконечно большое сопротивление, постоянный ток будет идти в нагрузку.

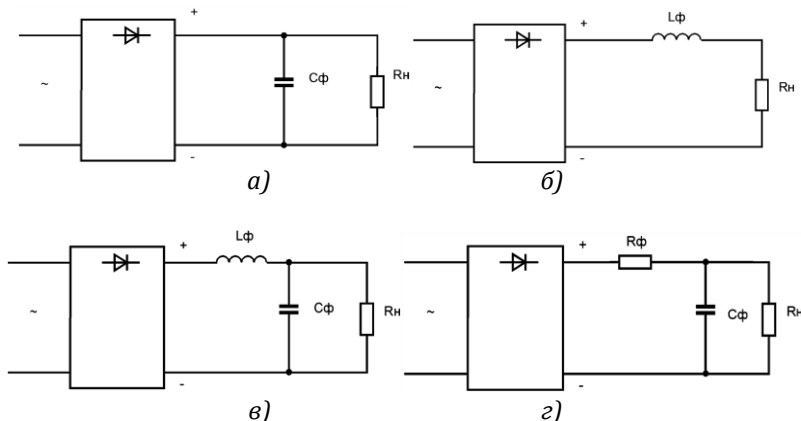


Рис. 24.3. Схемы сглаживающих фильтров:
 а – емкостный; б – индуктивный; в – реактивный Г-образный;
 активно-реактивный (активно-емкостный) Г-образный

Чтобы переменная составляющая не проходила в нагрузку, емкость конденсатора выбирают так, чтобы его сопротивление для переменного тока было намного меньше сопротивления нагрузки:

$$\frac{1}{m\omega C_{\phi}} \ll R_{\text{н}}. \quad (24.9)$$

Емкостный фильтр выгоднее применять при малых токах нагрузки (больших $P_{\text{н}}$), так как при этом требуется меньшая емкость конденсатора фильтра. Вследствие того, что сглаживающее действие емкостного фильтра основано на накоплении энергии, а энергия, запасаемая конденсатором, определяется как

$$W = C_{\phi} \cdot \frac{U^2}{2}, \text{ Дж}, \quad (24.10)$$

можно сделать вывод, что емкостный фильтр выгоднее применять при повышенных напряжениях.

Индуктивный фильтр представляет собой дроссель L_{ϕ} , включенный последовательно с сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$ (рис. 24.3, б). Сглаживающее действие такого фильтра основано на возникновении в дросселе L_{ϕ} ЭДС самоиндукции, препятствующей

щей изменению выпрямленного тока. Дроссель для постоянной составляющей выпрямленного тока практически не представляет никакого сопротивления, и она передается в нагрузку без ослабления. Чтобы переменная составляющая выпрямленного напряжения не проходила в нагрузку, необходимо, чтобы сопротивление дросселя для переменного тока было намного больше сопротивления нагрузки:

$$m\omega L_{\phi} \gg R_{\text{н}}. \quad (24.11)$$

Так как сглаживающее действие дросселя основано на его свойстве накапливать энергию, а энергия, запасаемая дросселем, определяется по формуле

$$W_L = L_{\phi} \cdot \frac{I^2}{2}, \text{ Дж}, \quad (24.12)$$

индуктивный фильтр более эффективен при больших токах нагрузки. Индуктивный фильтр позволяет обеспечить непрерывность тока в цепи и благоприятный режим работы вентиля и трансформатора выпрямителя. Нагрузочная характеристика $U_{\text{ср}} = f(I_{\text{ср}})$ выпрямителя с индуктивным фильтром – жесткая, что является преимуществом по сравнению с емкостным фильтром.

Если параллельно нагрузке $K_{\text{н}}$ подключить конденсатор, а последовательно с нагрузкой включить дроссель, получим Г-образный LC-фильтр (рис. 24.3, в). В нем сочетаются положительные качества индуктивного и емкостного фильтра, так как элементы фильтра выбирают из условия:

$$m\omega L_{\phi} \gg R_{\text{н}} \gg \frac{1}{m\omega C_{\phi}}. \quad (24.13)$$

Такой фильтр одинаково хорошо сглаживает как при больших, так и при малых токах нагрузки. Для обеспечения жесткой нагрузочной характеристики такого фильтра необходимо, чтобы ток в дросселе был непрерывен. Это условие выполнимо, если индуктивность дросселя больше некоторого критического значения, определяемого соотношением:

$$L_{\phi} > L_{\text{кк}} = K'_{\text{п}} \cdot \frac{R_{\text{н.макс}}}{m\omega}, \text{ Гн}, \quad (24.14)$$

где $K'_{\text{п}}$ – коэффициент пульсации напряжения на выходе фильтра.

В маломощных выпрямителях часто вместо дросселя фильтра ставят сопротивление R_{ϕ} (рис. 24.3, з). В таком RC-фильтре на

сопротивлении R_ϕ , кроме переменной составляющей, также падает часть постоянной составляющей выпрямленного напряжения. КПД такого фильтра меньше, чем LC -фильтра. Однако RC -фильтры имеют меньшие габаритные размеры и стоимость. Применяются RC -фильтры в маломощных выпрямителях, работающих, как правило, на статическую нагрузку. Для получения хорошего коэффициента сглаживания и приемлемого КПД элементы RC -фильтра выбирают из следующих условий:

$$\begin{aligned} \frac{1}{m\omega C_\phi} &\ll R_H, \\ R_\phi &\gg \frac{1}{m\omega C_\phi}, \\ \frac{R_H}{R_H + R_\phi} &= 0,65 \dots 0,8. \end{aligned} \quad (24.15)$$

Активные фильтры. Индуктивно-емкостные фильтры просты и надежны в эксплуатации, однако их масса и габаритные размеры очень существенны и для некоторых устройств могут быть неприемлемы. Электронные фильтры не имеют присущих индуктивно-емкостным фильтрам недостатков. Вместо дросселя в этих фильтрах используют транзисторы, вольт-амперная коллекторная характеристика которых по форме подобна кривой намагничивания ферромагнитного сердечника дросселя.

Электронные активные фильтры применяют при токах нагрузки до нескольких ампер и напряжениях, определяемых десятками вольт. Различают электронные фильтры с нагрузкой, включенной последовательно с транзистором в цепь коллектора либо эмиттера или параллельно транзистору.

Наиболее простая и часто используемая на практике схема фильтра представлена на рисунке 24.4.

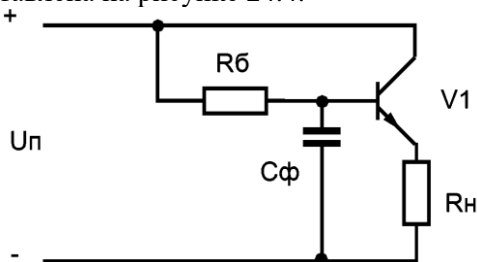


Рис. 24.4. Схема активного фильтра

В данной схеме имеет место автоматическое смещение постоянной составляющей напряжения, подаваемого на базу транзистора. Поэтому фильтр может устойчиво работать при изменении температуры окружающей среды. Схема не требует настройки при замене транзистора.

Коэффициент усиления по напряжению для данной схемы практически равен единице, а выходное сопротивление значительно ниже, чем для других схем включения транзистора. Однако коэффициент сглаживания этого фильтра ниже, чем у других схем. Повысить его можно путем повышения коэффициента сглаживания фильтра в базовой цепи транзистора, либо за счет увеличения коэффициента усиления транзистора.

Задание. Изучить принцип работы однофазных неуправляемых и управляемых выпрямителей, а также принцип построения схемы управления УВ. Изучить принцип работы схем пассивных и активных фильтров. Освоить порядок расчета схем фильтров и их качественных характеристик. Для заданного преподавателем коэффициента сглаживания и известных параметрах RC -фильтра рассчитать величину допустимой нагрузки.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему однополупериодного выпрямителя без фильтра в соответствии с рисунком 24.5.

2) Подать на схему напряжение, снять и зарисовать для номинального тока нагрузки $I_n = 100$ мА осциллограммы выпрямленного напряжения, напряжения на диоде, анодного тока диода, тока на выходе выпрямителя, тока вторичной и первичной обмоток трансформатора.

Осциллограммы рисовать в соответствии с их временным положением друг относительно друга для номинального значения тока нагрузки.

3) Снять и построить внешнюю характеристику выпрямителя $U_{cp} = f(I_{cp})$, изменяя величину нагрузки сопротивлением R_{11} .

4) Определить внутреннее сопротивление выпрямителя в номинальном режиме $R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}$.

5) Собрать схему двухполупериодного выпрямителя согласно рисунку 24.6. Провести исследования, аналогичные пп. 2-4, ток нагрузки установить равным $I_n = 200$ мА.

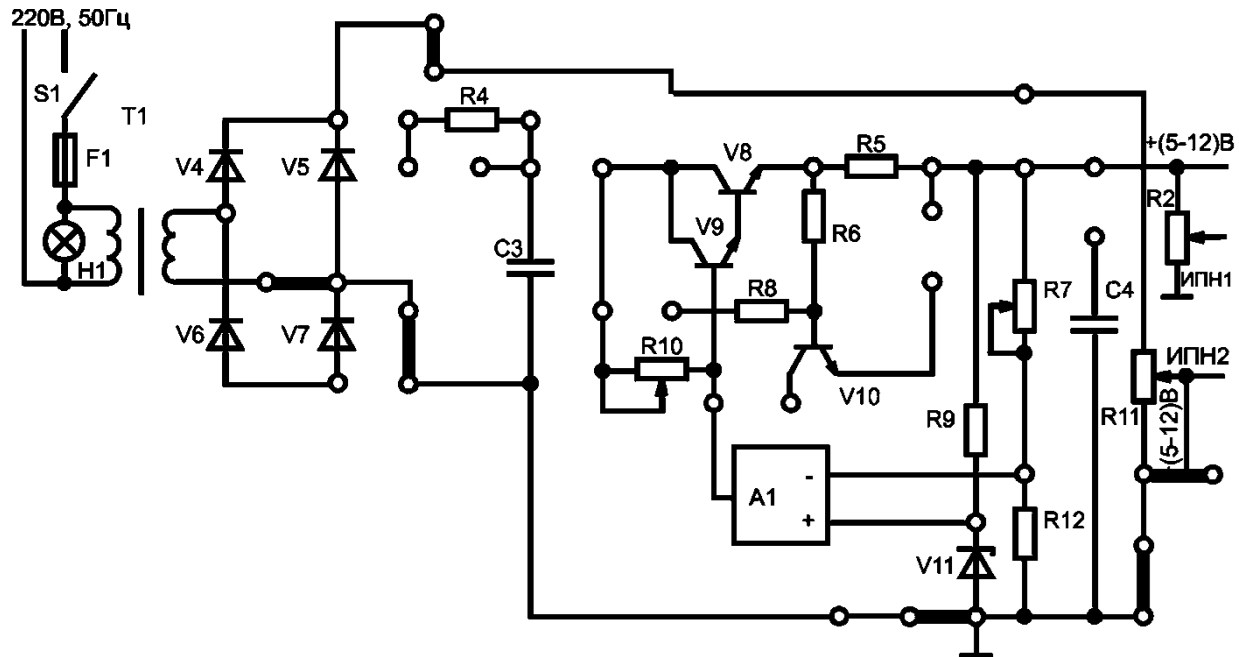


Рис. 24.5. Схема для сборки однополупериодного неуправляемого выпрямителя

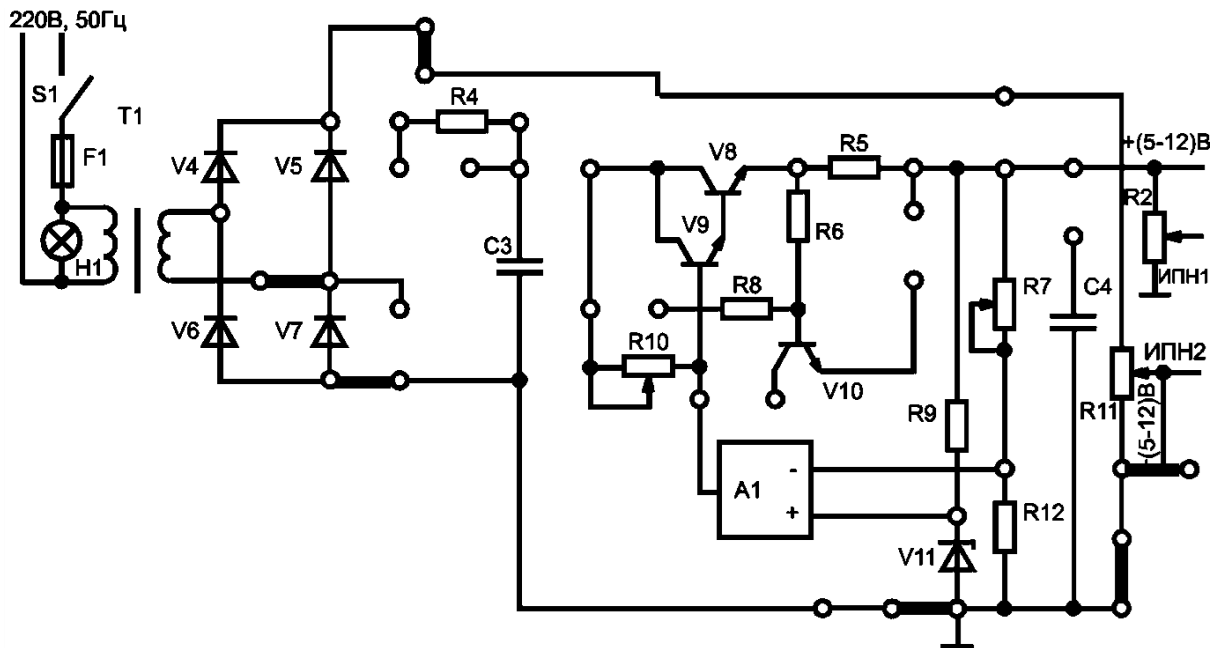


Рис. 24.6. Схема для сборки двухполупериодного неуправляемого выпрямителя

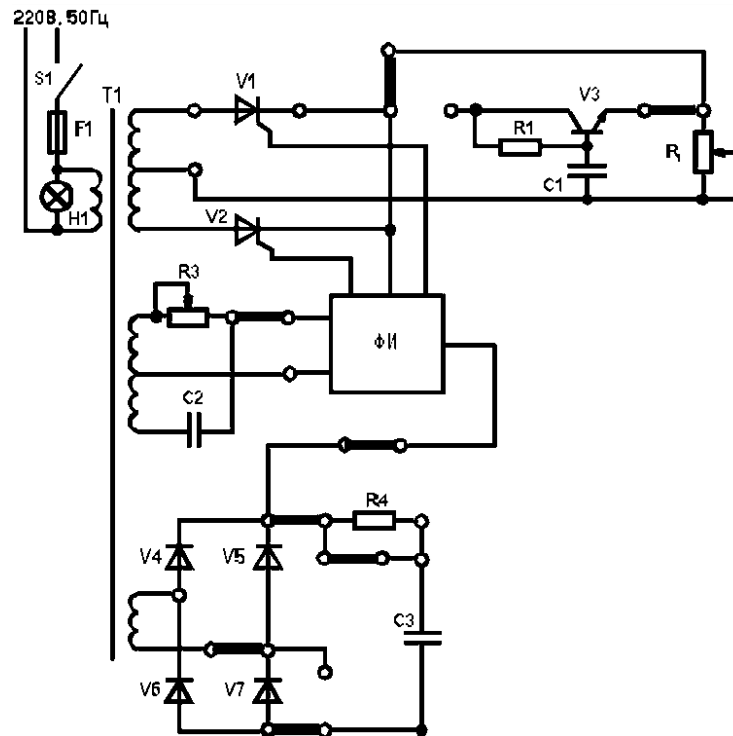


Рис. 24.7. Схема для сборки двухполупериодного управляемого выпрямителя

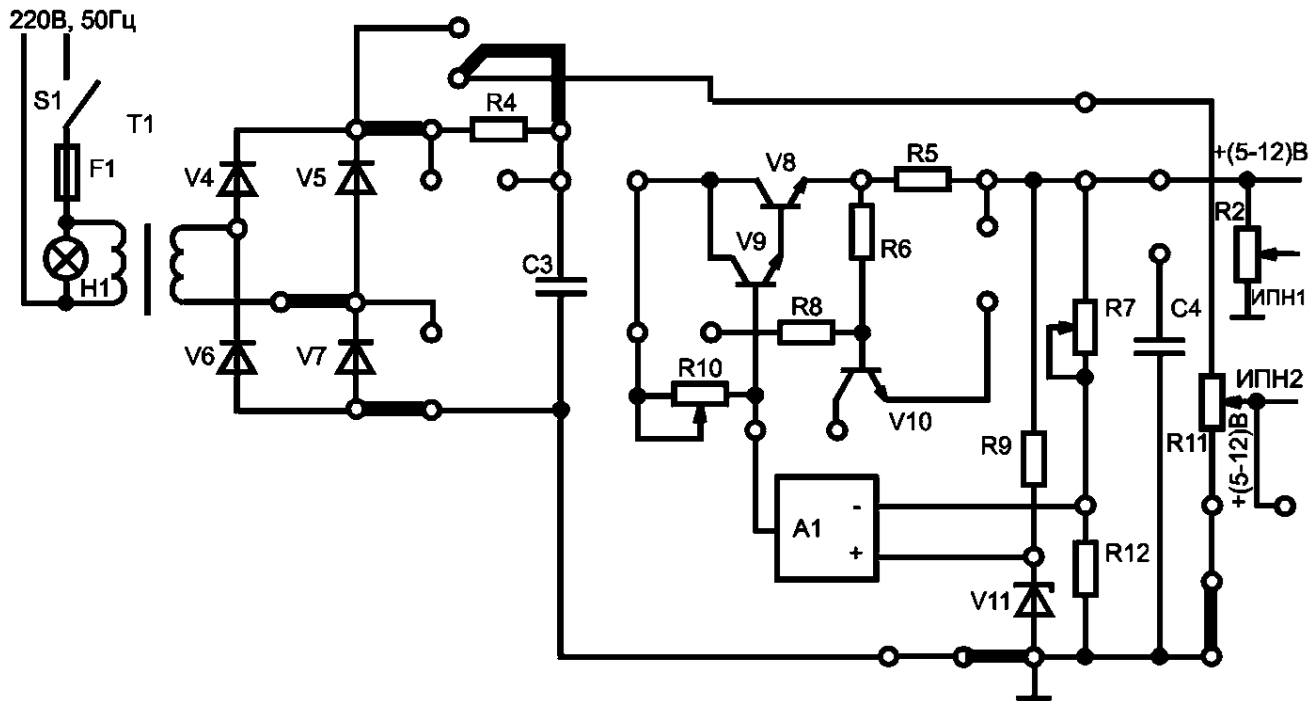


Рис. 24.8. Схемы для исследования пассивных емкостного и RC-фильтров

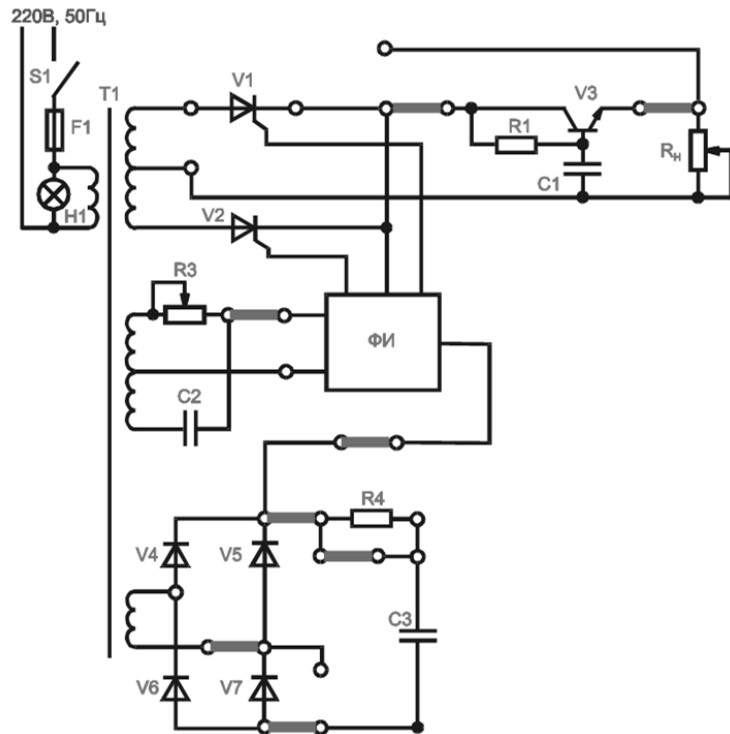


Рис. 24.9. Схемы для исследования активного фильтра

6) Собрать на стенде схему управляемого выпрямителя согласно рисунку 24.7.

7) Подать на схему напряжение, снять и зарисовать для номинального тока нагрузки $I_n = 100$ мА осциллограммы выпрямленного напряжения, напряжения на тиристорах, напряжения на управляющих электродах тиристоров (снимается относительно катодов тиристоров), тока на выходе выпрямителя, тока вторичной и первичной обмоток трансформатора.

Осциллограммы рисовать в соответствии с их временным положением друг относительно друга для номинального значения тока нагрузки.

8) Снять и построить внешние характеристики $U_{cp} = f(I_{cp})$ выпрямителя для заданных преподавателем углов управления, изменяя величину нагрузки сопротивлением R2.

9) Снять и построить регулировочную характеристику $U_{cp} = f(\alpha)$, управляемого выпрямителя для номинального тока нагрузки. Угол управления изменяется резистором R3, а его величина определяется по осциллограмме выходного напряжения с помощью осциллографа.

10) Определить внутреннее сопротивление выпрямителя в номинальном режиме $R_{вых} = \Delta U_{вых} / \Delta I_{вых}$.

11) Собрать схемы для исследования пассивных емкостного и RC-фильтров, представленных на рисунке 24.8.

12) Для номинального тока $I_{ном} = 100$ мА нагрузки снять и построить осциллограммы напряжений на нагрузке без фильтра и с фильтром для обеих схем.

13) Снять и построить зависимость коэффициента сглаживания фильтра от тока нагрузки $K_{сгл} = f(I_{cp})$.

Сравнить рассчитанное и полученное экспериментально значение допустимой силы тока для заданного значения коэффициента сглаживания $K_{сгл}$.

Амплитудное значение выпрямленного напряжения на входе и выходе фильтра определить с помощью осциллографа.

14) Собрать схему активного фильтра, представленную на рисунке 24.9.

15) Снять и построить зависимость коэффициента сглаживания фильтра от тока нагрузки.

Амплитудное значение выпрямленного напряжения на входе и выходе фильтра определить с помощью осциллографа. Зарисовать осциллограмму напряжений на входе и выходе фильтра.

Вопросы для самоконтроля

1. Объясните принцип работы однофазной мостовой схемы выпрямителя и схемы со средней точкой.
2. Что такое внешняя характеристика выпрямителя? От чего зависит ее наклон?
3. Почему максимальное значение тока вентилей выпрямителя различно для разных видов нагрузки при одной и той же мощности в нагрузке?
4. Сравните мостовую схему выпрямителя со схемой со средней точкой.
5. От чего зависит КПД выпрямителя?
6. Объясните принцип работы различных схем фильтров.
7. Как осуществляется выбор конденсатора в емкостном фильтре? Когда применяется емкостной фильтр?
8. Как выбирается дроссель в индуктивном фильтре? Назовите область применения индуктивных фильтров.
9. Что такое критическая индуктивность в сглаживающих LC -фильтрах и как ее определить? Какова ее зависимость от параметров и режима работы схемы?
10. Из каких соображений выбирают сопротивление R_{ϕ} в RC -фильтре?

Лабораторная работа №25

Исследование логических элементов

Цель работы: изучить назначение, устройство и принцип работы основных логических элементов, исследовать их характеристики. Изучить схемы подключения логических элементов и принцип работы схем на логических элементах.

Логические элементы предназначены для выполнения различных логических операций с дискретными сигналами при двоичном способе их представления.

Преимущественное распространение получили логические элементы потенциального типа. В них используются дискретные сигналы, нулевому значению которых соответствует уровень низкого потенциала, а единичному значению – уровень высокого потенциала. Связь потенциального логического элемента с предыдущим и последующим узлами в системе осуществляется непосредственно без применения реактивных компонентов. Благодаря этому преимуществу именно потенциальные логические элементы нашли исключительное применение в интегральном исполнении в виде микросхем. С позиций использования логических микросхем потенциального типа и проводится далее рассмотрение логических элементов.

Алгоритм любой арифметической операции, выполняемой вычислительной техникой в двоичной системе исчисления, может быть сведен к последовательности выполнения некоторых логических операций. Схематично логические операции реализуются на элементах, которые называются логическими.

Логика в общем смысле – это наука о наиболее общих законах и формах мышления, а математическая логика – это наука о применении математических методов для решения различных логических задач.

В вычислительной технике используется главным образом начальный раздел математической логики, называемый исчислением выражений или алгеброй логики.

Под высказыванием (выражением) понимают любое предложение, в отношении которого имеет смысл утверждение о его истинности или ложности. Выражение может быть либо истинным, либо ложным, но не может быть одновременно и тем, и другим.

В алгебре логики принято рассматривать не конкретное содержание выражения, а лишь значение его истинности. Принято обозначение истинности выражения: «1» – истинно, «0» – ложно. Такие результаты чаще называют двоичными переменными.

Результаты бывают простые и сложные. Функциональную зависимость сложного выражения описывают через простые, т.е. (x_1, x_2, \dots, x_n) , где x_i – исходные простые выражения. Объединение простых выражений в сложные производится с помощью логических связей.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся логические связи и соответствующие им сложные выражения.

а) Логическая связь НЕ.

Отрицанием выражения « x » называется такое сложное выражение, которое истинно, когда x ложно, и ложно, когда x истинно.

Запись выражения имеет вид

$$y = f(x) = \bar{x}. \quad (25.1)$$

Условное обозначение схемы приведено на рисунке 25.1.

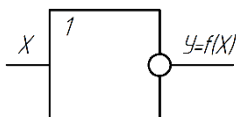


Рис. 25.1. Условное обозначение схемы операции НЕ

Таблица 25.1

Таблица истинности операции НЕ

x	$y = f(x) = \bar{x}$
0	1
1	0

б) Логическая связь (операция) ИЛИ (дизъюнкция).

Дизъюнкцией нескольких простых выражений называют такое сложное выражение, которое ложно тогда, когда ложны все простые выражения.

Запись выражения имеет вид

$$f(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = x_1 \vee x_2. \quad (25.2)$$

Условное обозначение схемы приведено на рисунке 25.2.

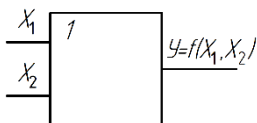


Рис. 25.2. Условное обозначение схемы операции ИЛИ

Таблица 25.2

Таблица истинности операции ИЛИ

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

в) Логическая связь И (конъюнкция).

Конъюнкцией нескольких простых выражений называют такое сложное выражение, которое истинно только тогда, когда истинны все простые выражения.

Математическая запись на примере двух простых выражений имеет вид:

$$f(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2 = x_1 \wedge x_2 = x_1 \& x_2. \quad (25.3)$$

Условное обозначение схемы представлено на рисунке 25.3.

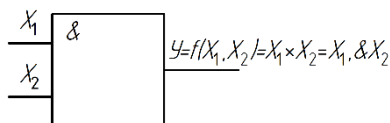


Рис. 25.3. Условное обозначение схемы операции И

Таблица 25.3

Таблица истинности операции И

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

г) Логическая связь ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (сумматор по модулю 2).

Суммированием по модулю 2 нескольких простых выражений называют такое сложное выражение, которое истинно только тогда, когда истинно нечетное число выражений.

Математическая запись на примере двух простых выражений имеет вид:

$$f(x_1, x_2) = x_1 + x_2. \quad (25.4)$$

Условное обозначение схемы представлено на рисунке 25.4.

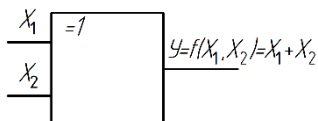


Рис. 25.4. Условное обозначение схемы операции ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

Таблица 25.4

Таблица истинности операции ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

На основе приведенных типовых логических связей (элементов) в цифровых ЭВМ широко применяются серийно выпускаемые промышленностью элементы, обладающие функциональной полнотой на основе интегральных микросхем различных серий.

Используя свойство функциональной полноты, комбинированные логические элементы Пирса и Шеффера позволяют реализовать различные сложные выражения (функции), например, И; ИЛИ; НЕ.

д) Элемент Пирса – двоичный логический элемент, реализующий операцию (сложное выражение) логического сложения с отрицанием (дизъюнкцию с отрицанием).

Математическая запись функции, реализуемой элементом Пирса, имеет вид:

$$y = f(x_1, x_2) = \overline{x_1 + x_2} = \overline{x_1 \vee x_2}. \quad (25.5)$$

Условное обозначение схемы представлено на рисунке 25.5.

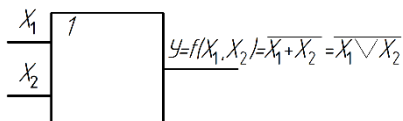


Рис. 25.5. Условное обозначение схемы операции, реализуемой элементом Пирса

Таблица 25.5

Таблица истинности операции, реализуемой элементом Пирса

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

На основе элементов Пирса можно реализовать:

а) логическую связь И; б) логическую связь НЕ; в) логическую связь ИЛИ.

е) Элемент Шеффера – двоичный логический элемент, реализующий операцию логического умножения с отрицанием.

Сложное выражение представляет собой «1» (истинно) на выходе элемента, которая имеет место всегда, кроме случая, когда простые выражения имеют «1» на всех входах элемента.

Математическая запись функции, реализуемой элементом Шеффера, имеет вид:

$$y = f(x_1, x_2) = \overline{x_1 \cdot x_2} = \overline{x_1 \wedge x_2}. \quad (25.6)$$

Условное обозначение схемы представлено на рисунке 25.6.

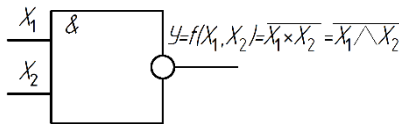


Рис. 25.6. Условное обозначение схемы операции, реализуемой элементом Шеффера

Таблица 25.6

Таблица истинности операции, реализуемой элементом Шеффера

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

На основе элементов Шеффера можно реализовать логические связи НЕ, ИЛИ, И по аналогии реализации логических связей на элементах Пирса. По таблицам истинности сложных выражений с помощью аппарата алгебры логики, можно составить совершенные нормальные логические функции.

Например, $f(x_1, x_2 \dots x_n)$ – произвольная логическая функция n аргументов. Промоделируем все возможные наборы значений аргументов x . Таких наборов будет 2^n . Обозначим их через $A_0, A_1 \dots A_i$, тогда $f(x_1, x_2 \dots x_n) = f(A_i)$.

Функцию $\theta(x_1, x_2 \dots x_n) = \theta_i(A_i)$, равную единице для набора A_i и нулю для всех остальных наборов, называют *конституантой* единицы.

В алгебре логики доказывается, что любая функция $f(A_i)$ может быть представлена логической суммой конституант единицы, составленной для тех наборов A_i , для которых $f(A_i) = 1$. Логическую сумму конституант единицы, полученную по указанному правилу, называют совершенной дизъюнктивной нормальной формой функции (СДНФ).

Для получения конституанты единицы некоторого набора необходимо логически перемножить все переменные данного набора, причем переменные, соответствующие нулям в наборе, в выражении конституанты единицы входят с отрицанием.

Рассмотрим пример составления СДНФ. Пусть функция $f(x_1, x_2)$ задана таблицей истинности (табл. 25.7), случай сумматора по модулю два

$$f(x_1, x_2) = x_1 \oplus x_2. \quad (25.7)$$

Функция $f(x_1, x_2) = 1$ для наборов 2 и 3. Конституанты единицы для наборов $Q_2 = x_1 \cdot \bar{x}_2$, $Q_3 = x_2 \cdot \bar{x}_1$, тогда СДНФ будет:

$$f(x_1, x_2) = x_1 \cdot \bar{x}_2 + x_2 \cdot \bar{x}_1. \quad (25.8)$$

Таблица 25.7

Таблица истинности функции

№ набора	x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
1	0	0	0
2	1	0	1
3	0	1	1
4	1	1	0

В алгебре логики доказывается также, что любая логическая функция может быть представлена совершенной конъюнктивной нормальной формой (СКНФ), которая получается логическим умножением конституант нуля для тех наборов A_i , для которых $f(x_1, x_2 \dots x_n) = 0$.

Для получения конъюнкты нуля некоторого набора необходимо сложить все переменные ее набора, причем переменные, соответствующие единицам в наборе, в выражение конъюнкты нуля входят с отрицанием.

По данным таблицы истинности предыдущего примера составим СКНФ.

Из таблицы 25.7 видно, что $f(x_1, x_2) = 0$ для наборов 1 и 4. Конъюнкты нуля для этих наборов $Q_1 = x_1 + x_2$, $Q_4 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$, тогда СКНФ функции:

$$f(x_1, x_2) = (x_1 + x_2)(\bar{x}_1 + \bar{x}_2). \quad (25.9)$$

Таким образом, любая логическая функция может быть представлена либо функцией СДНФ, либо функцией СКНФ. Для их получения требуется использование логических связей трех типов: НЕ, И, ИЛИ. Эти связи образуют функционально полную систему логических связей.

Количество конъюнкты, образующих совершенную нормальную функцию, определяет форму функциональной зависимости.

Задание. Изучить устройство, назначение, схемы и функциональные характеристики основных логических элементов. Провести исследования логических элементов и составить их таблицы истинности. Зарисовать и проанализировать осциллограммы входных и выходных сигналов на исследуемых элементах.

Порядок выполнения работы.

- 1) Собрать схему в соответствии с рисунком 25.7.
- 2) Для логических элементов НЕ, И, И-НЕ, схемы которых представлены на рисунке 25.7, практически проверить правильность составленных ранее таблиц истинности и временных диаграмм. Для подачи на вход логического элемента уровня логической единицы «1» необходимо подключить соответствующий вход через сопротивления R76, R79, R72 либо R73 к источнику питания «+5В». Для подачи на вход ЛЭ уровня логического нуля «0» необходимо этот вход подключить к общему проводу. Выходной сигнал логического элемента регистрируется осциллографом и светодиодами Н1 и Н2.

3) Подав на один из входов логического элемента И, а затем на И-НЕ прямоугольные импульсы от генератора ГС2, зарисовать осциллограммы на выходе при уровне на втором входе «0» и «1».

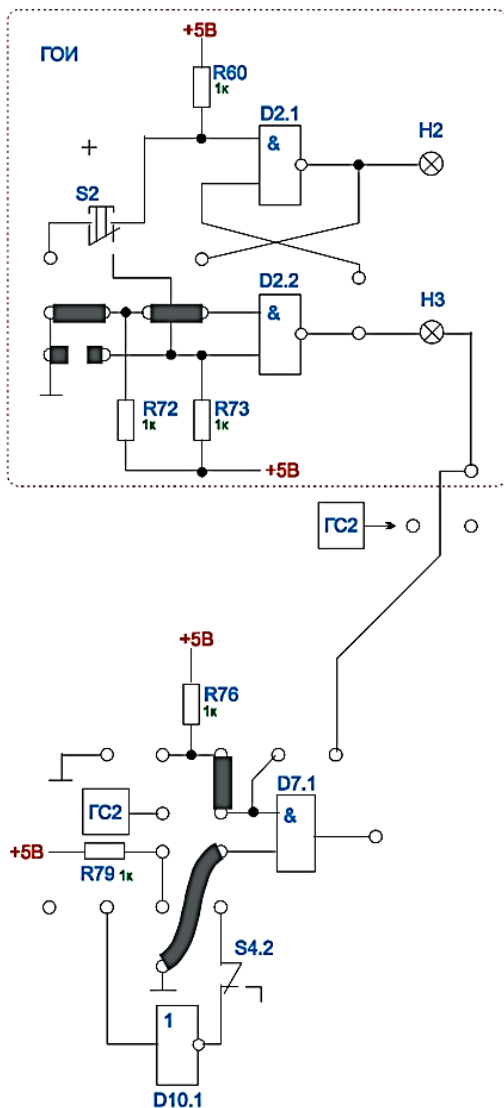


Рис. 25.7. Схема для исследования логических элементов

4) По результатам исследования составить таблицу истинности для каждого устройства.

5) Пояснить полученные осциллограммы.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислить все имеющиеся в микропроцессорной технике основные логические элементы.

2. Изобразить условные обозначения основных логических элементов и их таблицы истинности.

3. Показать, как правильно осуществлять наборы значений аргументов в логических функциях 3, 4, 5-ти аргументов.

4. Объяснить правила составления СДНФ и СКНФ по имеющимся таблицам истинности.

5. Перечислить основные законы алгебры логики.

6. Привести примеры устройств, выполняющих логические функции ИЛИ, И, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ в области электротехники.

7. Используя элементы Шеффера, составить схемы, реализующие логические операции И, ИЛИ, НЕ.

Лабораторная работа №26

Исследование транзисторного реле с времязадающей RC-цепью

Цель работы: изучить схему, назначение, устройство и принцип действия электронного реле времени на биполярном транзисторе. Исследовать временные характеристики реле, при изменении сопротивления базы и эмиттера.

Электронное реле времени – это устройство релейного типа с нормируемым временем срабатывания или отпускания реле после подачи или снятия входного управляющего сигнала. В электронном реле времени на биполярных транзисторах (VT3, VT4) типа *N-P-N* задаваемая выдержка времени создается за счет переходного процесса, возникающего при заряде предварительно разряженного конденсатора C12, через регулируемый резистор R1. Изменением сопротивления R1 можно регулировать длительность переходного процесса и, следовательно, время срабатывания реле времени. При срабатывании электромагнитного реле KV (электромагнитное реле РЭС-9 с переключающими контактами KV), после подачи управляющего сигнала (включение питания тумблером SA8), возникает переходный процесс, по окончании которого срабатывает транзисторное реле.

Электронный секундомер определяет установленную выдержку времени, а лампа HL4 сигнализирует о срабатывании реле. Конденсатор C12 емкостью 200 мкФ и резистор R1 соединены с базой транзистора VT3, опыты проводятся при различных значениях сопротивления резистора R1.

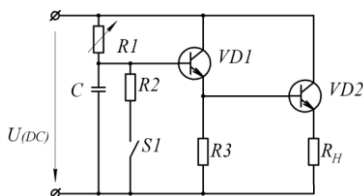


Рис. 26.1. Принципиальная схема транзисторного реле с времязадающей RC-цепью

Задание. Изучить назначение, устройство, принцип действия и характеристики электронного реле времени. Провести

исследование времени срабатывания реле в зависимости от сопротивления в цепи базы транзистора или цепи эмиттера. Исследовать временные характеристики и проанализировать их. На основе результатов анализа сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

Исследование параметров транзисторного реле времени на биполярном транзисторе проводится по схеме, представленной на рисунке 26.2, в которую входят биполярные транзисторы КТ315Г типа *N-P-N*.

1) Собрать схему подключения, представленную на рисунке 26.2, поставив рукоятки переключения резистора R1 в нулевое положение.

2) Включить стенд и, изменяя величину сопротивления R1 и переключателя SA10, снять характеристики электронного реле времени. Полученные данные занести в таблицу 26.1.

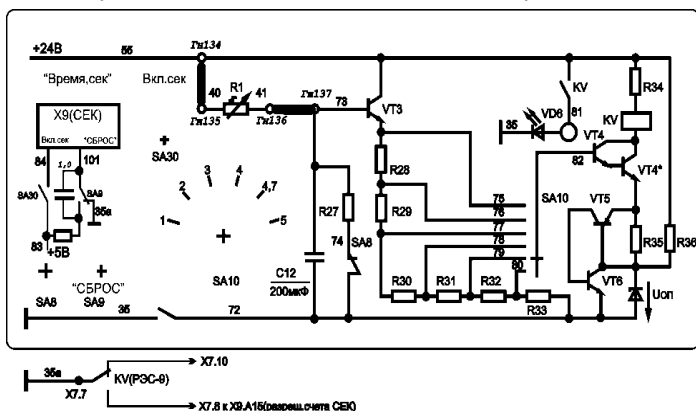


Рис. 26.2. Схема подключения исследуемого реле времени

Вопросы для самоконтроля

1. В чем назначение *RC*-цепи в составе реле времени?
2. Поясните принцип работы электронного реле времени на биполярном транзисторе.
3. Возможно ли вместо конденсатора использовать катушку индуктивности? Пояснить ответ.
4. Каково назначение транзисторов в исследуемой схеме транзисторно-реле?
5. Как изменится время срабатывания исследуемого реле при увеличении емкости конденсатора C12?

Лабораторная работа №27

Исследование триггеров на логических элементах

Цель работы: изучить устройство, назначение, принцип действия, схемы подключения и основные характеристики асинхронного и тактируемого R - S -триггеров и счетного T -триггера, собранных на логических элементах.

R - S -триггеры. Триггером называется устройство, имеющее два устойчивых состояния. При отсутствии внешних воздействий триггер может сколько угодно долго находиться в одном из устойчивых состояний.

По функциональному признаку различают триггеры типов R - S , D , T , J - K и др. По способу управления триггеры подразделяют на асинхронные и тактируемые. В асинхронных триггерах переключение из одного состояния в другое осуществляется непосредственно с поступлением сигнала на информационный вход. В тактируемых триггерах помимо информационных входов имеется вход тактовых импульсов. Их переключение производится только при наличии разрешающего импульса.

Триггеры применяют при построении сложных функциональных устройств: счетчиков импульсов, регистров и т.д.

Асинхронные R - S -триггеры являются простейшими, однако они получили широкое распространение в цифровой технике. В частности, они служат основой триггеров других типов и требуют для своего построения два двухвходовых логических элемента типа И-НЕ или ИЛИ-НЕ.

На рисунке 27.1а приведена структурная схема асинхронного R - S -триггера на логических элементах И-НЕ. Схема имеет два выхода: Q – прямой, \bar{Q} – инверсный.

По информационному входу S производится установка триггера в состояние логической единицы «1», по входу R – установка (перевод) триггера в исходное состояние логического нуля «0». Этому соответствуют сокращенные обозначения входов и названия триггера: S – set (установка), R – reset (возвращение в исходное состояние).

Принцип действия R - S -триггера иллюстрируется таблицей переходов триггера (табл. 27.1), где указаны значения входных сигналов S и R в некоторый момент времени t_n и состояние триггера в следующий момент времени (t_{n+1}) после прихода очередных импульсов.

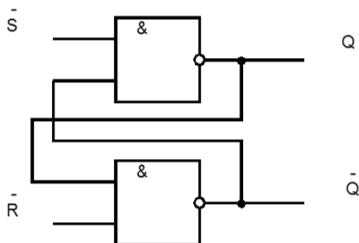


Рис. 27.1. Структурная схема асинхронного R - S -триггера

Таблица 27.1

Таблица переходов асинхронного R - S -триггера

t_n		$t_n + 1$
\bar{S}	\bar{R}	Q_{n+1}
0	0	1
1	0	0
1	1	Q_n
0	1	X

На рисунке 27.2 приведена структурная схема и временные диаграммы тактируемого R - S -триггера на элементах И-НЕ. Переключения в тактируемом триггере возможны лишь при наличии разрешающего сигнала (импульса тактов), подаваемого на вход T . Эта особенность схемы связана с применением на входах асинхронного R - S -триггера двух управляющих элементов И-НЕ.

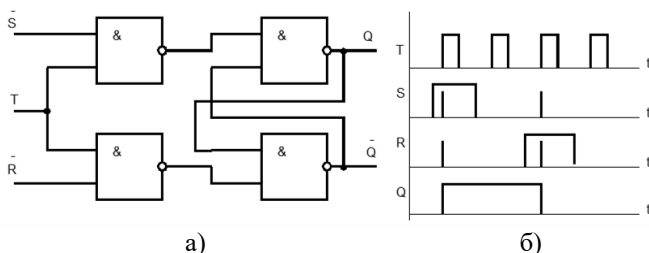


Рис. 27.2. Структурная схема и временные диаграммы тактируемого R - S -триггера:

а – структурная схема; б – временные диаграммы

D-триггер. *D*-триггеры имеют один информационный вход. Состоянию логической «1» соответствует наличие сигнала на входе триггера, а состоянию логического «0» – нулевой уровень входного сигнала.

На практике наибольшее применение получили тактируемые *D*-триггеры. Их обозначение обусловлено свойством сохранять состояние логической «1» после снятия входного сигнала до прихода очередного тактового импульса (delay – задержка).

На рисунке 27.3 приведена структурная схема и временные диаграммы одноканального *D*-триггера, выполненного на основе асинхронного *R-S*-триггера с элементами И-НЕ.

T-триггер. Характерным свойством *T*-триггера является его переключение в противоположное состояние с приходом каждого очередного входного импульса. Ввиду широкого применения в счетчиках импульсов его часто называют триггером со счетным запуском.

Триггеры *T*-типа выполняются на базе двух асинхронных *R-S*-триггеров (*M-S*-схема), один из которых называют основным (master – основной), а другой – вспомогательным (slave – вспомогательный). Триггеры ОТ и ВТ приведены на рисунке 27.4. На рисунке 27.5 приведены временные диаграммы работы *D*-триггера.

Последовательность переключения асинхронных *R-S*-триггеров, входящих в *T*-триггер, следующая: на этапе фронта входного импульса переключается основной триггер, а по окончании длительности $t_{и}$ импульса (на этапе среза) – вспомогательный триггер. Указанная особенность отражается в другом названии схемы – триггер с внутренней задержкой.

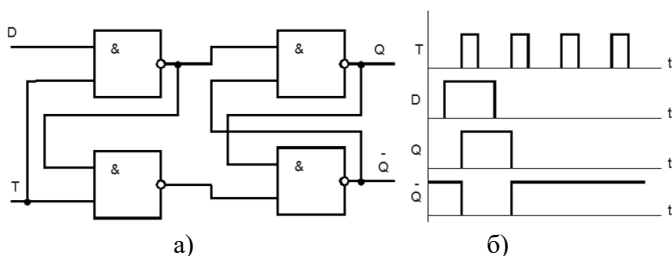


Рис. 27.3. Структурная схема и временные диаграммы одноканального *D*-триггера:

а – структурная схема; б – временные диаграммы

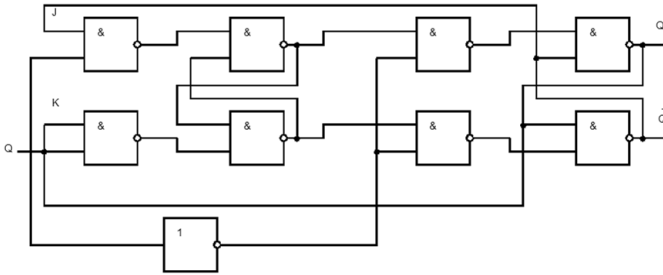


Рис. 27.4. Структурная схема T-триггера

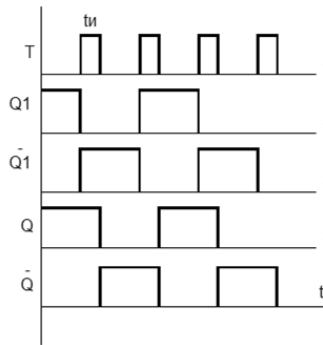


Рис. 27.5. Временные диаграммы работы T-триггера

Задание. Изучить структурные и функциональные схемы триггеров, их устройство и принцип действия. Провести исследования триггеров и зарисовать полученные осциллограммы. Провести анализ полученных результатов исследований и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

1) Исследовать схему асинхронного R-S-триггера на логических элементах И-НЕ, представленную на рисунке 27.6.

Составить таблицу истинности и снять временные диаграммы. Подача управляющих сигналов на S-вход осуществляется с помощью кнопки S2, а на R-вход – подключением этого входа к шине питания либо к общему проводу. Состояние выходов триггера регистрируется по индикаторам Н2 и Н3. Данную схему (с кнопкой S2) можно рассматривать как генератор одиночных импульсов ГОИ.

2) Исследовать схему синхронного R-S-триггера, представленную на рисунке 27.7. Составить таблицу истинности

и зарисовать временные диаграммы (осциллограммы) для него при подаче на тактируемый вход T одиночных импульсов от генератора ГОИ и прямоугольных импульсов от ГС2.

3) Исследовать счетный T -триггер, схема которого представлена на рисунке 27.8. Для этого выполнить действия, аналогичные пункту 2.

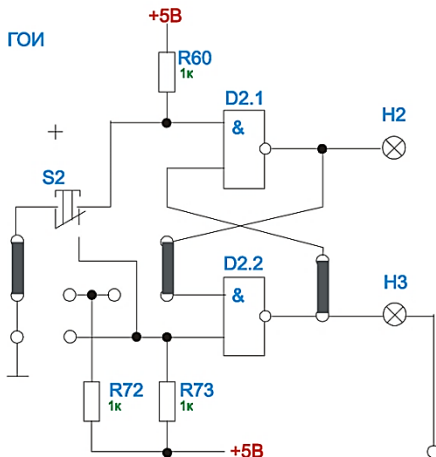


Рис. 27.6. Схема подключения асинхронного R - S -триггера (ГОИ) на логических элементах И-НЕ

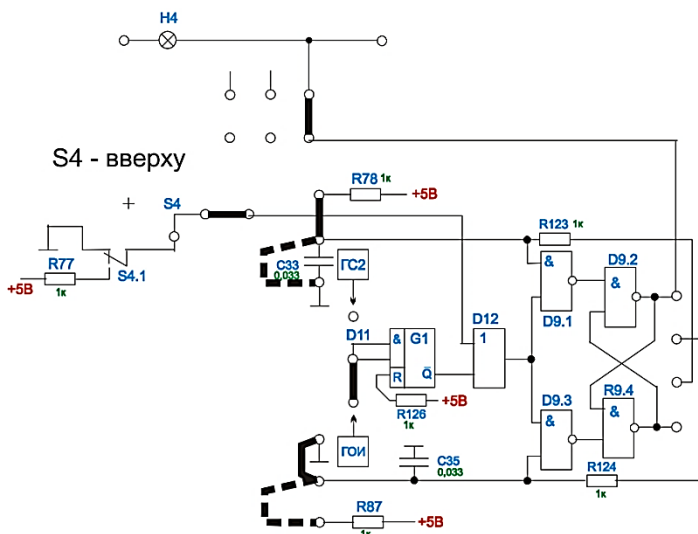


Рис. 27.7. Схема подключения синхронного R - S -триггера

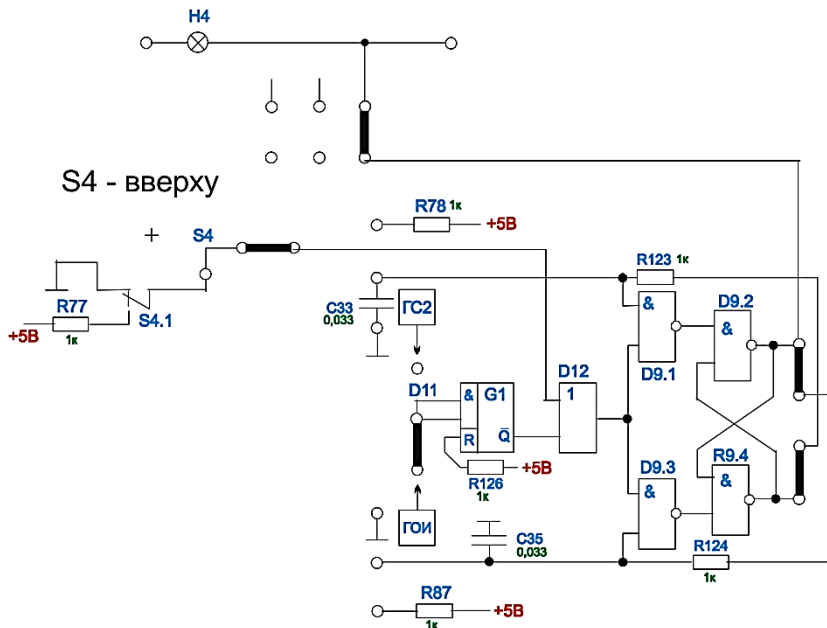


Рис. 27.8. Схема подключения счетного Т-триггера

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислить основные разновидности триггеров, выполненных на ЛЭ.
2. Привести классификацию входов триггеров и их назначение.
3. Области применения различных разновидностей триггеров.
4. В чем различие триггеров на элементах И-НЕ от триггеров на элементах ИЛИ-НЕ?
5. За счет чего образуется внутренняя задержка Т-триггера?

Лабораторная работа №28

Исследование широтно-импульсного преобразователя напряжения

Цель работы: изучить назначение, устройство, схему подключения и принцип действия широтно-импульсного преобразователя (ШИП) напряжения. Исследовать характеристики и режимы работы ШИП.

Передача и преобразование сигналов лежит в основе систем связи, контроля, регулирования и управления. По способу формирования сигнала управления или способу передачи информации ШИП можно подразделить на непрерывные и дискретные. Принципиальная схема ШИП приведена на рисунке 28.1.

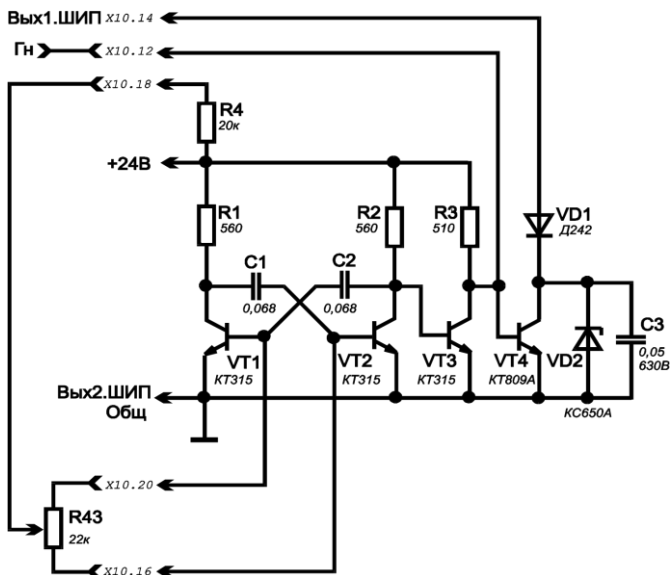


Рис. 28.1. Принципиальная схема ШИП

Системы с широтно-импульсной модуляцией являются разновидностью дискретных систем. При этом способе модуляции период T и амплитуда A_n – неизменные, а длительность импульса $\gamma \cdot T$ изменяется в соответствии с каким-либо законом. Величину γ называют скважностью импульсов (рис. 28.2).

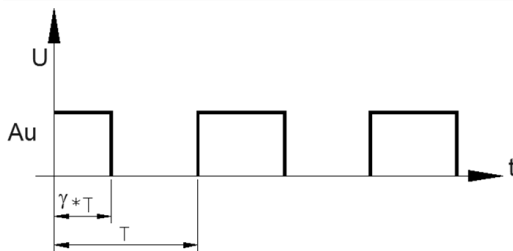


Рис. 28.2. График скважности импульсов

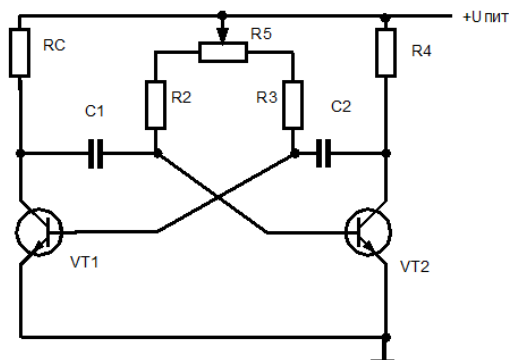


Рис. 28.3. Генератор импульсов с регулируемой скважностью

В качестве широтно-импульсного модулятора в данной работе используется генератор сигналов с регулируемой скважностью, его упрощенная схема изображена на рисунке 28.3.

В основу генератора положен мультивибратор с базовыми задающими RC -цепями. Период следования выходного импульсного сигнала определяется выражением

$$T = 0,7 \cdot C (R_{61} + R_{62}), \text{ с}, \quad (28.1)$$

где $C = C_1 + C_2$ – коэффициент, зависящий от характеристик схемы;

$R_{61} + R_{62}$ – общее сопротивление резисторов в цепи базы обоих транзисторов.

Так как общее базовое сопротивление определяется суммой сопротивлений резисторов R_2 , R_5 и R_3 , то переменным резистором R_5 можно менять длительность открытого состояния каждого транзистора.

Задание. Изучить схему ШИП и генератора импульсов, принцип работы и назначение устройства, его характеристики. Исследовать временные характеристики ШИП, определить его скважность. Исследовать изменение данных характеристик от угла открытия транзисторов. Зарисовать и проанализировать осциллограммы на выходе ШИП.

Порядок выполнения работы.

На рабочей панели стенда исследуемый ШИП изображен как функциональный блок с одноименным обозначением с вынесенным отдельно силовым регулирующим транзистором VT7 и контрольным гнездом для снятия осциллограммы управляющего сигнала на его базе, подключенной к остальной схеме ШИП через резистор R47. Для снятия осциллограммы управляющего сигнала на базе силового транзистора VT7 достаточно при работающем стенде включить тумблер SA19 «Вкл. ШИП» (рис. 28.4).

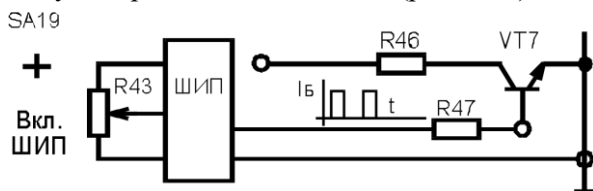


Рис. 28.4. Схема ШИП на лабораторном стенде

В работе исследуется ШИП напряжения путем наблюдения и измерения длительности периода сигнала на базе транзистора при изменении преобразуемого напряжения резистором R43, регулирующим ток якоря генератора, являющегося нагрузкой ($I_{я}$).

Для наблюдения сигналов используется осциллограф.

1) Изучить схемы, приведенные на рисунках 28.1 по 28.5 и, используя параметры элементов, рассчитать частоту импульсов генератора.

2) Снять осциллограммы напряжений на базе транзистора VT7 для двух положений движка потенциометра $R_{43} = 22 \text{ кОм}$. Определить скважность выходного сигнала. Снять регулировочную характеристику ШИП: зависимость скважности от угла поворота рукоятки потенциометра R43 (между соседними рисками регулятора 30°). Результаты эксперимента занести в таблицу 28.1.

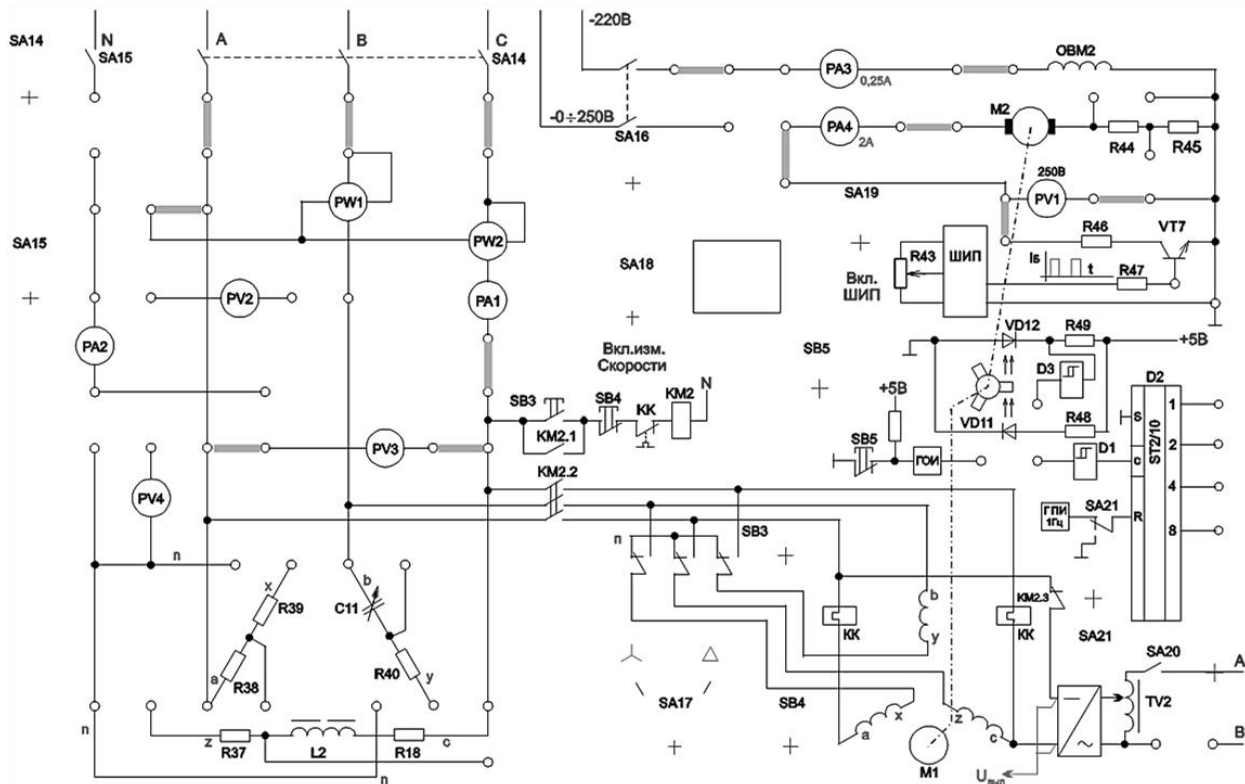


Рис. 28.5. Схема подключения лабораторной установки

3) При исследовании работы ШИП для регулирования тока в якоре генератора М2 собирают схему, представленную на рисунке 28.5. Запустить асинхронный электродвигатель М1 при положении переключателя SA17 в положении «1». Включить питание обмотки возбуждения М2 тумблером SA16. При минимальном «min» положении R_{43} включить ШИП тумблером «Вкл.ШИП» SA19. Плавно регулируя ток нагрузки, снять внешнюю характеристику ШИП – зависимость тока нагрузки от угла поворота $I_n = f(\beta)$. Результаты эксперимента занести в таблицу 28.2. Параметры ШИП для расчета: $f = 3,9...4,0$ кГц; $R_{61} + R_{62} 22$ кОм; $C_1 + C_2 = C - 0,016$ мкФ.

Таблица 28.1

Результаты исследования регулировочной характеристики ШИП

Установлено										
Угол поворота $\beta, ^\circ C$										
Измерено										
$\gamma T, c$										
Рассчитано										
Скважность γ										

Таблица 28.2

Результаты исследования внешней характеристики ШИП

Установлено										
Угол поворота $\beta, ^\circ$	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270
Измерено										
Ток нагрузки I_n, A										
Ток в цепи ШИП $I_{ШИП}, A$										
$U_{я}, B$										
$U_{л}, B$										
$I_{л}, A$										
P, Bt										

Вопросы для самоконтроля

1. Каково назначение ШИП?
2. ШИП каких видов вы знаете?
3. Дать определение понятию скважность?
4. Что такое модулятор?
5. Какое устройство лежит в основе модулятора?

Лабораторная работа №29

Исследование операционного усилителя и вычислительных схем на его основе

Цель работы: изучить устройство, назначение, принцип работы, основные параметры и характеристики операционного усилителя (ОУ). Исследовать схемы включения ОУ.

Исследуемый усилитель называется операционным потому, что он может использоваться для выполнения различных математических операций над сигналами: алгебраического сложения, вычитания, умножения на постоянный коэффициент, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования и т.д. Современный ОУ выполняется на базе интегральной микросхемы операционного усилителя, к выводам которой присоединяются источники питания, входных сигналов, сопротивление нагрузки, цепи обратной связи (ОС), коррекции частотных характеристик ОУ и другие цепи.

ОУ – это усилитель постоянного тока, имеющий большой коэффициент усиления по напряжению. Для получения возможности усиливать разнополярные сигналы ОУ запитывают, обычно симметричным, двухполярным источником питания.

На рисунке 29.1 показано условное обозначение ОУ с одним выходом и двумя входами: прямым и инверсным. Инверсный вход обозначают знаком инверсии (кружком) или помечают знаком «-». Прямой вход не имеет знака инверсии или его помечают знаком «+».

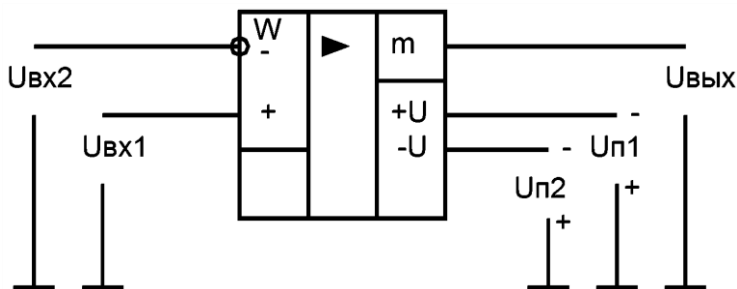


Рис. 29.1. Принципиальная структурная схема ОУ с одним выходом

В общем случае на входные выходы ОУ подаются либо синфазный либо дифференциальный сигналы:

$$U_{\text{сф}} = (U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}})/2, \quad (29.1)$$

$$U_{\text{диф}} = (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}). \quad (29.2)$$

ОУ предназначен для усиления небольшого разностного (дифференциального) сигнала. Синфазный сигнал схемой ОУ должен быть максимально ослаблен. Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ находится в фазе (синфазно) с напряжением на входе «+» $U_{\text{вх1}}$ и противофазно напряжению на входе «-» $U_{\text{вх2}}$.

На рисунке 29.2 приведены амплитудные характеристики ОУ.

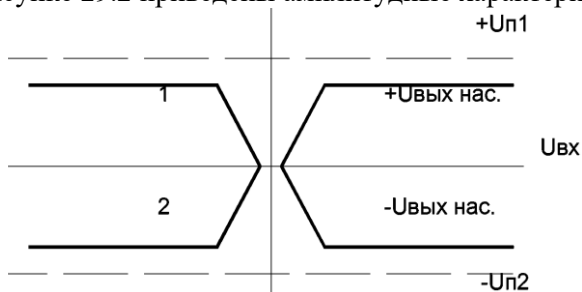


Рис. 29.2. Амплитудные характеристики ОУ

Инвертирующий усилитель. В этой схеме входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ, а его неинвертирующий вход заземлен (рис. 29.3).

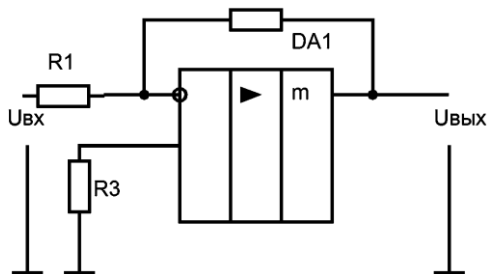


Рис. 29.3. Принципиальная структурная схема инвертирующего усилителя

Усилитель называется инвертирующим, так как выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ инвертировано по отношению к выходному

напряжению $U_{вх}$. Отрицательная обратная связь создается с помощью резисторов R2, R1 (параллельная ООС по напряжению).

Коэффициент усиления напряжения схемой инвертирующего ОУ определяется выражением:

$$K_u = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (29.3)$$

Если $R_2 = R_1$, то $K_u = -1$ и ОУ становится инвертирующим повторителем напряжения, у которого $U_{вых} = -U_{вх}$. Входное сопротивление инвертирующего ОУ $R_{вх} = R_1$, а выходное сопротивление

$$R_{вых} = \frac{R_{выхОУ}}{\left(1 + \frac{K_{ОУ}}{K_u}\right)}, \text{ Ом.} \quad (29.4)$$

Для компенсации различия входных токов в схему введен резистор R_3 , сопротивление которого равно

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2)}, \text{ Ом.} \quad (29.5)$$

Неинвертирующий усилитель. В этой схеме (рис. 29.4) входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ, а на его инвертирующий вход с помощью делителя выходного напряжения, выполненного на резисторах R1, R2, подается напряжение ООС.

$$U_{ООС} = \frac{U_{вых} \cdot R_2}{(R_1 + R_2)}, \text{ В.} \quad (29.6)$$

В схеме действует последовательная ООС по напряжению.

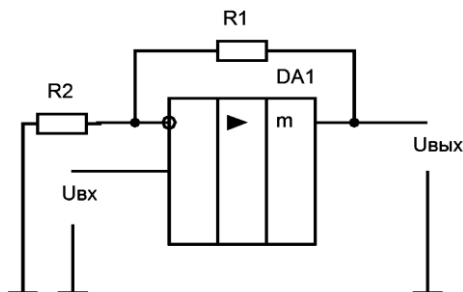


Рис. 29.4. Принципиальная структурная схема неинвертирующего усилителя

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

$$K_u = 1 + \frac{R_1}{R_2}. \quad (29.7)$$

Входное сопротивление неинвертирующего усилителя

$$R_{\text{ВХ}} = R_{\text{ВХ ОУ}} \left(1 + \frac{K_{\text{ОУ}}}{K_u} \right), \text{ Ом}, \quad (29.8)$$

а выходное сопротивление

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{ВЫХ ОУ}} \left(1 + \frac{K_{\text{ОУ}}}{K_u} \right), \text{ Ом}. \quad (29.9)$$

При выполнении условия $R_1 = 0 \text{ Ом}$, $R_2 = \infty \text{ Ом}$, ОУ будет выполнять функцию практически идеального повторителя напряжения, у которого $K_u = 1$, а $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$.

Задание. Изучить принцип работы, параметры, характеристики, схемы включения и возможности применения ОУ. Определить входное, выходное сопротивления и коэффициент усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителей для заданных преподавателем значений параметров исследуемых схем. Нарисовать схемы исследуемых усилителей.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схемы двух источников питания и генератора синусоидальных колебаний. Выставить заданное преподавателем напряжение питания схем усилителей.

2) Собрать схему инвертирующего усилителя, представленную на рисунке 29.5.

3) Подать на вход усилителя постоянное напряжение не более 1 В от источника ИПН1 (выходное напряжение ИПН1 регулируется резистором R2). Замерить с помощью цифрового вольтметра выходное напряжение и рассчитать коэффициент усиления схемы.

4) Снять и построить амплитудную характеристику усилителя, изменяя напряжение источника ИПН1 от 0 до $U_{\text{ВХ max}}$ при котором усилитель входит в насыщение. Определить значение $U_{\text{ВЫХ нас}}$ исследуемого ОУ. Входное и выходное напряжения замеряются цифровым вольтметром.

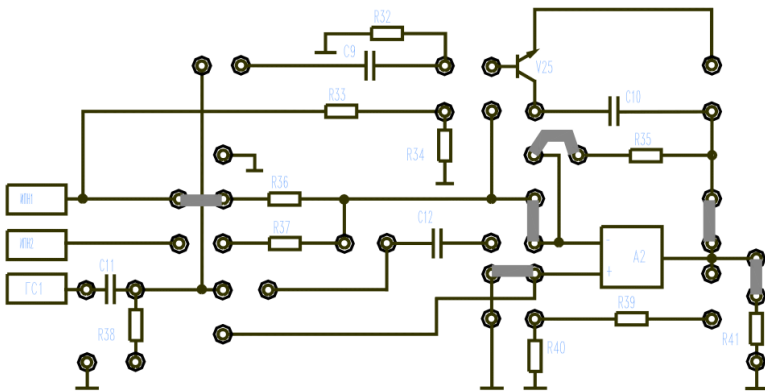


Рис. 29.5. Схема для сборки инвертирующего усилителя

5) Подать на вход усилителя синусоидальный сигнал частотой $f = 1\text{кГц}$ и амплитудой не более 1 В от генератора ГС1. Зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений.

6) Подать на вход усилителя сигнал с амплитудой более $U_{\text{вх max}}$ и зарисовать осциллограмму выходного напряжения. Пояснить полученный результат.

7) Снять и построить амплитудно-частотную характеристику усилителя при $U_{\text{вх}} = 1\text{В}$, изменяя частоту входного сигнала от 200 Гц до 200 кГц (для построения АЧХ в диапазоне от 200 кГц до 2 МГц использовать внешний генератор).

8) Собрать схему неинвертирующего усилителя, представленную на рисунке 29.6.

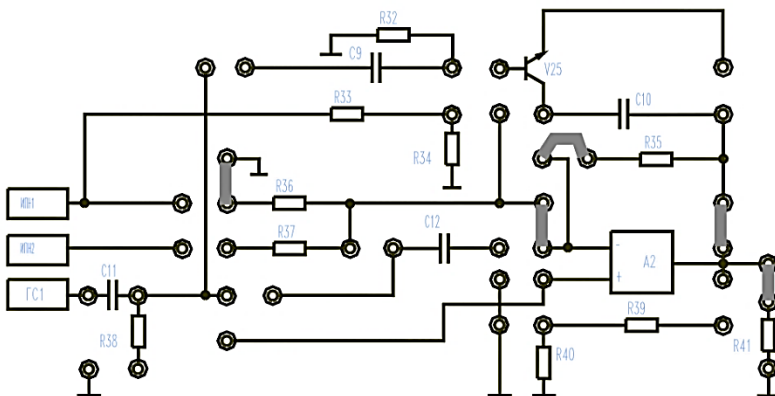


Рис. 29.6. Схема для сборки неинвертирующего усилителя

9) Для исследования данной схемы усилителя выполнить указания пунктов 3-7.

10) Сравнить результаты практического исследования схем на ОУ с теоретическими, сделать вывод.

Вопросы для самоконтроля

1. Охарактеризуйте назначение, параметры, характеристики и особенности применения ОУ.

2. Сравните схемы усилителей на ОУ по основным параметрам.

3. Охарактеризуйте неинвертирующий и инвертирующий повторители напряжения и приведите их схемную реализацию.

4. Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику ОУ и поясните ее.

5. Как осуществляется и для чего предназначена коррекция частотных характеристик ОУ?

Лабораторная работа №30

Исследование компаратора, триггера Шмидта и цифровых счётчиков в интегральном исполнении

Цель работы: изучить устройство, назначение, структурные схемы, схемы подключения и принципы действия компаратора, цифровых счетчиков и триггера Шмидта.

Компаратор предназначен для сравнения аналоговых напряжений, одно из которых является входным (измеряемым) $U_{вх}$, а другое – опорным (задающим) $U_{оп}$. В момент равенства мгновенных значений входных сигналов напряжение на выходе компаратора резко изменяется. Кроме функций сравнения, компаратор осуществляет формирование выходных сигналов в виде двух дискретных уровней, один из которых соответствует логической «1», а другой – логическому «0».

Схема простейшего компаратора для сравнения однополярных сигналов приведена на рисунке 30.1.

В нее входит операционный усилитель (ОУ) с цепями питания и коррекции. Схема не содержит обратных связей. Выходное напряжение компаратора равно

$$U_{вых} = K_{и\ ОУ} \cdot (U_{оп} - U_{вх}), \text{ В.} \quad (30.1)$$

Так как $K_{и\ ОУ}$ велик, а ООС отсутствует, то оно принимает одно из двух дискретных значений $+U_{нас}$ или $-U_{нас}$. При $U_{оп} > U_{вх}$, а $U_{оп}$ поступает на неинвертирующий вход ОУ, то достаточно даже незначительной разности входных сигналов ($U_{оп} - U_{вх}$), чтобы $U_{вых}$ приняло значение $+U_{нас}$. При $U_{оп} < U_{вх}$ выходное напряжение принимает значение $-U_{нас}$.

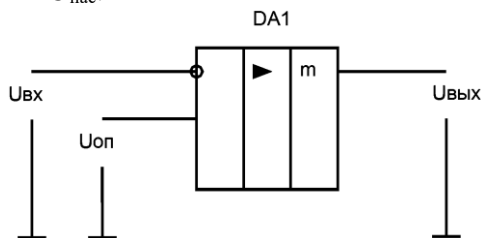


Рис. 30.1. Структурная схема простейшего компаратора

На рисунке 30.2 изображены характеристики $U_{\text{ВЫХ}} = f(t)$ реального (сплошной линией) и идеального (пунктирной линией) компаратора. Из характеристики видно, что реальный компаратор переключается с некоторым запаздыванием и процесс переключения занимает некоторое конечное время.

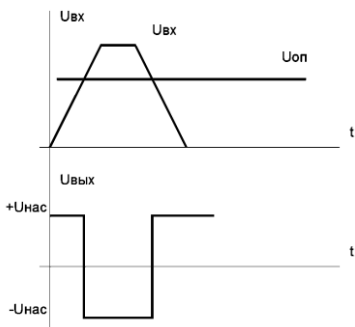


Рис. 30.2. Временные характеристики компаратора

Рассмотренная схема обладает низкой помехоустойчивостью, так как компаратор может ложно переключиться под действием помехи с малым напряжением, наложенной на полезный сигнал. Это явление получило название «дребезга компаратора». Особенно это явление проявляется при малой скорости изменения входного сигнала. Для повышения помехоустойчивости работы в схему компаратора вводят положительную обратную связь.

Компараторы на ОУ позволяют сравнивать сигналы с порогом чувствительности, равным десяткам микровольт, при времени переключения порядка единиц микросекунд. Специализированные интегральные компараторы имеют несколько худший порог чувствительности (порядка сотен микровольт) при меньшем времени переключения (порядка сотен наносекунд).

Триггер Шмидта. Более высокой помехоустойчивостью обладает компаратор, в который введена положительная ОС на резисторах R_2 и R_3 (рис. 30.3). Такая схема известна под названием триггера Шмидта. В этой схеме напряжение на неинвертирующем входе ОУ

$$U_{\text{ВХ}} = U_{\text{оп}} + U_{\text{ос}}, \quad (30.2)$$

В свою очередь

$$U_{\text{ос}} = \frac{(U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{оп}})R_2}{(R_2 + R_3)}, \quad \text{В.} \quad (30.3)$$

За счет действия ПОС напряжение срабатывания $U_{\text{сраб}}$ компаратора становится большим на величину $\Delta U = U_{\text{ос}}$, т.е.

$$U_{\text{сраб}} = U_{\text{вх}} + \Delta U, \text{ В.} \quad (30.4)$$

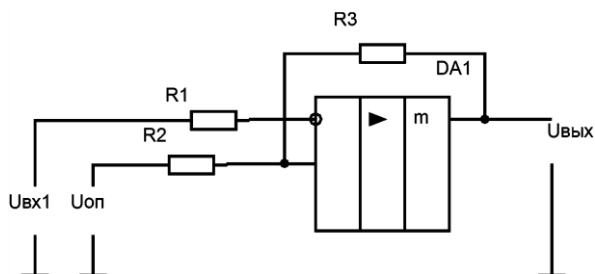


Рис. 30.3. Структурная схема триггера Шмидта

Возвращение компаратора в исходное состояние происходит при напряжении отпускания $U_{\text{отп}}$, которое равно

$$U_{\text{отп}} = U_{\text{оп}} + \Delta U, \text{ В.} \quad (30.5)$$

Отсюда следует, что за счет действия ПОС компаратор обладает гистерезисом $\Delta U_{\text{г}} = U_{\text{сраб}} - U_{\text{отп}}$.

Зависимость выходного напряжения от входного представлена на рисунке 30.4.

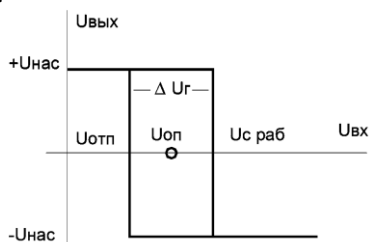


Рис. 30.4. Зависимость выходного напряжения триггера Шмидта от входного

Для уменьшения влияния начальных входных токов ОУ на работу компаратора резистор R1 выбирают с учетом равенства

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_2}{R_2 + R_3}, \text{ Ом.} \quad (30.6)$$

Введение ПОС повышает помехоустойчивость и скорость переключения компаратора, но при этом снижается точность сравнения входных напряжений, которая зависит от $\Delta U_{\text{г}}$.

При входном импульсном сигнале с пологими фронтами и срезами импульс на выходе формирующего логического элемента также не будет прямоугольным, так как некоторое время ключевая схема будет находиться в усилительном режиме. Кроме того, на фронте и срезе выходного импульса будут присутствовать усиленные помехи, поступившие на схему из проводов питания. Импульс с зашумленным и несформированным фронтом непригоден для переключения тактовых входов триггеров, регистров и счетчиков.

В таких случаях используют так называемую схему триггера Шмидта, состоящую из двухкаскадного усилителя, охваченного слабой положительной обратной связью.

Логические элементы со свойствами триггера Шмидта имеют внутреннюю положительную обратную связь, глубина которой подобрана так, чтобы получить передаточную характеристику со значительным гистерезисом. Передаточная характеристика элемента Шмидта микросхемы К155ТЛ1 двухпороговая и имеет вид, представленный на рисунке 30.5.

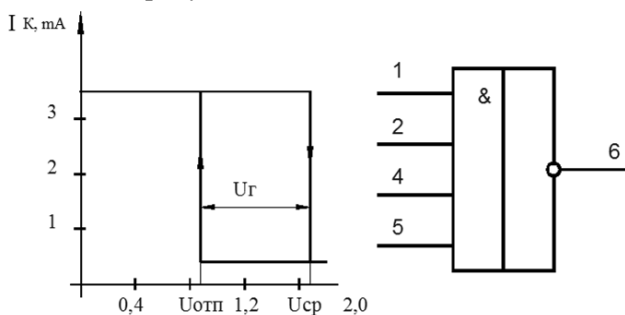


Рис. 30.5. Схема элемента триггера Шмидта и его характеристика

Счетчики импульсов. Подсчет числа импульсов является наиболее распространенной операцией в устройствах цифровой обработки информации. Повышенный интерес к таким устройствам объясняется их высокой точностью, возможностью применения регистрирующих приборов с непосредственным цифровым представлением результата, а также возможностью осуществления связи с ЭВМ.

В результате цифровой обработки информации измеряемый параметр (угол поворота, перемещение, скорость, частота, время, температура и т.д.) преобразуется в импульсы напряжения, число которых в соответствующем масштабе характеризует значение

данного параметра. Эти импульсы подсчитываются счетчиками импульсов и выражаются в виде двоичного кода.

По целевому назначению счетчики подразделяют на простые и реверсивные. Простые счетчики, в свою очередь, подразделяют на суммирующие и вычитывающие. Суммирующий счетчик предназначен для выполнения счета в прямом направлении, т.е. для сложения. С приходом счетного импульса на вход счетчика его показание увеличивается на единицу. Вычитающий счетчик служит для осуществления счета в обратном направлении, т.е. для вычитания. Каждый счетный импульс поступающий на вход вычитающего счетчика, уменьшает его показание на единицу. Реверсивные счетчики предназначены для выполнения операции счета, как в прямом, так и в обратном направлении, т.е. они могут работать в режиме сложения и вычитания.

Основными показателями счетчиков являются модуль счета (коэффициент счета K) и быстродействие. Быстродействие счетчика характеризуется максимальной частотой $f_{сч}$ следования счетных импульсов и связанным с ней временем $t_{уст}$ установки счетчика. Счетчики импульсов выполняются на основе триггеров. Счет числа поступающих импульсов производится с использованием двоичной системы исчисления.

Основным узлом двоичного счетчика (служащим также его разрядом) является триггер со счетным запуском, осуществляющий подсчет импульсов по модулю 2.

Многоразрядные двоичные суммирующие счетчики с непосредственной связью выполняются путем последовательного соединения счетных триггеров. Счетные импульсы подаются на счетный вход первого триггера. Счетные входы последующих триггеров связаны непосредственно с прямыми выходами предыдущих триггеров: вход второго триггера соединен с выходом первого триггера, вход третьего – с выходом второго и т.д.

Принцип действия двоичного счетчика с непосредственной связью рассмотрим на примере трехразрядного счетчика, показанного на рисунке 30.6. Схема выполнена на T -триггерах с внутренней задержкой. Работу схемы иллюстрируют временные диаграммы, приведенные на рисунке 30.7.

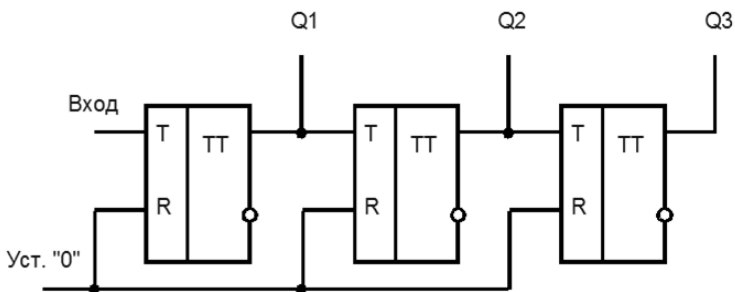


Рис. 30.6. Структурная схема трехразрядного счетчика

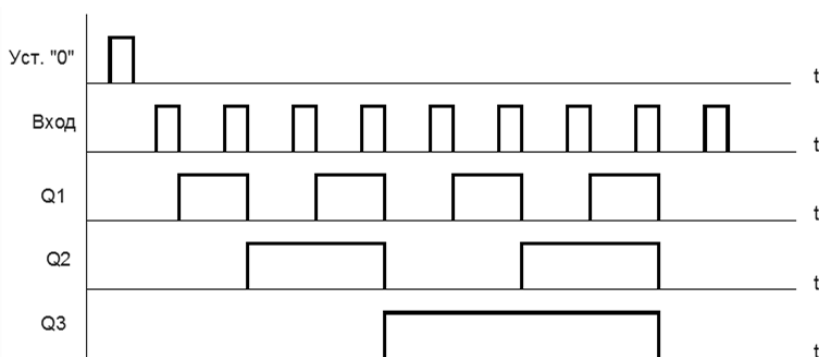


Рис. 30.7. Временные диаграммы трехразрядного счетчика

Перед поступлением счетных импульсов все разряды счетчика устанавливаются в состояние «0» ($Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$) подачей импульса на вход «Установка нуля». При поступлении первого счетного импульса первый разряд подготавливается к переключению в противоположное состояние и после окончания действия входного импульса переходит в состояние $Q_1 = 1$. В счетчик записывается число 1. Уровень 1 с выхода Q_1 воздействует на счетный вход второго разряда, подготавливая его к переключению. По окончании второго счетного импульса первый разряд счетчика переходит в состояние «0», а второй разряд переключается в состояние «1». В счетчике записывается число 2 с кодом 010.

Подобным образом осуществляется работа схемы с приходом последующих импульсов. Первый разряд счетчика, как видно из рисунка 30.7, переключается с приходом каждого входного

импульса, второй разряд – каждого второго, а третий разряд срабатывает на каждый четвертый счетный импульс.

В процессе работы двоичного счетчика частота следования импульсов на выходе каждого последующего триггера уменьшается вдвое по сравнению с частотой его входных импульсов (рис. 30.7). Это свойство схемы используют для построения делителей частоты. При использовании схемы в качестве делителя частоты входной сигнал подают на счетный вход первого триггера, а выходной снимают с последнего триггера. Выходная и входная частоты связаны соотношением

$$f_{\text{вых}} = \frac{f_{\text{вх}}}{K_{\text{сч}}}, \text{ Гц.} \quad (30.7)$$

Счетчики с $K_{\text{сч}} = 10$ называют десятичными или декадными. Они нашли широкое применение для регистрации числа импульсов с последующим визуальным отображением результата.

Для построения счетчика с $K_{\text{сч}} = 10$ необходимо иметь 4-х разрядный двоичный счетчик, число состояний которого следует уменьшить с 16 до 10. Счетная последовательность десятичного счетчика может быть представлена в двоично-кодированном десятичном коде (*Q4-Q3-Q2-Q1-8-4-2-1*), в котором каждая десятичная цифра кодируется 4-х разрядным числом. Счетная последовательность суммирующего десятичного счетчика в этом случае совпадает с двоичной последовательностью от 0000 до 1001, после чего следует 0, и последовательность повторяется.

Последовательное соединение двух схем десятичного счета дает пересчет на 100, трех – на 1000 и т.д. Первая декада производит счет единиц входных импульсов от 0 до 9. Десятый импульс устанавливает разряды первой декады в состояние «0», а формируемый на его выходе импульс записывает «1» во вторую декаду, что соответствует числу 10. Вторая декада считает десятки (от 10 до 90), третья – сотни (от 100 до 900) и т. д.

Задание. Изучить устройство, схемы, принципы действия и характеристики компараторов, счетчиков импульсов и триггера Шмидта. По известным значениям элементов схемы триггера Шмидта и заданному преподавателем значению $U_{\text{оп}}$ рассчитать $U_{\text{сраб}}$, $U_{\text{отп}}$ и $\Delta U_{\text{г}}$. Нарисовать временные диаграммы работы схемы. Провести исследование временных характеристик перечисленных

устройство, зарисовать их осциллограммы, проанализировать и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему компаратора для сравнения однополярных сигналов согласно рисунку 30.8.

2) Исследовать работу устройства, изменяя уровень входного сигнала от источника питания вручную при $U_{оп} = \text{const}$. Определить порог чувствительности компаратора, используя для этого осциллограф. По осциллографу определяют момент срабатывания компаратора и определяют разность $\Delta U_{вх \min} = U_{оп} - U_{вх \text{сраб}}$, которая и будет характеризовать порог чувствительности.

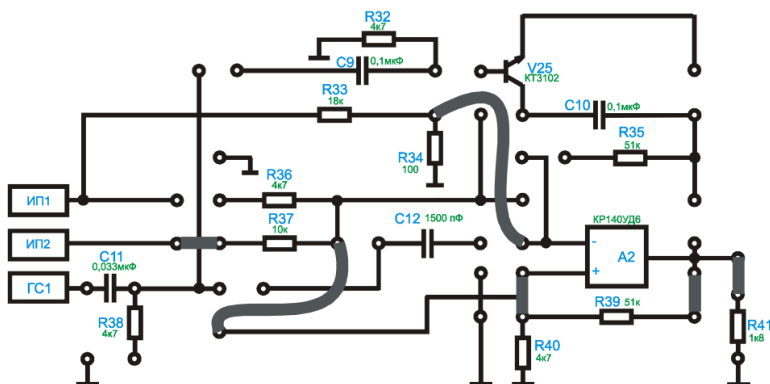


Рис. 30.8. Схема для сборки компаратора

3) Подать на вход компаратора синусоидальный сигнал соответствующей амплитуды и частотой $f = 1 \text{кГц}$ от генератора. Убедиться в правильности функционирования схемы. Зарисовать осциллограммы входных и выходных сигналов компаратора.

4) Собрать схему триггера Шмидта согласно рисунку 30.9.

5) Выполнить действия согласно пп. 2 и 3. Определить $U_{сраб}$, $U_{отп}$ и $\Delta U_{г}$ триггера.

6) Сравнить результаты исследования с теоретическими расчетами и сделать выводы.

7) Собрать схему для исследования счетчика, представленную на рисунке 30.10, и подать напряжение питания +5 В. На входе «С» должна быть логическая «1».

8) Обнулить счетчик, подав с помощью кнопки S3 единичный сигнал на вход R-счетчика.

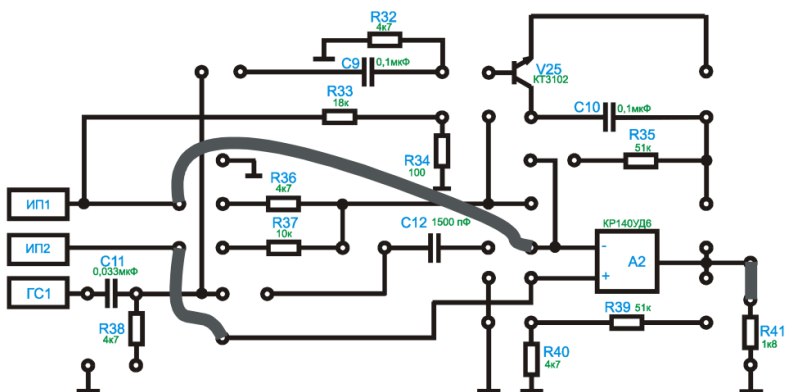


Рис. 30.9. Схема для сборки триггера Шмидта

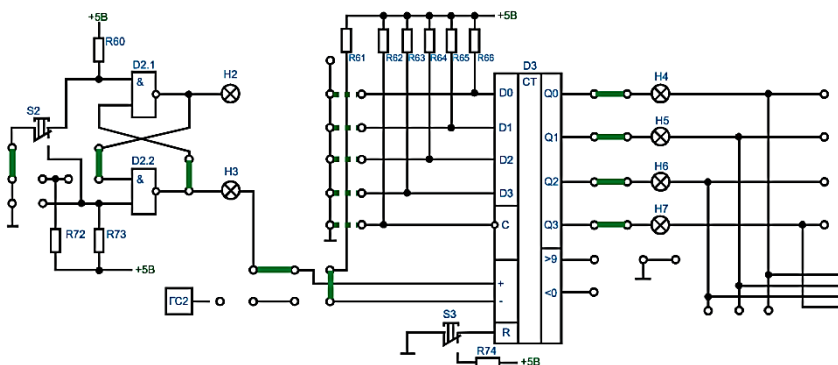


Рис. 30.10. Схема для исследования счетчика

9) Подавая с помощью кнопки S2 одиночные импульсы на вход «+1» счетчика составить таблицу состояний кода на выходах Q0-Q3 от количества поданных импульсов. Выходной код фиксируется по индикаторам H4-H7.

10) По заданию преподавателя установить код на входах D0-D3 и записать заданное число в счетчик, кратковременно подав на вход «С» уровень логического нуля.

11) Повторить действия, указанные в п. 9, начиная счет с предварительно записанного числа.

12) Подать на вход «+1» счетчика прямоугольные импульсы от генератора ГС2 и зарисовать осциллограммы входных, выходных Q0-Q3 импульсов и импульсов с выхода переноса в старший

разряд «>9». При оформлении осциллограмм необходимо учесть состояния входа и выходов в определенный момент времени.

13) Повторить действия, указанные в пп. 8-12, подавая входные импульсы на вход «-1».

14) Исследования интегрального дешифратора D4 проводятся совместно со схемой счетчика D3 и индикатора H12. Подать на вход дешифратора нулевой двоичный код, обнулив счетчик.

15) Подавая на вход «+1» счетчика одиночные импульсы составить таблицу состояний дешифратора, т.е. зависимость состояния выходов 0-9 от двоичного кода на входе. Состояние выходов дешифратора определяется по свечению соответствующей цифры на индикаторе H12.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите основные особенности построения компараторов на ОУ.
2. Почему в таких схемах, как правило, не используются ООС?
3. Как можно повысить помехоустойчивость компаратора?
4. Как определить синфазное напряжение на входах компаратора для сравнения однополярных сигналов? Сигнал какой формы необходим для работы счетчиков?
5. Назначение триггера Шмидта?
6. Где применяют счетчики импульсов?
7. Классификация счетчиков.
8. Перечислите основные характеристики (показатели) счетчиков.
9. Какой элемент является основным узлом двоичного счетчика?
10. Что такое разряд счетчика? Поясните принцип работы трехразрядного счетчика.

Лабораторная работа №31

Исследование автогенератора

Цель работы: изучить устройство, назначение, принцип действия, основные параметры, условия самовозбуждения RC -автогенераторов гармонических колебаний и их схемной реализации.

Автогенераторы гармонических колебаний (АГК) преобразуют энергию источников питания в энергию незатухающих синусоидальных колебаний на выходе. Они содержат активный элемент (АЭ) и частотно-избирательный четырехполосник (ЧИЧ). В качестве АЭ а АГК широко используются транзисторы и операционные усилители, а в качестве ЧИЧ в области низких частот (звуковой диапазон) RC -четырёхполосники: мост Вина, трехзвенные RC -цепочки дифференцирующего и интегрирующего типов.

На рисунке 31.1 показана структура простейшего автогенератора, который строится по кольцевой схеме с положительной обратной связью (ПОС).

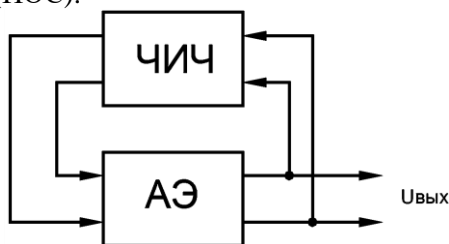


Рис. 31.1. Структурная схема простейшего автогенератора, построенного по кольцевой схеме с ПОС

Частота, генерируемая RC -автогенератором, называется квазирезонансной, так как ЧИЧ на RC -элементах не обладают резонансными свойствами, как, например, LC -контур.

Коэффициент усиления усилителя, охваченного ПОС, равен

$$K_{u \text{ ПОС}} = \frac{K_u}{1 - K_u \cdot K_{\text{ЧИЧ}}}, \quad (31.1)$$

где K_u – коэффициент усиления усилителя без ПОС;

$K_{\text{ЧИЧ}}$ – коэффициент передачи ЧИЧ.

Для того чтобы при подаче на схему автогенератора напряжения питания на его выходе генерировались гармонические колебания, необходимо обеспечить выполнение условий самовозбуждения генератора: $K_u \cdot K_{\text{чич}} > 1$. В этом случае имеет место равенство

$$f_u + f_{\text{чич}} = 2nN, \text{ Гц}, \quad (31.2)$$

где N – кратность частот ($N = 0, 1, 2, 3, \dots$).

Эти условия означают, что для осуществления незатухающих автоколебаний на выходе необходимо, чтобы потери, вносимые ЧИЧ, компенсировались усилителем, т.е. выполнялся баланс амплитуд, а создаваемый усилителем и ЧИЧ в кольцевой схеме суммарный сдвиг фаз был равен нулю или кратен $2n$, т.е. выполнялся баланс фаз.

Условия самовозбуждения должны выполняться лишь на частоте генерируемых колебаний $\omega_f = \omega_0$.

По принципу построения RC -автогенераторы подразделяются на две основные группы:

- ✓ автогенераторы без поворота фазы сигнала в цепи ОС;
- ✓ автогенераторы с поворотом фазы сигнала в цепи ОС.

RC-автогенераторы без поворота фазы в цепи ОС.

В данном варианте автогенератора (рис. 31.2) в качестве ЧИЧ используется мост Вина. Поскольку на частоте квазирезонанса ω_0 мост Вина дает сдвиг фаз, равный нулю, то для баланса фаз выход ЧИЧ связан с неинвертирующим входом ОУ. Элементы отрицательной обратной связи (ООС) R_1 и R_2 повышают стабильность работы генератора. Переменный резистор R_1 изменяет глубину ООС.

Основные расчетные соотношения для данной схемы:

- ✓ частота автогенератора:

$$f_r = f_0 = \frac{1}{2nRC}, \text{ Гц}, \quad (31.3)$$

- ✓ коэффициент четырехполюсника:

$$K_{\text{чич}} = \frac{1}{3}, \quad (31.4)$$

- ✓ емкость конденсаторов связи:

$$C = \frac{1}{2nRf_r}, \text{ Ф}. \quad (31.5)$$

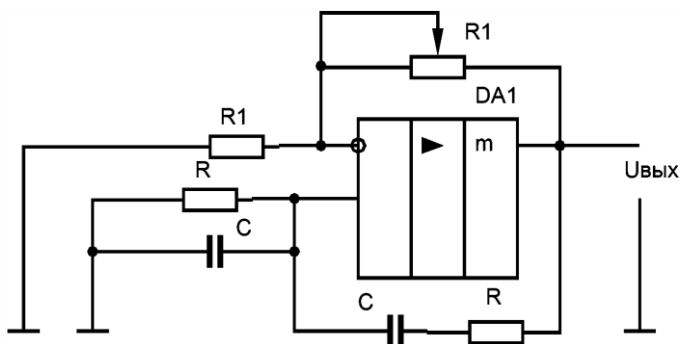


Рис. 31.2. Структурная схема автогенератора с мостом Вина

RC-генераторы с поворотом фазы в цепи ОС. Такой автогенератор (рис. 31.3) в качестве ЧИЧ содержит 3-звенную RC-цепочку дифференцирующего или интегрирующего типа.

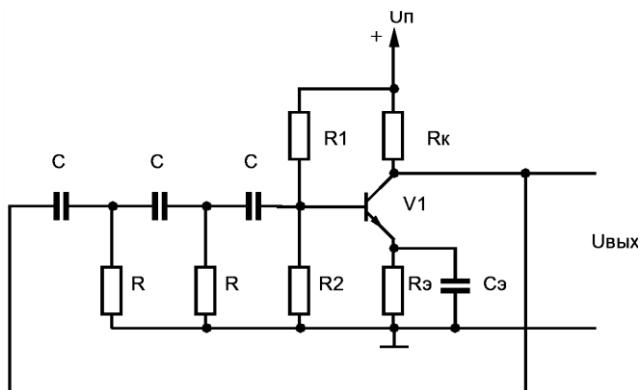


Рис. 31.3. Структурная схема автогенератора с поворотом фазы

Поскольку ЧИЧ такого типа на частоте квазирезонанса ω_0 сдвигает фазу на 180 градусов, генератор содержит однокаскадный усилитель на транзисторе, включенный по схеме с общим эмиттером. Данный усилитель также сдвигает фазу сигнала на 180 градусов. Вход усилителя с помощью ЧИЧ соединен с выходом, образуя кольцевую схему с ПОС. Режим работы усилителя по постоянному току обеспечивается делителем R_1, R_2 и резистором $R_э$ в эмиттерной цепи транзистора. Одновременно параллельно включенные по переменному току резисторы R_1 и R_2 образуют третье сопротивление цепочечного ЧИЧ, т.е.

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \text{ Ом.} \quad (31.6)$$

При обеспечении коэффициента усиления усилителя $K_u > 29$, потери в цепочечном четырехполюснике компенсируются, схема самовозбуждается и генерирует синусоидальные колебания с частотой

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot 2\pi RC}, \text{ Гц.} \quad (31.7)$$

Величина емкости конденсаторов в цепочке ЧИЧ определяется из выражения

$$C = \frac{1}{\sqrt{6} \cdot 2\pi R f_r}, \text{ Ф.} \quad (31.8)$$

Задание. Изучить принцип работы RC -автогенераторов с ЧИЧ различного типа и особенности их схемной реализации. Для схемы с 3-звенным четырехполюсником на транзисторе по заданным преподавателем параметрам схемы провести расчет резистора в коллекторной цепи R_{33} и генерируемой частоты. Для генератора с мостом Вина по заданным параметрам схемы рассчитать параметры цепи автоматической регулировки усиления и частоту выходного сигнала генератора.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему автогенератора, представленную на рисунке 31.4.

2) Установить рассчитанное значение сопротивления R_{35} и подать на генератор напряжение питания. Снять и зарисовать осциллограмму выходного напряжения и замерить частоты выходного сигнала с помощью частотомера (или по осциллографу).

3) Изменяя величину сопротивления резистора R_{33} оценить влияние его на форму выходного сигнала и возможность возникновения незатухающих колебаний. Зарисовать полученные осциллограммы. Определить значение R_{33} , при котором происходит срыв колебаний.

4) Собрать схему генератора с мостом Вина на ОУ (рис. 31.5).

5) Установить рассчитанные значения элементов цепи автоматической регулировки усиления и включить питание схемы. Снять и зарисовать осциллограммы выходного сигнала генератора.

Определить с помощью частотомера частоту генерируемых сигналов.

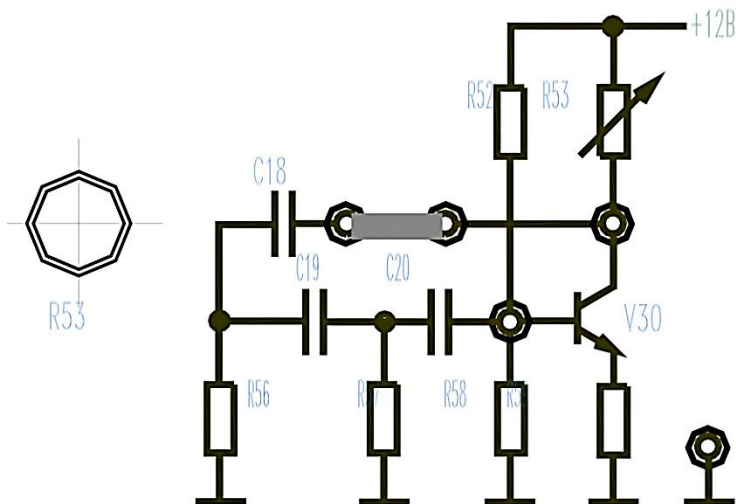


Рис. 31.4. Схема для исследования автогенератора

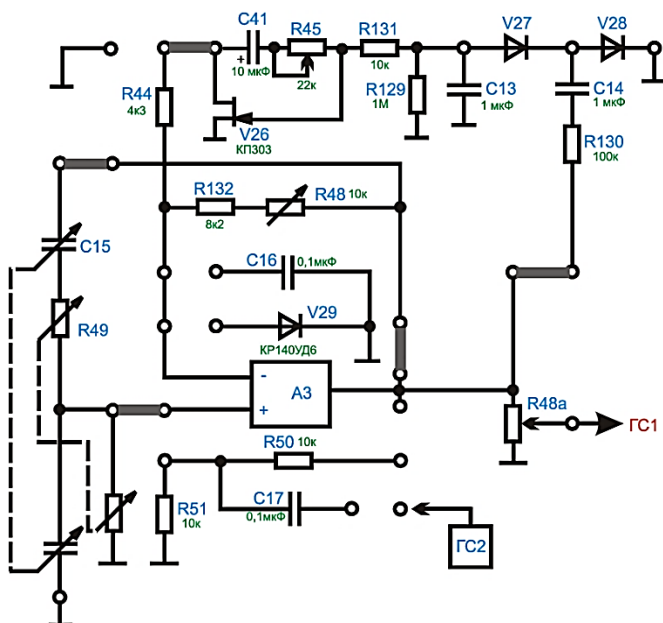


Рис. 31.5. Схема для исследования генератора с мостом Вина на ОУ

6) Собрать схему генератора без автоматической регулировки усиления согласно рисунку 31.6 (сопротивление R44 подключить к общему проводу). Снять и зарисовать осциллограммы выходного сигнала и оценить влияние цепи АРУ на работу генератора.

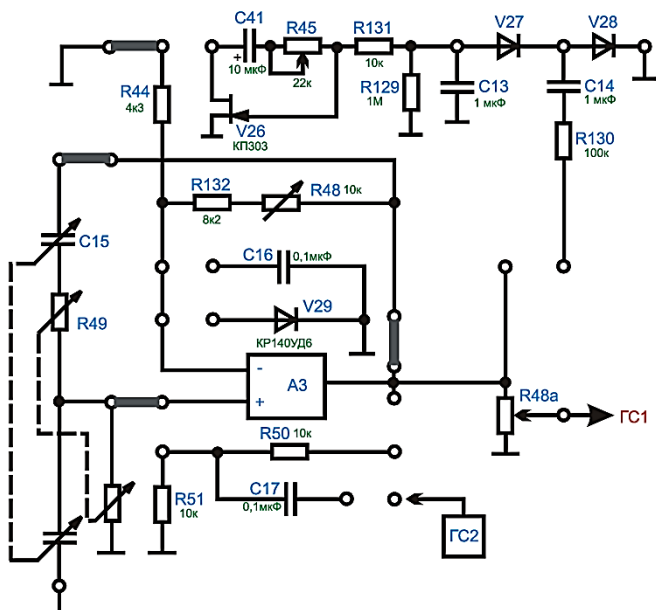


Рис. 31.6. Схема для исследования генератора без автоматической регулировки усиления

7) Сравнить результаты исследований с теоретическими расчетами и сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулировать условия самовозбуждения RC-автогенераторов.
2. Нарисовать и пояснить принцип действия схем четырехполюсников, используемых в RC-автогенераторах.
3. Привести АЧХ и ФЧХ моста Вина, 3-звенных RC-цепочек дифференцирующего и интегрирующего типов.
4. Представить выражения для определения параметров ЧИЧ перечисленных выше типов RC-генераторов.
5. Как можно повысить стабильность частоты и амплитуды автогенераторов?

Лабораторная работа №32

Исследование мультивибратора

Цель работы: изучить устройство, назначение, принцип действия, методы расчета и особенности настройки автоколебательных и ждущих мультивибраторов, приобрести навыки их реализации на ОУ. Исследовать временные характеристики мультивибраторов.

Автоколебательные генераторы. Автоколебательные генераторы прямоугольных импульсов (ГПИ) или мультивибраторы (МВ) – это устройства, способные поочередно находиться в двух временно устойчивых (квазиустойчивых) состояниях, в каждое из которых они переходят автоматически за счет переходных процессов, протекающих в схеме. МВ могут выполняться на дискретных элементах, логических интегральных схемах и ОУ.

Типовая схема МВ на ОУ показана на рисунке 32.1.

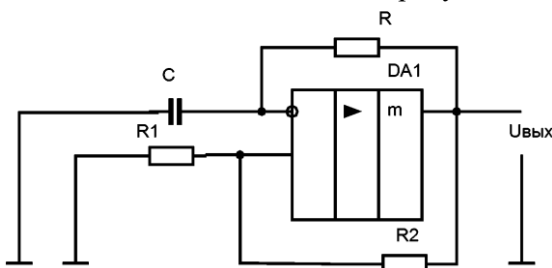


Рис. 32.1. Типовая структурная схема мультивибратора на ОУ

При подаче питающего напряжения в момент времени t_0 (рис. 32.2) инвертирующий вход ОУ по переменному току заземлен конденсатором С, а на неинвертирующий вход по цепи ОС поступает небольшое напряжение (положительное или отрицательное), так как на выходе ОУ всегда присутствует напряжение сдвига.

Разница напряжений между входами переводит ОУ в режим насыщения, когда, например, $U_{\text{вых}} = -U_{\text{нас}}$. Конденсатор С начинает заряжаться с постоянной времени $t = RC$, и напряжение на нем изменяется, стремясь к значению $+U_{\text{нас}}$. При достижении определенной величины

$$U_C = \frac{+U_{\text{нас}} \cdot R_1}{R_1 + R_2}, \text{ В}, \quad (32.1)$$

выходное напряжение изменяется скачком, достигая своего отрицательного предела $-U_{\text{нас}}$. Конденсатор C перезаряжается, а напряжение на нем стремится к значению $-U_{\text{нас}}$. Когда напряжения на входах ОУ сравниваются, происходит скачок выходного напряжения к положительному пределу $+U_{\text{нас}}$.

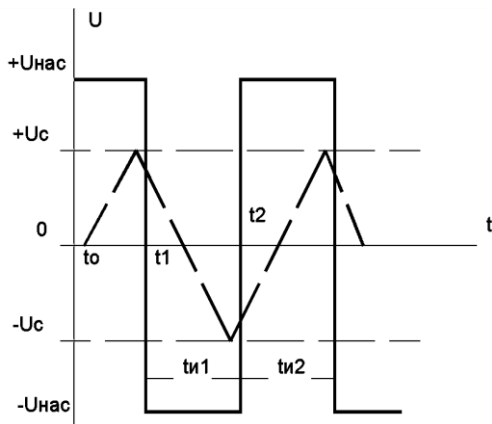


Рис. 32.2. Временные диаграммы мультивибратора на ОУ

Длительности квазистойчивых состояний t_{u1} и t_{u2} определяют из формулы

$$t_{u1} = t_{u2} = RC \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1} \right), \text{ с.} \quad (32.2)$$

Для измерения частоты и скважности выходных импульсов можно подать на резистор R_1 (отключив его от общего провода) напряжение смещения $U_{\text{см}}$ и установить вместо резистора переменный резистор.

Расчет элементов и параметров производится по выражениям:

$$R_2 = (5 \dots 10)R_{\text{н доп}}, \text{ Ом,} \quad (32.3)$$

$$T = t_{u1} + T_{u2}, \text{ с.} \quad (32.4)$$

Ждущие мультивибраторы. Ждущие мультивибраторы (ЖМ), называемые также одновибраторами (ОВ) – это устройства, способные поочередно находиться в одном длительно устойчивом или в другом – кратковременном (квазистойчивом) состоянии. Для перевода из длительно устойчивого состояния в кратковременно устойчивое на вход схемы подается внешний запускающий импульс, после которого она формирует одно переключение,

а затем самостоятельно возвращается в исходное состояние. Одно-
вибраторы широко используются в устройствах автоматики и сис-
тем управления в самых различных модификациях. Они могут
выполняться на дискретных элементах, логических микросхемах
или ОУ.

Схема одновибратора на ОУ представлена на рисунке 32.3.

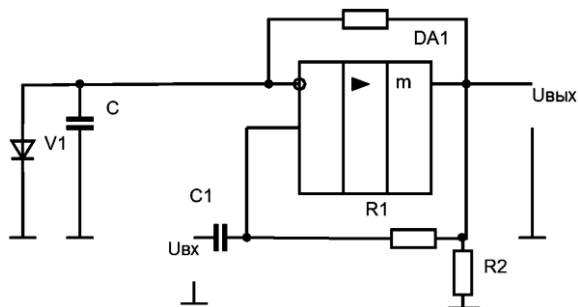


Рис. 32.3. Схема одновибратора на ОУ

В одновибраторе на ОУ, в приведенной выше схеме, конденса-
тор С времязадающей цепи подключен к инвертирующему входу
ОУ. Эта схема отличается от схемы автоколебательного МВ
наличием диода V1, подключенного к инвертирующему входу
ОУ, что позволяет при $U_{\text{вых}} = -U_{\text{нас}}$ зафиксировать потенциал на кон-
денсаторе С времязадающей цепи на нулевом уровне.

В исходном устойчивом состоянии ОУ находится в насыще-
нии и конденсатор шунтируется открытым диодом V1 и разряжен.
Напряжение на неинвертирующем входе ОУ составляет

$$U_{\text{вх}} = \alpha U_{\text{нас}}, \text{ В}, \quad (32.5)$$

где α – коэффициент передачи делителя R1, R2.

Коэффициент передачи определяется так:

$$\alpha = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (32.6)$$

Для перевода схемы в квазистойчивое состояние достаточно
через конденсатор С1 дифференцирующей цепи подать на неин-
вертирующий вход ОУ короткий положительный импульс с ам-
плитудой, равной

$$U_{\text{вх}} > \alpha U_{\text{нас}}, \text{ В}. \quad (32.7)$$

Возникающий в результате запуска регенеративный процесс завершается переключением ОУ в состояние насыщения с высоким выходным уровнем напряжения $U_{\text{вых}} = +U_{\text{нас}}$. При этом на неинвертирующем входе ОУ устанавливается новое значение напряжения $U_{\text{вх}}$. Диод VI закрывается и начинается заряд конденсатора С через резистор R к напряжению близкому $+U_{\text{нас}}$. Такое состояние схемы сохраняется до момента, когда напряжение на конденсаторе U_C достигнет значения $\alpha U_{\text{нас}}$. Тогда ОУ переходит в режим усиления, восстанавливается действие положительной ОС, происходит восстановление состояния схемы и напряжение на выходе принимает исходное значение $U_{\text{вых}} = -U_{\text{нас}}$. Конденсатор перезаряжается через резистор R от напряжения $U_{\text{нас}}$ к напряжению $-U_{\text{нас}}$. Однако при $U_C = 0$ диод VI открывается и напряжение фиксируется на нулевом уровне.

Длительность формируемого импульса

$$t_u = RC \ln \frac{1}{1 - \alpha}, \text{ с.} \quad (32.8)$$

Длительность восстановления составит

$$t_B = RC \ln(1 + \alpha), \text{ с.} \quad (32.9)$$

Длительность импульса регулируется изменением коэффициента α или параметров времязадающей цепи.

Задание. Изучить принцип работы мультивибратора и одновибратора, особенности их схемной реализации. Для схемы МВ по заданным параметрам схемы и заданной частоте выходного сигнала произвести расчет резистора R48. Для схемы ОВ по заданным параметрам схемы и длительности выходного сигнала произвести расчет резистора R48. Провести исследования и зарисовать осциллограммы входных и выходных сигналов. Проанализировать осциллограммы и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему мультивибратора, представленную на рисунке 32.4.

2) Установить рассчитанное значение резистора R48 и подать на генератор напряжение питания. Снять и зарисовать осциллограмму выходного напряжения и измерить частоту выходного сигнала с помощью частотомера (или по осциллографу).

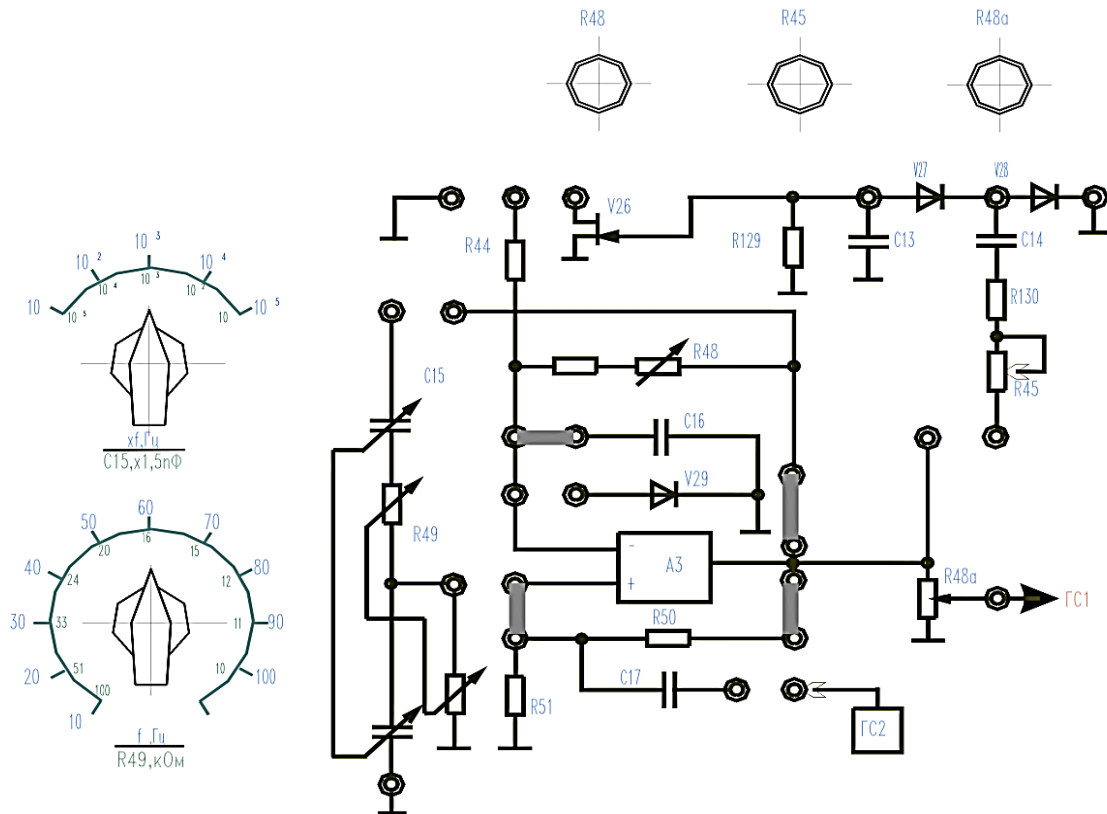


Рис. 32.4. Схема для исследования мультивибратора

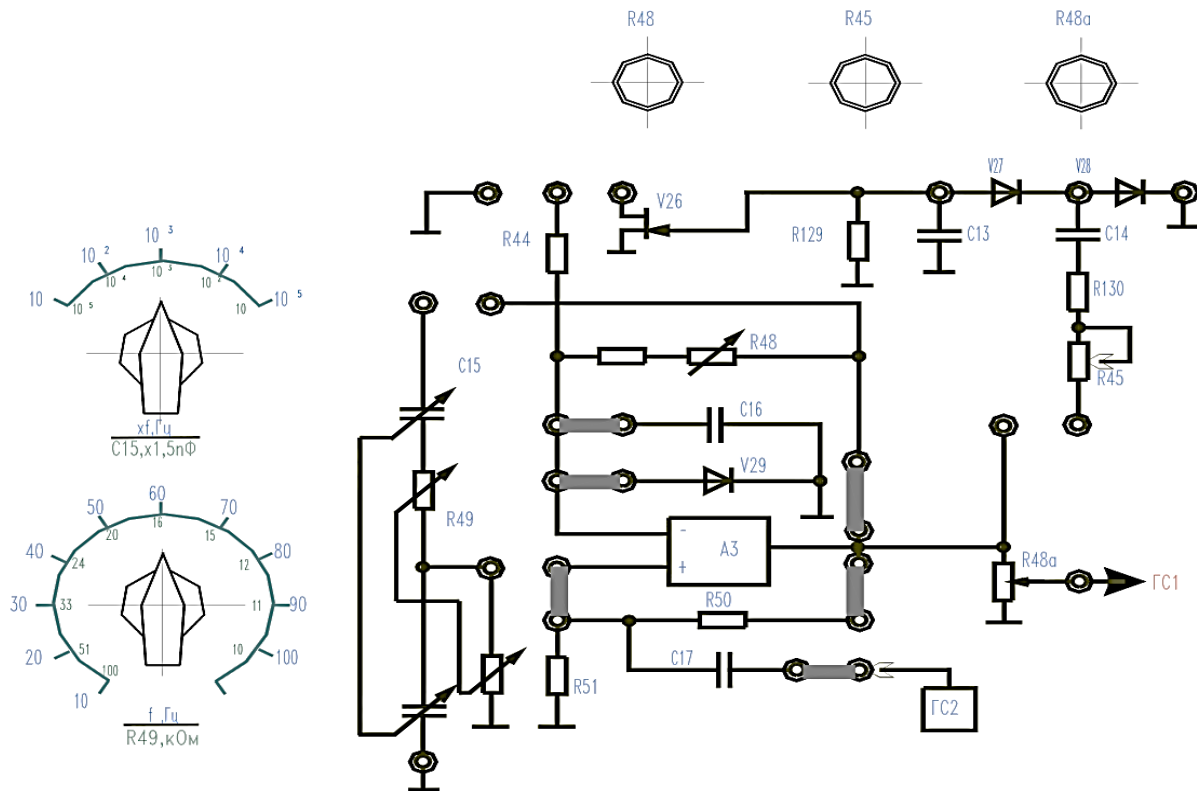


Рис. 32.5. Схема для исследования одновибратора

3) Изменяя величину резистора R48, оценить его влияние на форму выходного сигнала и возможность возникновения незатухающих колебаний. Зарисовать полученные осциллограммы. Определить значение R48, при котором происходит срыв колебаний.

4) Собрать схему одновибратора на ОУ, представленную на рисунке 32.5.

5) Установить рассчитанное значение сопротивления резистора R48, подать на схему ОВ напряжение питания и прямоугольные импульсы частотой 1 кГц от генератора ГС2. Снять и зарисовать осциллограмму выходного напряжения. Замерить параметры выходного сигнала с помощью осциллографа.

6) Изменяя величину резистора R48 оценить его влияние на форму и параметры выходного сигнала. Зарисовать полученные осциллограммы.

7) Сравнить результаты экспериментального исследования данных схем с теоретическими расчетами и сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Объяснить физические принципы изменения частоты и скважности генерируемых импульсов в рассмотренных схемах МВ.

2. Как изменить скважность импульсов в схеме МВ на ОУ?

3. Какова роль источника смещения, подключаемого к одному из выводов резистора цепи ОС?

4. Какие способы изменения длительности выходных импульсов можно применять в схемах ОВ?

5. С помощью каких изменений схемы ОВ можно поменять на обратную полярность импульса, формируемого на ее выходе?

Лабораторная работа №33

Исследование регистров в интегральном исполнении

Цель работы: изучить устройство, назначение, схемы подключения, принципы работы, методы проектирования схем регистров. Исследовать регистр в интегральном исполнении в статическом режиме.

Регистрами называют функциональные узлы, предназначенные для приема, хранения, передачи и преобразования информации. В зависимости от способа записи информации (кода числа) различают параллельные, последовательные и параллельно-последовательные регистры.

Регистры памяти. Регистр с параллельным приемом и выдачей информации называется регистром памяти. В параллельных регистрах запись двоичного числа осуществляется параллельным кодом, т.е. во все разряды регистра одновременно. Их функция сводится только к приему, хранению и передаче информации (рис. 33.1).

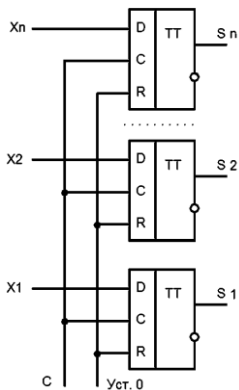


Рис. 33.1. Структурная схема
параллельного регистра – регистра памяти

Предварительная установка регистра в нулевое состояние осуществляется посылкой сигнала «Установить 0» на асинхронные входы сброса триггеров. Изменение информации в регистре происходит после изменения сигналов на входах X при поступлении сигнала на вход синхронизации C .

Регистры сдвига. Регистры с последовательным приемом и выдачей информации получили название регистров сдвига. Регистр состоит из последовательно соединенных D-триггеров (рис. 33.2) или R-S-триггеров, состояния которых передаются (сдвигаются) на последующие триггеры под действием тактовых импульсов. Тактовые импульсы управляют работой регистра. Регистры сдвига могут управляться одной последовательностью тактовых импульсов. В этом случае регистры называются одноктактными. При управлении двумя, тремя и т.д. последовательностями тактовых импульсов регистры соответственно относят к двух-, трехтактным и т.д.

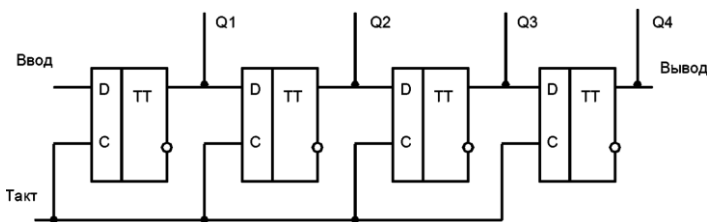


Рис. 33.2. Структурная схема регистра сдвига

На рисунке 33.3 приведены диаграммы, иллюстрирующие процесс записи информации в регистр. В качестве примера взят код 1011, соответствующий числу 11. Перед записью информации регистр устанавливают в состояние «0». Для этого в отсутствие сигнала на входе подается серия тактовых импульсов с числом импульсов, равным количеству разрядов в регистре. При записи информации одновременно с поступлением кода числа подаются тактовые импульсы.

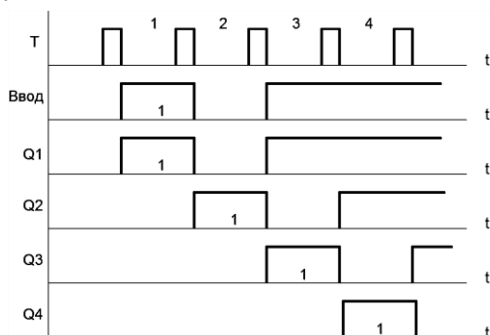


Рис. 33.3. Временные диаграммы работы регистра сдвига

Тактовыми импульсами осуществляется продвижение информации от младшего разряда к старшему. В результате после четвертого тактового импульса триггеры регистра принимают состояния, соответствующие коду принятого четырехразрядного числа.

Операция считывания информации из последовательного регистра может быть проведена в параллельном или последовательном коде. Для передачи информации в параллельном коде используют выходы разрядов регистра. Таким образом, последовательный регистр позволяет осуществить операцию преобразования последовательного кода в параллельный. Считывание информации в последовательном коде реализуется подачей серии тактовых импульсов.

В последовательном регистре записанное число может быть сдвинуто тактовыми импульсами на один или несколько (K) разрядов. Операции сдвига соответствуют умножению числа на 2^K . Например, сдвиг 0010 числа 2 на один разряд даст код 0100 (числа 4), на два разряда – код 1000 (число 8).

Выше были приведены схемы регистров сдвига информации вправо. На рисунке 33.4 приведена схема четырехразрядного регистра сдвига влево на D-триггерах с динамическим управлением.

Параллельно-последовательные и реверсивные регистры.

В параллельно-последовательных регистрах сочетаются свойства регистров параллельного и последовательного действия. Они позволяют осуществлять запись информации как в последовательном, так и в параллельном коде, в связи с чем могут быть использованы для преобразования кодов из последовательного в параллельный и обратно. Эти регистры допускают одноктактный и многотактный принципы построения.

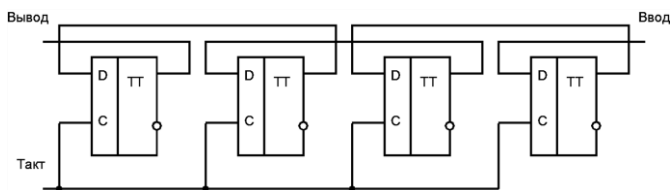


Рис. 33.4. Структурная схема четырехразрядного регистра сдвига влево

На рисунке 33.5 приведена структурная схема параллельно-последовательного регистра.

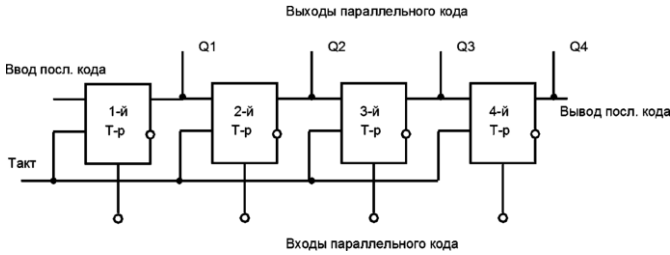


Рис. 33.5. Структурная схема параллельно-последовательного регистра

Для преобразования последовательного кода в параллельный серией тактовых импульсов в регистр записывается информация (число) последовательного кода. Выходы разрядов регистра при этом представляют ту же информацию в параллельном коде. Для обратного преобразования информация в регистре вводится по входам параллельного кода. Посредством серии тактовых импульсов с выхода последнего разряда регистра информация считывается в последовательном коде.

Комбинируя схемы сдвига вправо и влево и используя управляющие сигналы, можно построить регистр сдвига в обоих направлениях. Такой регистр называется реверсивным. На рисунке 33.6 показано условное графическое обозначение схемы регистра памяти и сдвига.

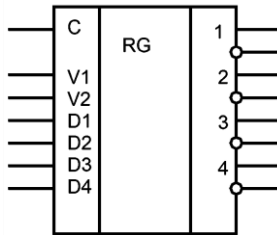


Рис. 33.6. Структурная схема регистра памяти и сдвига

При подаче на вход V1 сигнала логического нуля «0», D-входы, используемые в схеме сдвига, отключаются и схема превращается в схему регистра памяти с одноразовыми входами и парафазными выходами. При подаче на вход V2 сигнала логической единицы «1» D-входы включаются (разрешается прохождение сигнала) и по ним сигналы поступают на параллельные входы

регистра. При подаче разрешающего сигнала на вход синхронизации S , сигналы с D -входов передаются в регистр. Если на оба входа $V1$ и $V2$ одновременно подается сигнал логической единицы «1», то схема превращается в схему регистра сдвига влево. В такой схеме прием информации осуществляется параллельно, а выдача либо последовательно, либо параллельно.

Задание. Изучить принцип работы, назначение выводов и функциональные возможности регистра типа K155IP1. Изобразить временные диаграммы, поясняющие режим загрузки параллельного кода в указанный регистр. Изобразить временные диаграммы, поясняющие режим загрузки последовательного кода в указанный регистр. Провести исследование принципов работы различных типов регистров. Снять и зарисовать временные диаграммы регистров, проанализировать их и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

Регистр K155IP1 – это четырехразрядный универсальный сдвиговый регистр. Он имеет четыре параллельных входа $D0$ - $D3$ и один последовательный вход $S1$, а также четыре выхода $Q0$ - $Q3$. Регистр имеет два тактовых входа $C1$ и $C2$ и вход разрешения параллельной загрузки PE .

Если на вход PE подано напряжение высокого уровня, то разрешается работа тактовому входу $C2$. При этом в регистр загружаются данные от входов $D0$ - $D3$. Если на вход PE подать напряжение низкого уровня, то разрешается работа по входу $C1$. С приходом тактового импульса на $C1$ данные последовательно сдвигаются от входа $S1$ на выход $Q0$, затем на $Q1$, $Q2$, $Q3$ (т.е. вправо).

С помощью входов $D0$ - $D3$ задается код числа, записываемого в регистр. Запись этого кода разрешается при единичном уровне сигнала на входе PE и поступлении на $C2$ тактовых импульсов.

При нулевом уровне на входе PE и поступлении импульсов на вход $C1$ происходит сдвиг данных по регистру вправо. Причем, данные сдвигаются на такое число разрядов, сколько тактовых импульсов поступило на вход $C1$.

1) Собрать схему для исследования регистра, представленную на рисунке 33.7.

2) Подать на схему напряжение питания и обнулить регистр. Для этого перевести регистр в режим загрузки последовательного

кода и загрузить код 0000, подав на соответствующий тактовый вход четыре тактовых импульса. Подача тактовых импульсов на регистр осуществляется с помощью кнопки S2 (генератор одиночных импульсов ГОИ), а подача последовательного кода – S4.

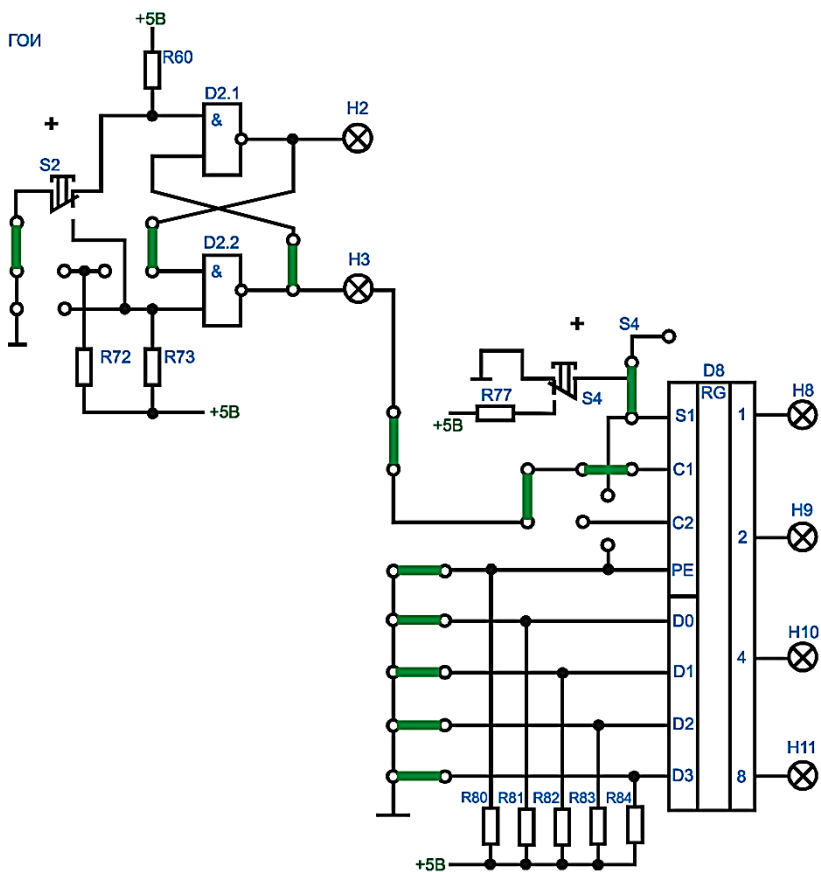


Рис. 33.7. Схема для исследования регистров

3) Загрузить в регистр заданный преподавателем последовательный код. В процессе загрузки регистрировать состояние выходов регистра по индикаторам после подачи каждого тактового импульса.

4) Осуществить сдвиг записанного кода на число разрядов по заданию преподавателя. Регистрировать состояние выходов регистра после подачи каждого тактового импульса.

5) Записать в регистр число, заданное в параллельном коде. Для этого с помощью переключателей установить заданный код на входах D1-D4 регистра и подать один тактовый импульс на соответствующий тактовый вход. Зарегистрировать состояние выходов регистра.

6) Проследить возможность преобразования на данном регистре параллельного кода в последовательный и наоборот.

7) По результатам исследований составить таблицу состояний, т.е. зависимость информации на выходах регистра от состояний его входов для всех возможных режимов работы регистра.

Таблица 33.1

Результаты исследования работы регистра

Режим работы	Входы								Выходы			
	C1	C2	S3	PE	D1	D2	D3	D4	Q1	Q2	Q3	Q4
Сброс												
Последовательная загрузка												
Сдвиг вправо												
Параллельная загрузка												
Хранение												

Вопросы для самоконтроля

1. Назвать основные параметры регистров.
2. Пояснить принципы построения регистров.
3. Пояснить работу регистра памяти.
4. Пояснить работу регистра сдвига.
5. Пояснить работу реверсивного регистра.
6. Перечислить основные операции, выполняемые регистром.
7. Пояснить процесс преобразования параллельного кода в последовательный и обратно с помощью регистров.
8. Перечислить типовые микросхемы регистров и их особенности.

Лабораторная работа №34

Исследование цифро-аналоговых преобразователей

Цель работы: изучить устройство, назначение, схемы подключения и принципы построения цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). Исследовать принцип работы ЦАП и его характеристики.

В электронной аппаратуре широко используются как непрерывные (аналоговые), так и дискретные (цифровые) сигналы. Для взаимодействия устройств, обрабатывающих аналоговые сигналы, с цифровыми устройствами служат цифро-аналоговые (ЦАП) и аналого-цифровые (АЦП) преобразователи.

ЦАП иногда называют преобразователями код-аналог, поскольку входной цифровой сигнал представляется в каком-либо коде, чаще всего в двоичном. Построение ЦАП основано на суммировании напряжений или токов, пропорциональных весам разрядов. Мгновенное напряжение на выходе ЦАП пропорционально весу входного кода (его десятичному эквиваленту). Смена входных кодов вызывает изменение выходного напряжения ЦАП. Выходной сигнал преобразователя с суммированием напряжений является суммой напряжений, каждое из которых определяется единицей в соответствующем разряде входного кода. Значения этих напряжений относятся как веса единиц разрядов входного кода. Если от единицы в первом (младшем) разряде появляется составляющая выходного напряжения, то единицы в третьем разряде – в два раза больше и т. д.

Одним из наиболее простых является ЦАП с двоично-взвешенными резисторами и суммированием токов (рис. 34.1). Схема реализована в виде инвертирующего сумматора на операционном усилителе. Число входов преобразователя (количество параллельно включенных резисторов) равно числу разрядов поступающего параллельного двоичного кода. На каждом входе имеются напряжения $U_{\text{вх } i} = 0 \text{ В}$ или $U_{\text{вх } i} = U_i \text{ В}$, соответствующие наличию в разрядах входного двоичного кода логического «0» или логической «1». Выходное напряжение определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = -(I_1 + I_2 + I_n) R_{\text{ос}}, \text{ В.} \quad (34.1)$$

где I_n, I_{n-1} – токи, втекающие в точку A через резисторы $R, 2R, 4R, \dots, 2^{n-1}R$, при наличии напряжения $U = 1$ В на том или ином входе;

n – число разрядов двоичного кода.

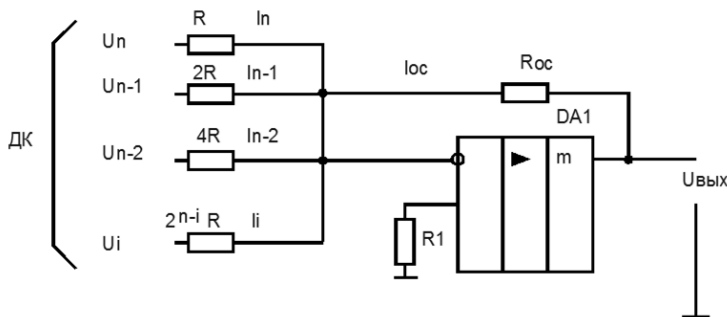


Рис. 34.1. ЦАП с двоично-взвешенными резисторами

Преобразовав это выражение получим:

$$U_{\text{вых}} = -U_1 R_{\text{oc}} / (R \cdot 2^{n-1}) \cdot (a_n \cdot 2^{n-1} + a_{n-1} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_1 \cdot 2^0), \text{ В.} \quad (34.2)$$

Записанная в скобках сумма представляет собой десятичный эквивалент входного двоичного кода. Поскольку $U_1 R_{\text{oc}} / R \cdot 2^{n-1} = \text{const} = K$, то выходное напряжение пропорционально весу действующего на входе кода.

Сопротивление резистора R_1 должно соответствовать выражению

$$1/R_1 = 1/R + 1/2R + 1/4R + \dots + 1/(2^{n-1}R) + 1/R_{\text{oc}}. \quad (34.3)$$

Недостатком рассмотренной схемы является необходимость тщательного подбора резисторов, а также трудность выдержать их в рабочем диапазоне температур, что особенно сказывается при большом числе разрядов входного кода (ДК). Кроме того, значение $U_{\text{вых}}$ должно быть одинаковым для всех входных разрядов.

Указанных недостатков во многом лишена схема ЦАП с резистивной матрицей R - $2R$ (рис. 34.2), содержащая резисторы только двух номиналов.

Входная цифровая информация, поступающая в параллельном ДК, записывается в параллельный регистр на RS триггерах $T_i - T_n$. К резисторам $2R$ матрицы через ключи SA_{i1} и SA_{i0} подводятся напряжения $U = U_{\text{оп}}$ либо $U = 0$ (земля) в зависимости от наличия «1» либо «0» в определенном разряде триггеров регистра. Если к

одному из резисторов $2R$ (например R_r) подводится напряжение $U_{оп}$ (в первом разряде записана «1» и открыт ключ SA11), а левые выводы других резисторов $2R$ матрицы связаны с землей через открытые ключи SA (в этих разрядах записаны нули), то полное сопротивление между любой из точек А, Б, В и землей равно R .

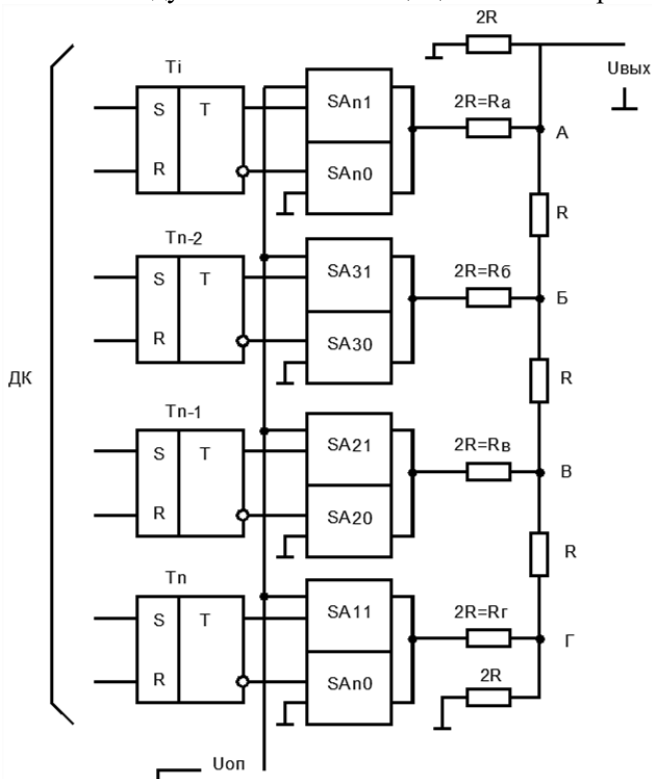


Рис. 34.2. Цифро-аналоговый преобразователь с матрицей R-2R

Из этого выражения следует, что при переходе от узла Г к узлу, находящемуся ближе к выходу схемы, напряжение равно

$$U_r = 1/3 \cdot U_{оп}, B. \quad (34.4)$$

Оно каждый раз уменьшается вдвое. Тогда выходное напряжение, обусловленное наличием единиц в нескольких разрядах входного ДК, определяется сложением напряжений от каждой единицы в соответствующем разряде, т.е. пропорционально весу кода на входе ЦАП

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{оп}}/3 \cdot 2^{n-1}) \cdot (a_n \cdot 2^{n-1} + a_{n-1} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_2 \cdot 2^1 + a_1 \cdot 2^0) \text{ В.} \quad (34.5)$$

Напряжение в точке Г относительно земли будет равно

$$U_{\Gamma} = U_{\text{оп}} \cdot R / (2R + R) = 1/3 \cdot U_{\text{оп}}, \text{ В.} \quad (34.6)$$

В ЦАП в интегральном исполнении широко используется принцип суммирования токов на элементах матрицы R-2R. БИС ЦАП изготавливают по биполярной и КМОП-технологии. Первая имеет более высокое быстродействие, а вторая – меньшее потребление мощности. Как правило, БИС ЦАП содержит резистивную матрицу типа R-2R, набор токовых ключей, реализующих коэффициенты двоичных разрядов, и согласующие элементы. Для преобразования суммарного выходного тока ЦАП в уровни выходного напряжения используются внешние операционные усилители, не входящие в БИС.

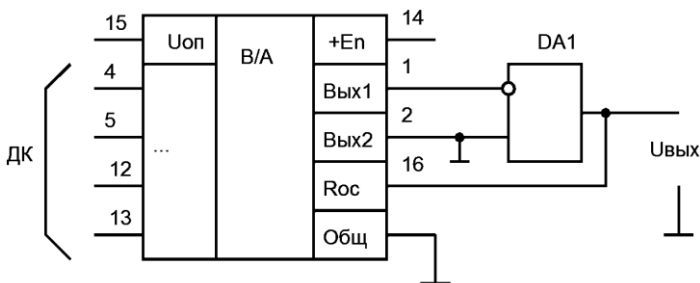


Рис. 34.3. Схема включения ЦАП К572 ПА1

В настоящее время выпускается несколько типов ЦАП в интегральном исполнении. Среди них широко используются ЦАП 572-й КМОП серии, а также быстродействующие серии 1118. Основная схема включения ЦАП К572ПА1 приведена на рисунке 34.3.

Преобразователь К572ПА1 содержит резистивную матрицу типа R-2R ($R=10$ кОм), которая через токовые ключи соединяется с инвертирующим входом внешнего операционного усилителя. Внутри ЦАП имеется резистор $R_{\text{ос}} = 10$ кОм, включенный в цепь ООС ОУ.

Рассмотренный преобразователь называют перемножающим, потому что выходное напряжение определяется произведением значения опорного сигнала $U_{\text{оп}}$ на значение входного цифрового кода. Его особенностью является широкий диапазон изменения опорного сигнала (до ± 17 В при $E_{\text{п}} = \pm 17$ В). Входное напряже-

ние может быть однополярным или двухполярным. Это зависит от вида опорного напряжения и входного кода. При проектировании ЦАП важное значение имеет выбор операционного усилителя, параметры которого при использовании совместно с К572ПА1 должны соответствовать условиям

$$I_{\text{вхОУ}} < U_{\text{оп}} / (R \cdot 2^{n+1}), A; U_{\text{см}} \ll U_{\text{оп}} / 2^n, B; K_{\text{ОУ}} \gg 2^{n+1}. \quad (34.7)$$

Задание. Изучить схемы, устройство и принцип действия ЦАП различных типов. Провести исследования временных характеристик и зависимости выходного напряжения ЦАП от номера счета или кода. Проанализировать результаты исследований и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему ЦАП, представленную на рисунке 34.4. Запитать операционный усилитель двухполярным источником питания, а цифровые микросхемы – источником +5 В. На входе «С» счетчика должна быть логическая «1».

2) Обнулить счетчик, подав на вход R-уровень логическую «1» кратковременным нажатием кнопки S3.

3) Подавая на вход «+1» счетчика одиночные импульсы с помощью кнопки S2, снять зависимость выходного напряжения ЦАП от двоичного кода. Измерение $U_{\text{ВЫХ}}$ ЦАП производится вольтметром на выходе операционного усилителя. Двоичный код определяется с помощью индикаторов Н4-Н7.

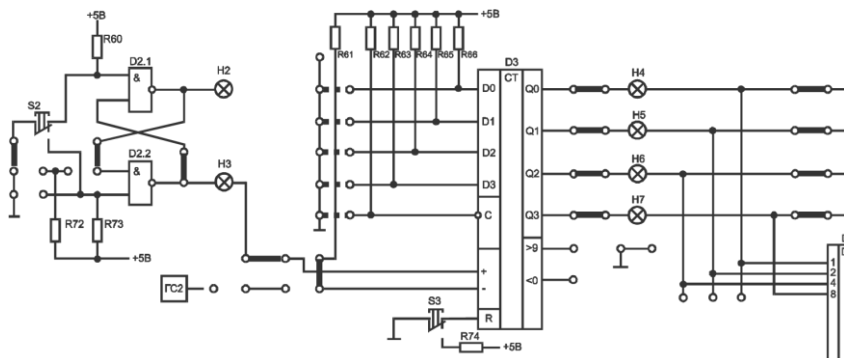


Рис. 34.4. Схема подключения для исследования ЦАП

4) По полученной характеристике определить погрешности ЦАП, погрешность полной шкалы.

5) Снять с помощью осциллографа временные диаграммы и зарисовать их, выполнив действия согласно пп. 2 и 3.

6) Установить на входе ЦАП заданный преподавателем код и записать его в счетчик кратковременной подачей на вход «С» логического «0», замерить выходное напряжение. Сравнить полученное значение с рассчитанным ранее и сделать выводы.

7) Сравнить результаты практического исследования схемы ЦАП с теоретическими и сделать выводы.

Вопросы для самоконтроля

1. Пояснить принцип работы ЦАП.
2. Каковы особенности работы ЦАП с двоично-взвешенными резисторами и суммированием токов?
3. Пояснить работу ЦАП с использованием матрицы типа R-2R.
4. Пояснить порядок расчета выходного напряжения в ЦАП с двоично-взвешенными резисторами.
5. Назвать особенности применения ЦАП в интегральном исполнении.

Лабораторная работа №35

Исследование счетчиков импульсов и дешифраторов

Цель работы: изучить назначение, устройство, схему и принцип действия десятичного реверсивного цифрового счетчика ИС-типа (К155ИЕ6). Исследовать характеристики дешифратора ИС-типа.

Счетчики импульсов. Подсчет числа импульсов является наиболее распространенной операцией в устройствах цифровой обработки информации. Повышенный интерес к таким устройствам объясняется их высокой точностью, возможностью применения регистрирующих приборов с непосредственным цифровым представлением результата, а также возможностью осуществления связи с ЭВМ.

В результате цифровой обработки информации измеряемый параметр (угол поворота, перемещение, скорость, частота, время, температура и т.д.) преобразуется в импульсы напряжения, число которых в соответствующем масштабе характеризует значение данного параметра. Эти импульсы подсчитываются счетчиками импульсов и выражаются в виде цифр.

По целевому назначению счетчики подразделяют на простые и реверсивные. Простые счетчики, в свою очередь, подразделяют на суммирующие и вычитающие. Суммирующий счетчик предназначен для выполнения счета в прямом направлении, т.е. для сложения. С приходом счетного импульса на вход счетчика его показание увеличивается на единицу. Вычитающий счетчик служит для осуществления счета в обратном направлении, т.е. для вычитания. Каждый счетный импульс поступающий на вход вычитающего счетчика, уменьшает его показание на единицу. Реверсивные счетчики предназначены для выполнения операции счета как в прямом, так и в обратном направлении, т.е. они могут работать в режиме сложения и вычитания.

Основными показателями счетчиков являются модуль счета (коэффициент счета K) и быстродействие. Быстродействие счетчика характеризуется максимальной частотой $f_{сч}$ следования счетных импульсов и связанным с ней временем $t_{уст}$ установки счетчика. Счетчики импульсов выполняются на основе триггеров. Счет

числа поступающих импульсов производится с использованием двоичной системы счисления.

Двоичные суммирующие счетчики с непосредственной связью. Двоичные счетчики производят счет поступающих импульсов в двоичной системе исчисления. Основным узлом двоичного счетчика (служащим также его разрядом) является триггер со счетным запуском, осуществляющий подсчет импульсов по модулю 2.

Многоразрядные двоичные суммирующие счетчики с непосредственной связью выполняются путем последовательного соединения счетных триггеров. Счетные импульсы подаются на счетный вход первого триггера. Счетные входы последующих триггеров связаны непосредственно с прямыми выходами предыдущих триггеров: вход второго триггера соединен с выходом первого триггера, вход третьего – с выходом второго и т.д.

Принцип действия двоичного счетчика с непосредственной связью рассмотрим на примере трехразрядного счетчика, показанного на рисунке 35.1а. Схема выполнена на счетчиках T_1 -триггера с внутренней задержкой. Работу схемы иллюстрируют временные диаграммы, приведенные на рисунке 35.1б.

Перед поступлением счетных импульсов все разряды счетчика устанавливаются в состояние «0» ($Q_1 = Q_2 = Q_3 = 0$) подачей импульса на вход «Установка нуля». При поступлении первого счетного импульса первый разряд подготавливается к переключению в противоположное состояние и после окончания действия входного импульса переходит в состояние $Q_1 = 1$. В счетчик записывается число 1. Уровень 1 с выхода Q_1 воздействует на счетный вход второго разряда, подготавливая его к переключению. По окончании второго счетного импульса первый разряд счетчика переходит в состояние «0», а второй разряд переключается в состояние «1». В счетчике записывается число 2 с кодом 010.

Подобным образом осуществляется работа схемы с приходом последующих импульсов. Первый разряд счетчика, как видно из рисунка 35.1б, переключается с приходом каждого входного импульса, второй разряд – каждого второго, а третий разряд срабатывает на каждый четвертый счетный импульс.

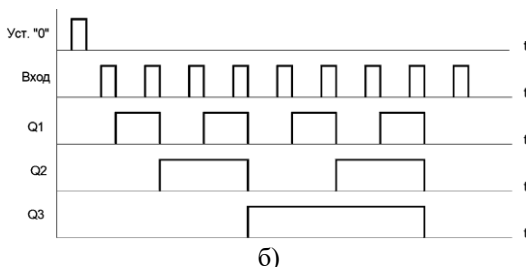
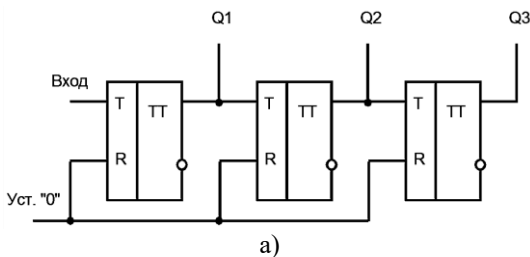


Рис. 35.1. Схема двоичного трехразрядного счетчика с непосредственной связью:

а – схема счетчика; б – временные диаграммы работы счетчика

В процессе работы двоичного счетчика частота следования импульсов на выходе каждого последующего триггера уменьшается вдвое по сравнению с частотой его входных импульсов (рис. 35.1, б). Это свойство схемы используют для построения делителей частоты. При использовании схемы в качестве делителя частоты входной сигнал подают на счетный вход первого триггера, а выходной снимают с последнего триггера. Выходная и входная частоты связаны соотношением

$$f_{\text{ВЫХ}} = \frac{f_{\text{ВХ}}}{f_{\text{сч}}}, \text{ Гц.} \quad (35.1)$$

Десятичные счетчики. Счетчики с $K_{\text{сч}} = 10$ называют десятичными или декадными. Они нашли широкое применение для регистрации числа импульсов с последующим визуальным отображением результата.

Для построения счетчика с $K_{\text{сч}} = 10$ необходимо иметь 4-х разрядный двоичный счетчик, число состояний которого следует уменьшить с 16 до 10. Счетная последовательность десятичного счетчика может быть представлена в двоично-кодированном десятичном коде ($Q_4 Q_3 Q_2 Q_1 - 8-4-2-1$), в котором каждая десятичная

цифра кодируется 4-х разрядным числом. Счетная последовательность суммирующего десятичного счетчика в этом случае совпадает с двоичной последовательностью от 0000 до 1001, после чего следует 0, и последовательность повторяется.

Последовательное соединение двух схем десятичного счета дает пересчет на 100, трех – на 1000 и т.д. Первая декада производит счет единиц входных импульсов от 0 до 9. Десятый импульс устанавливает разряды первой декады в состояние «0», а формируемый на его выходе импульс записывает «1» во вторую декаду, что соответствует числу 10. Вторая декада считает десятки (от 10 до 90), третья – сотни (от 100 до 900) и т. д.

Вычитающие и реверсивные двоичные счетчики. В вычитающих счетчиках с приходом очередного счетного сигнала предыдущий результат уменьшается на единицу. В вычитающем двоичном n -разрядом счетчике реализуется счетная последовательность чисел, начиная с (2^{n-1}) и заканчивая нулем «0». Очередное число в этой последовательности получается вычитанием единицы из предыдущего числа. После получения значения «0» последовательность повторяется.

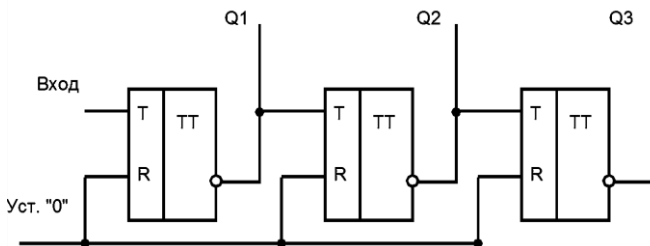


Рис. 35.2. Схема вычитающего счетчика с последовательной передачей переносов

Вычитающий счетчик в отличие от суммирующего строится так, что со входом каждого последующего триггера соединяется инверсный выход предыдущего триггера. Схема вычитающего счетчика с последовательной передачей переносов приведена на рисунке 35.2.

В *реверсивном счетчике* объединяются схемы суммирующего и вычитающего счетчиков. Кроме того, существует возможность управления направлением счета, для чего предусматривается дополнительное цифровое устройство.

Для счетных сигналов в этом счетчике предусмотрены два входа. Если счетчик работает как суммирующий, сигналы счета следует подавать на вход «+1». Для вычитающего счетчика сигналы счета подаются на вход «-1». На входе счетчика, обозначенном «>15», сигнал появляется при переходе счетчика в состояние с номером 15, в котором все триггеры установлены в состояние «1». На этом выходе формируется сигнал переноса в следующий счетчик. На выходе сигнал «<0» появляется при заполнении счетчика нулями. Схема такого счетчика приведена на рисунке 35.3.

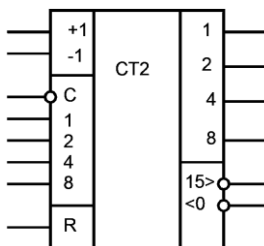


Рис. 35.3. Структурная схема реверсивного счетчика

Дешифраторы. Дешифраторами называют комбинационную логическую схему, в которой каждой из комбинаций сигналов на входах соответствует сигнал только на одном из его выходов. Они находят применение в управляющих системах для выдачи управляющих воздействий в те или иные цепи в зависимости от комбинации сигналов на входах. Широко распространены дешифраторы для преобразования кодов, например, двоичного или двоично-десятичного в десятичный или код семи-сегментных индикаторов.

На рисунке 35.4 показано условное обозначение дешифратора КР514ИД2, служащего для преобразования двоично-десятичного кода в код семисегментных знаковосинтезирующих индикаторов.

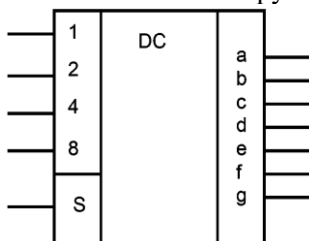


Рис. 35.4. Структурная схема дешифратора марки КР514ИД2

Задание. Изучить устройство и принцип действия счетчиков и дешифраторов. Провести исследования принципов работы вышеперечисленных устройств. Снять и зарисовать осциллограммы входных и выходных сигналов обоих устройств, составив из них диаграммы. Проанализировать результаты эксперимента и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему для исследования счетчика, представленную на рисунке 35.5. Подать напряжение питания +5 В. На входе «С» должна быть логическая «1».

2) Обнулить счетчик, подав с помощью кнопки S3 единичный сигнал на вход R-счетчика.

3) Подавая с помощью кнопки S2 одиночные импульсы на вход «+1» счетчика составить таблицу состояний кода на выходах $Q_0...Q_3$ от количества поданных импульсов. Выходной код фиксируется по индикаторам Н4-Н7.

4) По заданию преподавателя установить код на входах $D_0...D_3$ и записать заданное число в счетчик, кратковременно подав на вход «С» уровень логического нуля.

5) Повторить действия, указанные в п. 3, начиная счет с предварительно записанного числа.

6) Подать на вход «+1» счетчика прямоугольные импульсы от генератора ГС2 и зарисовать осциллограммы входных, выходных $Q_0...Q_3$ импульсов и импульсов с выхода переноса в старший разряд «>9». При оформлении осциллограмм необходимо учесть состояния входа и выходов в определенный момент времени.

7) Повторить действия, указанные в пп. 2-6, подавая входные импульсы на вход «-1».

8) Исследования интегрального дешифратора D4 проводятся совместно со схемой счетчика D3 и индикатора Н12. Подать на вход дешифратора нулевой двоичный код, обнулив счетчик.

9) Подавая на вход «+1» счетчика одиночные импульсы составить таблицу состояний дешифратора, т.е. зависимость состояний выходов 0-9 от двоичного кода на входе. Состояние выходов дешифратора определяется по свечению соответствующей цифры на индикаторе Н12.

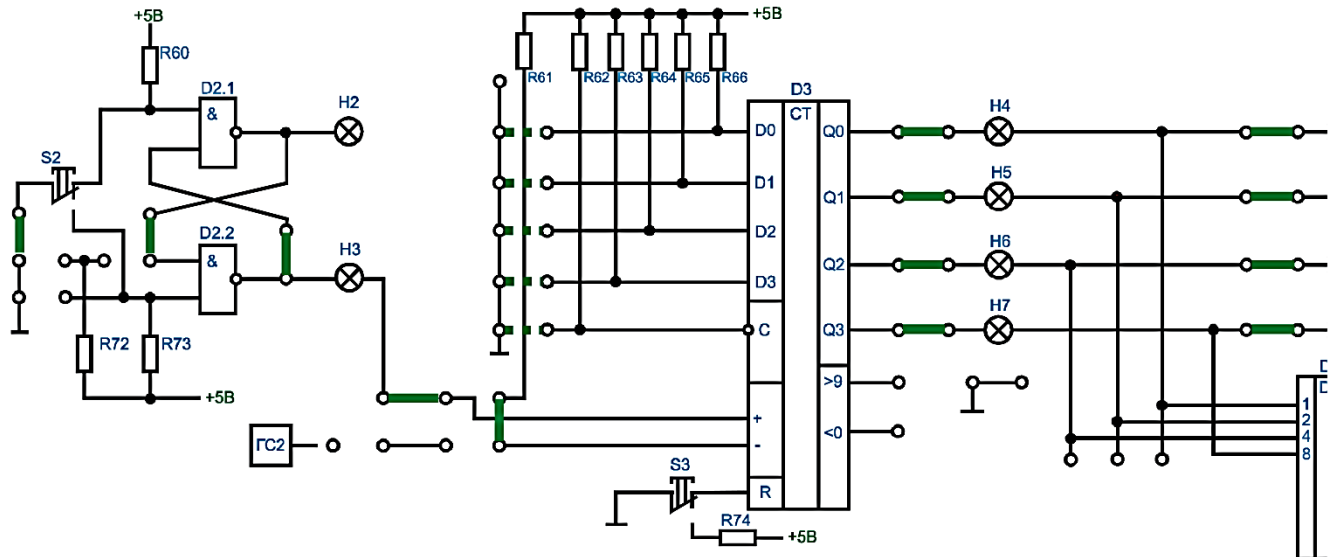


Рис. 35.5. Схема подключения счетчика и дешифратора

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислить основные признаки классификации счетчиков.
2. Назвать и дать краткую характеристику методов организации переноса в счетчиках.
3. В чем отличие двоичных счетчиков от двоично-десятичных?
4. Привести пример схемы организации счетчика с произвольным коэффициентом деления.
5. Назначение дешифраторов.

Лабораторная работа №36

Исследование аналого-цифровых преобразователей

Цель работы: изучить назначение, устройство, структурные схемы, принципы построения и действия аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Исследовать их характеристики и режимы работы.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) на дискретных элементах. Схема АЦП зависит от метода преобразования и способа его реализации. Можно выделить следующие методы построения АЦП:

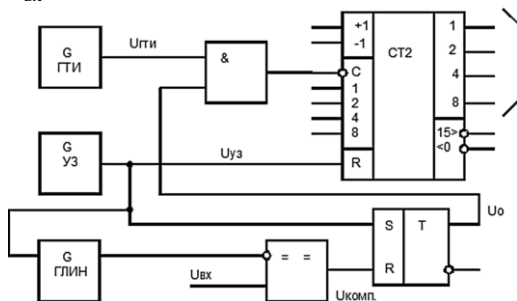
- ✓ временного преобразования;
- ✓ последовательного счета;
- ✓ последовательного приближения;
- ✓ параллельного преобразования.

В схеме временного преобразования (рис. 36.1) значению аналогового входного напряжения $U_{вх}$ ставится в соответствие временной интервал, длительность которого пропорциональна $U_{вх}$. Этот интервал заполняется импульсами стабильной частоты, количество которых и является цифровым эквивалентом преобразуемого напряжения.

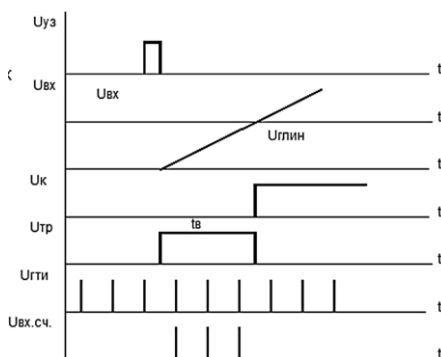
Работа схемы заключается в следующем. Выходной импульс узла запуска УЗ обнуляет счетчик, устанавливает RS-триггер в состояние «1» и запускает генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН). При наличии логической единицы на прямом выходе триггера выходные импульсы генератора тактовых импульсов (ГТИ) через схему совпадения «И» подаются к выходу счетчика. Когда напряжение на выходе ГЛИН станет равным $U_{вх}$ (рис. 36.1, а, $U_{вх} = const$), на выходе компаратора появляется логическая «1», которая переключает триггер в «0» состояние и прерывает связь счетчика с ГТИ. Длительность положительного импульса $t_{в}$ на выходе триггера (рис. 36.1, б) пропорциональна $U_{вх}$, следовательно, при неизменной частоте ГТИ код, установившийся на выходе счетчика, является цифровым эквивалентом величины $U_{вх}$.

В АЦП последовательного счета (рис. 36.2) к выходу счетчика подключается ЦАП, преобразующий код в аналоговый сигнал. Этот аналоговый сигнал сравнивается с входным напряжением на

компараторе, выходной сигнал которого через логический элемент «И» разрешает или запрещает прохождение на вход счетчика импульсов от генератора тактовых импульсов. Выходной код счетчика при этом является цифровым эквивалентом напряжения на входе ЦАП, т.е. $U_{вх}$.



а)



б)

Рис. 36.1. Схема АЦП последовательного счета с временным преобразованием:
а – схема АЦП; б – временная диаграмма

В описанных АЦП значение выходного кода в процессе преобразования многократно изменяется. Эти АЦП имеют низкое быстродействие, так, например, для получения 10 разрядов выходного кода требуется время 1024 тактовых интервалов (время преобразования $t = 1024 T_{гти}$). В общем случае время преобразования непостоянно и зависит от $U_{вх}$.

Более быстродействующими являются *АЦП последовательного приближения* (рис. 36.3), в которых формируемый выходной код последовательно приближается к своему полному выражению: в начале определяется цифра в старшем n -ом разряде, а затем в $(n-1)$ и т. д., завершая младшим (первым) разрядом. Работа такого преобразователя основана на свойствах натурального двоичного кода: веса единиц в соседних разрядах отличаются вдвое; единица в старшем n -ом разряде имеет вес, больший половины веса всего кода, единица в следующем $(n-1)$ разряде имеет вес, больший четверти веса всего кода и т.д.

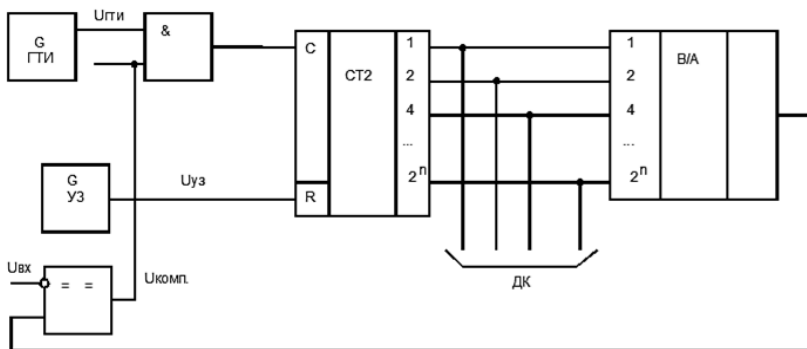


Рис. 36.2. Схема АЦП

На рисунке 36.3 представлена упрощенная схема АЦП последовательного приближения.

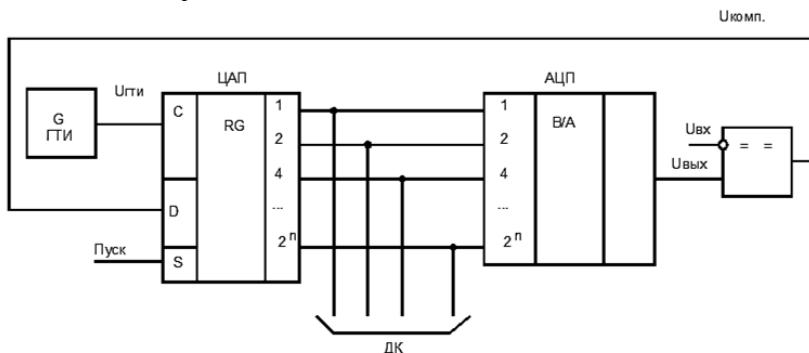


Рис. 36.3. Упрощенная схема АЦП последовательного приближения

После поступления импульса «ПУСК» на регистр последовательного приближения РПП на выходе его старшего n -го разряда появляется напряжение логической «1», а на остальных выходах – «0». На выходах ЦАП формируется напряжение $U_{\text{вых}} = 0,5U_{\text{вх макс}}$, которое на входах компаратора сравнивается с $U_{\text{вх}}$. Если $U_{\text{вх}} > U_{\text{вых}}$, то под действием импульса ГТИ появляется единица на выходе $(n-1)$ разряда РПП и сохраняется единица в старшем разряде. Если $U_{\text{вх}} < U_{\text{вых}}$, то при появлении единицы в $(n-1)$ разряде РПП содержание предыдущего старшего разряда обнуляется. Так перебираются все разряды до самого младшего. После выполнения последнего n -го сравнения цикл формирования выходного кода заканчивается. Состояние РПП соответствует цифровому эквиваленту входного напряжения. Если, например, $U_{\text{вх}} = U_{\text{вх макс}}$, то комбинация выходного кода равна 11-1 (все единицы). В рассмотренном АЦП время преобразования t постоянно и определяется числом разрядов n и тактовой частотой $f_{\text{ГТИ}} = 1/T_{\text{ГТИ}}$ ($t_n = n \cdot T_{\text{ГТИ}}$). Рассмотренные АЦП широко используются, так как обладают достаточно высоким быстродействием, при относительно простой структуре.

Самым быстродействующим является АЦП параллельного действия (рис. 36.4).

Его основные элементы – 2^{n-1} компараторов напряжения. На один из двух входов каждого компаратора (инвертирующий вход) подается индивидуальное опорное напряжение $U_{\text{оп}}$, сформированное резистивным делителем напряжения. Разность между опорными напряжениями двух ближайших компараторов $\Delta U = U_{\text{оп}}/2$.

Другие входы компараторов (неинвертирующие) – объединены, и на них подается входной сигнал. На тех компараторах, где $U_{\text{вх}}$ больше, чем соответствующее напряжение с делителя, на выходе будет логическая единица «1», а на остальных – логический ноль «0». Тактовым импульсом информация с выходов компараторов передается шифратору СД, который преобразует выходные сигналы компараторов в двоичный код. При поступлении управляющего импульса УИ на вход шифратора сформированный двоичный код передается на выход преобразователя. Преобразование производится за два такта и время преобразования равно $t_{\text{пр}} = (10-100)$ нс. Недостатком такого преобразователя являются сложность (требуется большое число компараторов, которое

быстро возрастает с ростом числа разрядов n АЦП), большое энергопотребление от источника питания.

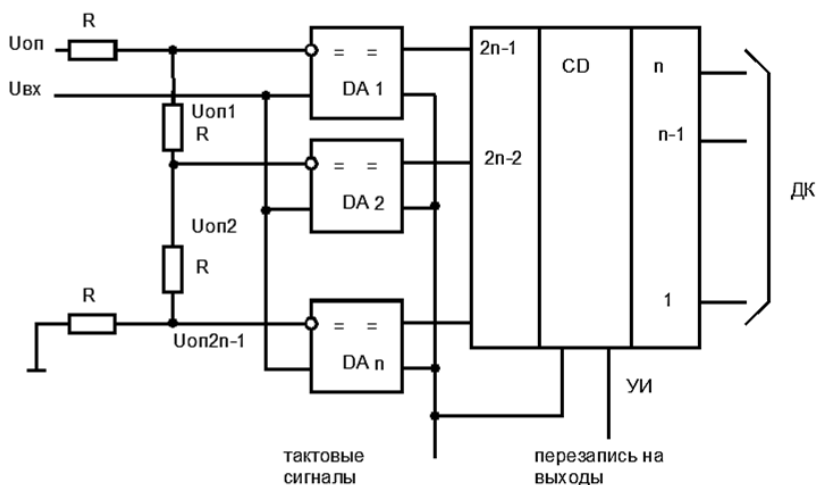


Рис. 36.4. Схема АЦП параллельного действия

К схемам АЦП без применения ЦАП относятся *АЦП двойного интегрирования*. Способ двойного интегрирования позволяет хорошо подавлять сетевые помехи; кроме того, для построения схемы не требуется ЦАП с высокоточными резистивными матрицами. Функциональная схема АЦП двойного интегрирования напоминает схему АЦП последовательного счета, в которой вместо ЦАП применен интегратор.

АЦП в интегральном исполнении. В настоящее время выпускаются несколько типов АЦП в интегральном исполнении. Широко используются АЦП 572-й КМОП серии – КР572ПВ2, основная схема включения которого приведена на рисунке 36.5.

При подключении трех внешних резисторов и пяти конденсаторов КР572ПВ2 выполняет функцию АЦП, работающего по принципу двойного интегрирования с автоматической коррекцией нуля и автоматическим определением полярности входного сигнала. Для задания тактовой частоты $f_{\text{такт}}$, номинал C_5 можно определить по формуле

$$C_5 = \frac{0,45}{f_{\text{такт}} R_3}, \text{ мкФ.} \quad (36.1)$$

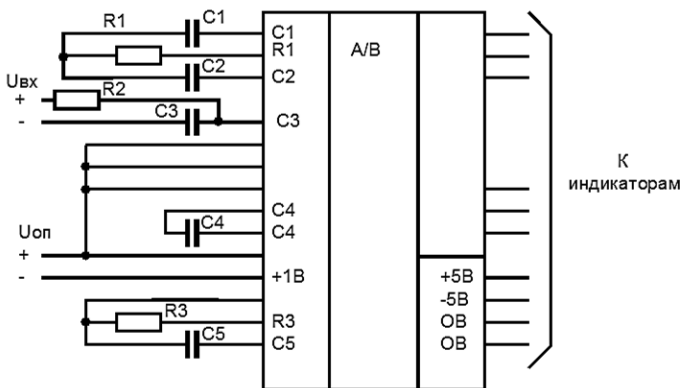


Рис. 36.5. Схема АЦП в интегральном исполнении

Для повышения стабильности тактовой частоты может быть использован кварцевый резонатор, подключенный между выводами 39 и 40, при этом C_5 и R_3 не используют.

Задание. Изучить устройство, схемы подключения и принципы работы АЦП всех представленных типов. Провести исследование принципов действия и временных диаграмм АЦП. Зарисовать осциллограммы входных и выходных сигналов. Снять характеристику АЦП по входному напряжению. Проанализировать результаты исследований и сделать выводы по работе.

Порядок выполнения работы.

1) Собрать схему АЦП, представленную на рисунке 36.6. Залить ОУ двухполярным источником питания, а цифровые микросхемы – источником +5 В.

2) Исследовать работу АЦП, задавая входное напряжение от источника ИПН2 и определить диапазон изменения преобразуемого напряжения при котором не происходит переполнение АЦП. Входное напряжение замеряется с помощью вольтметра $\nu V1$ (или внешнего), а выходной сигнал АЦП снимается с индикатора Н12 в десятичном коде.

3) Изменяя $U_{вх}$ на АЦП в определенном диапазоне составить таблицу преобразования входного напряжения в код.

4) По результатам исследования определить параметры исследуемого АЦП.

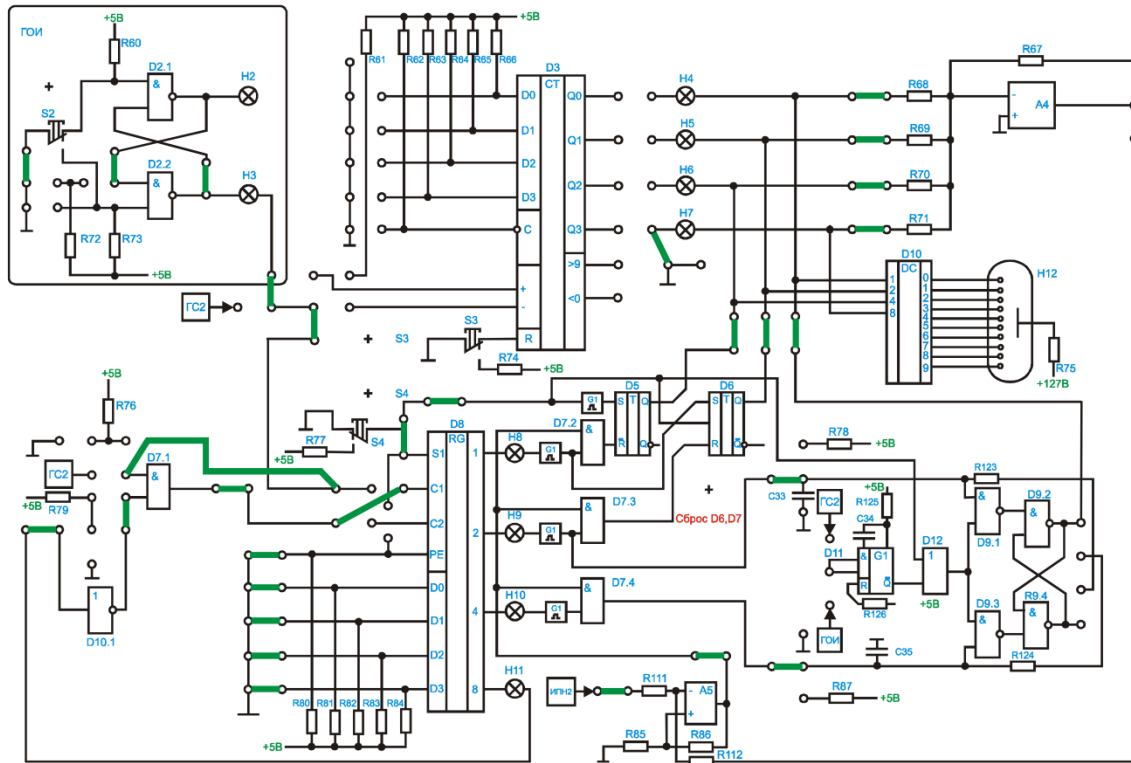


Рис. 36.6. Схема подключения исследуемого АЦП

Вопросы для самоконтроля

1. Пояснить принцип работы АЦП.
2. Каковы особенности работы АЦП последовательного счета.
3. Пояснить работу АЦП временного преобразования и АЦП последовательного приближения, особенности работы АЦП параллельного действия.
4. Назовите особенности применения АЦП в интегральном исполнении на примере АЦП КР572ПВ2.
5. Проведите сравнительную оценку всех разновидностей АЦП.

Рекомендуемая литература

1. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учебное пособие. – 6-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2008. – 592 с. : ил.

2. Башарин, С. А. Теоретические основы электротехники. Теория электрических цепей и электромагнитного поля : учебное пособие / С. А. Башарин, В. В. Федоров. – 2-е изд., стер. – М. : Издательский центр «Академия», 2007. – 304 с. : ил.

3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник. – 11-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 2007. – 701 с. : ил.

4. Бычков, Ю. А. Основы теоретической электротехники : учебное пособие / Ю. А. Бычков, В. М. Золотницкий, Э. П. Чернышев, А. Н. Белянин. – СПб. : Лань, 2008. – 590 с. : ил.

5. Лоторейчук, Е. А. Теоретические основы электротехники : учебник. – М. : ИД «Форум», ИНФРА-М, 2009. – 320 с. : ил.

6. Нефедова, Н. В. Карманный справочник по электронике и электротехнике / Н. В. Нефедова, П. М. Каменев, О. М. Большунова. – 2-е изд. – Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. – 283 с. : ил.

7. Прянишников, В. А. Теоретические основы электротехники : курс лекций. – СПб. : КОРОНА принт, 2007. – 368 с. : ил.

8. Васильев, С.И. Электротехника и электроника : практикум. Ч. 1. Линейные электрические цепи / С. И. Васильев, И. В. Юдаев. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2016. – 133 с.

Алфавитно-предметный указатель

R

RC-автогенераторы · 204

A

Автогенераторы гармонических колебаний (АГК) · 203
Автоколебательные генераторы прямоугольных импульсов · 209
Активные фильтры · 156
Активный двухполюсник · 14
Активный элемент (АЭ) · 203
Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) на дискретных элементах · 237

B

Вектор индуктивного падения напряжения · 66
Векторная диаграмма · 22
Вычитающие двоичные счетчики · 232

Г

Гармоника · 72, 77, 78, 153
Генератор · 4, 5, 6, 7, 8, 28, 31, 37,

116, 118, 119, 172, 180, 183, 184, 186, 190, 191, 200, 201, 204, 206, 207, 208, 215, 234, 237, 238, 251

Д

Двигатели независимого возбуждения · 131
параллельного возбуждения · 131
последовательного возбуждения · 131
смешанного возбуждения · 131
Двоичные суммирующие счетчики с непосредственной связью · 230
Десятичные счетчики · 231
Дешифраторы · 233
Дизъюнкция · 166
Докоммутационные значения токов · 97

Ж

Ждущие мультивибраторы · 210

З

Законы коммутации · 91

И

Изоляция · 38, 84, 122, 125, 126, 129, 130

Импульсные блоки питания (ИБП) · 83

Инвертирующий усилитель · 188

Индуктивность · 19, 23, 57, 64, 68, 84

Интегральные компенсационные стабилизаторы (ИКС) · 145

К

Катушка · 57, 58, 59, 61, 63, 65, 68, 69, 104, 105, 107, 108, 109, 125

Компаратор · 193, 194, 195

Компенсационный стабилизатор напряжения (КСН) · 141

Конденсатор · 98, 103, 107, 110, 113, 153, 155, 211

Конъюнкция · 167

Короткое замыкание · 4, 5, 6, 7, 14, 17, 54, 55, 68, 146, 148

Коэффициент мощности · 21, 22, 24, 25, 26, 31, 112

полезного действия · 16, 141

Л

Линия электропередачи (ЛЭП) · 19

Логическая связь

ИЛИ · 166

И · 167

ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ · 167

НЕ · 166

Логические элементы · 165, 196

Люминесцентная лампа · 85

М

Магнитная система · 122, 123

Магнитный поток · 45, 57

Метод наложения · 11, 13

Механическая система · 122, 126

Механическая характеристика · 133

Мостовая схема · 4, 149

Мощность · 11, 14, 15, 18, 21, 23, 59, 61, 62, 75, 111, 112, 113, 118, 120, 134, 148, 152

Н

Нагрузка · 4, 5, 7, 8, 14, 15, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 40, 42, 46, 68, 69, 84, 115, 118, 122, 127, 136, 137, 138, 139, 141, 145, 146, 148, 154, 155, 156, 157, 163, 164, 186, 187

Неинвертирующий усилитель · 189

Несимметричные системы (напряжений или токов) · 43

Несинусоидальный ток · 3, 71, 75

Неуправляемые выпрямители · 149

О

Одновибратор · 211
Операционный усилитель (ОУ) · 187
Осциллограмма · 73, 80, 86, 93, 95

П

Параллельно-последовательные и реверсивные регистры · 218
Пассивные фильтры · 152
Первый закон Кирхгофа · 27, 38
Передаточные или взаимные проводимости · 10
Переходные процессы · 89, 91
Периодические несинусоидальные токи · 76
Полная мощность · 16, 118, 120
Послекоммутационные значения токов · 97
Принцип наложения · 9
независимости действия ЭДС · 9

Р

Рабочие характеристики двигателя · 133
Реверсивный счетчик · 232
Регистры
памяти · 216
сдвига · 217
Резонанс токов · 22
Реле времени · 100, 101, 102, 174,

175

Ротор · 111, 114, 115

С

Сердечник · 57, 65
Симметричная система векторов · 28
Симметричный режим
первый · 46
второй · 46
третий · 46
Система нулевой последовательности · 44
охлаждения · 122, 126
регулирования напряжения · 122, 127
Собственные или входные проводимости ветвей · 9
Сопrotивление ·
активное · 19
индуктивное · 20
удельное · 19
электрическое · 19
Статор · 110, 111, 115, 116, 118
Сумматор по модулю 2 · 167
Схема
«звезда» · 27, 30, 31, 37, 38, 46, 111, 251
«треугольник» · 32, 33, 34, 35, 42, 251
временного преобразования · 237
Греца · 150, 151
защиты стабилизаторов от перегрузок · 145

Счетчики импульсов · 196, 197, 229

Т

Тепловые потери · 23, 59

Транзистор · 142, 145

Трансформатор · 65, 120, 122

Трансформаторные блоки питания ·
82

Трехфазная система · 37, 38, 43

Трехфазный асинхронный
электродвигатель · 110

Триггеры · 176, 178

Триггер Шмидта · 194

T-триггер · 178, 180

D-триггер · 178

R-S-триггер · 176

У

Управляемые выпрямители · 151

Ф

Феррорезонанс · 103, 107

Х

Холостой ход · 4, 5, 6, 14, 17, 54, 55,
60, 68, 69, 118

Ц

Цепь · 2, 3, 9, 27, 32, 41, 49, 57, 58,
60, 65, 68, 71, 73, 84, 87, 88, 92,
96, 103, 245, 251

Цифро-аналоговые
преобразователи (ЦАП) · 223

Цифровая обработка информации ·
196, 229

Ч

Частотно-избирательный
четыреполюсник (ЧИЧ) · 203

Четыреполюсник · 48

Ш

Широтно-импульсный
преобразователь (ШИП) · 182

Э

Электрическая
система · 122, 124
цепь · 4, 6, 8, 9, 11, 14, 29, 48, 57,
68, 71, 76, 89, 96, 103, 107

Элемент

Пирса · 168

Шеффера · 169

Оглавление

Предисловие	3
<i>Лабораторная работа №1.</i> Исследование эквивалентного генератора постоянного тока.....	4
<i>Лабораторная работа №2.</i> Исследование характеристик ЛЭЦПТ методом наложения токов.....	9
<i>Лабораторная работа №3.</i> Исследование процесса передачи мощности от активного двухполюсника к нагрузке.....	14
<i>Лабораторная работа №4.</i> Исследование характеристик линии электропередачи синусоидального тока.....	19
<i>Лабораторная работа №5.</i> Исследование ЛЭЦ трехфазного тока, соединенной по схеме «звезда» с нулевым проводом.....	27
<i>Лабораторная работа №6.</i> Исследование ЛЭЦ трехфазного тока, соединенной по схеме «треугольник», при изменении характера нагрузок в фазах.....	32
<i>Лабораторная работа №7.</i> Исследование влияния характера фазных нагрузок на ток нулевого провода.....	37
<i>Лабораторная работа №8.</i> Изучение методики анализа несимметричных систем методом симметричных составляющих.....	43
<i>Лабораторная работа №9.</i> Исследование пассивного взаимного четырехполюсника.....	48
<i>Лабораторная работа №10.</i> Исследование индуктивно-связанных цепей.....	57
<i>Лабораторная работа №11.</i> Исследование характеристик трансформатора без стального сердечника.....	65
<i>Лабораторная работа №12.</i> Исследование ЛЭЦ периодического несинусоидального тока.....	71
<i>Лабораторная работа №13.</i> Исследование характеристик ЛЭЦПНТ графоаналитическим методом.....	76
<i>Лабораторная работа №14.</i> Исследование энергосберегающих источников света с импульсными блоками питания.....	82
<i>Лабораторная работа №15.</i> Исследование переходных процессов в ЛЭЦ.....	89
<i>Лабораторная работа №16.</i> Исследование характеристик переходного процесса зарядки конденсатора при ограничении тока.....	96
<i>Лабораторная работа №17.</i> Исследование феррорезонанса напряжений.....	103
<i>Лабораторная работа №18.</i> Исследование феррорезонанса токов..	107
<i>Лабораторная работа №19.</i> Исследование схем подключения и характеристик трехфазного асинхронного электродвигателя в однофазном режиме.....	110

<i>Лабораторная работа №20. Исследование трехфазного трансформатора.....</i>	120
<i>Лабораторная работа №21. Исследование электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением.....</i>	131
<i>Лабораторная работа №22. Исследование параметрического стабилизатора напряжения.....</i>	138
<i>Лабораторная работа №23. Исследование компенсационного стабилизатора напряжения.....</i>	141
<i>Лабораторная работа №24. Исследование управляемого тиристорного выпрямителя и сглаживающих фильтров.....</i>	149
<i>Лабораторная работа №25. Исследование логических элементов..</i>	165
<i>Лабораторная работа №26. Исследование транзисторного реле с времязадающей RC-цепью.....</i>	174
<i>Лабораторная работа №27. Исследование триггеров на логических элементах.....</i>	176
<i>Лабораторная работа №28. Исследование широтно-импульсного преобразователя напряжения.....</i>	182
<i>Лабораторная работа №29. Исследование операционного усилителя и вычислительных схем на его основе.....</i>	187
<i>Лабораторная работа №30. Исследование компаратора, триггера Шмидта и цифровых счётчиков в интегральном исполнении.....</i>	193
<i>Лабораторная работа №31. Исследование автогенератора.....</i>	203
<i>Лабораторная работа №32. Исследование мультивибратора.....</i>	209
<i>Лабораторная работа №33. Исследование регистров в интегральном исполнении.....</i>	216
<i>Лабораторная работа №34. Исследование цифро-аналоговых преобразователей.....</i>	223
<i>Лабораторная работа №35. Исследование счетчиков импульсов и дешифраторов.....</i>	229
<i>Лабораторная работа №36. Исследование аналого-цифровых преобразователей.....</i>	237
<i>Рекомендуемая литература.....</i>	245
<i>Алфавитно-предметный указатель.....</i>	246

Учебное издание

**Васильев Сергей Иванович
Юдаев Игорь Викторович
Машков Сергей Владимирович**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие

Технический редактор, компьютерная вёрстка О. Ю. Богачева

Подписано в печать 18.01.2017. Формат 60×841/16

Усл. печ. л. 14,65, печ. л. 15,75.

Тираж 500. Заказ №.

Редакционно-издательский отдел ФГБОУ ВО Самарской ГСХА

446442, Самарская область, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2

Тел.: (84663) 46-2-47

Факс 46-6-70

Е-mail: ssaariz@mail.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «Медиа-Книга»

443070, г. Самара, ул. Песчаная, 1, оф. 310

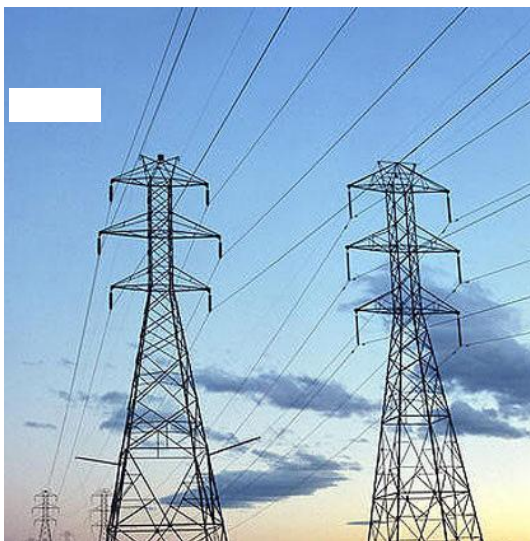
Тел. (846) 267-36-82. Е-mail: izdatkniga@yandex.ru

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

М. А. Кузнецов, П. В. Крючин, М. Р. Фатхутдинов

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Практикум



Кинель 2015

УДК 631.371(07)
ББК 40.76(07)
К75

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. кафедры «Энергетика» Азово-Черноморского
инженерного института ФГБОУ ВО Донского ГАУ

И. В. Юдаев;

канд. техн. наук, начальник Кинельского отделения ПАО «Самараэнерго»

О. В. Мушкатов

Кузнецов, М. А.

К75 Релейная защита : практикум / М. А. Кузнецов, П. В. Крючин,
М. Р. Фатхутдинов. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2015. – 110 с.

ISBN 978-5-88575-396-8

Практикум содержит теоретический материал и рекомендации по выполнению практических занятий по дисциплине «Релейная защита».

Предназначен для бакалавров, обучающихся по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».

ISBN 978-5-88575-396-8

УДК 631.371(07)
ББК 40.76(07)

© Кузнецов М. А., Крючин П. В., Фатхутдинов М. Р., 2015
© ФГБОУ ВО Самарская ГСХА, 2015

ПРЕДИСЛОВИЕ

Релейная защита – неременная и обязательная составная часть всех электроэнергетических объектов, установок, систем, имеющая особое и самостоятельное функциональное назначение.

Релейная защита формирует базовую подготовку специалиста по системам электроснабжения.

Практикум «Релейная защита» знакомит обучающихся с существующими устройствами релейной защиты и автоматики, управления, сигнализации и телемеханики.

Цель издания – помочь студентам приобрести практические навыки в проведении моделирования, освоить методики расчета уставок защит объектов, способов настройки и проверки релейной защиты.

Пособие «Релейная защита» содержит большое количество схем, позволяющих лучше усвоить принцип действия релейной защиты.

Контрольные вопросы после каждой практической работы позволяют проверить знания обучающихся.

В процессе изучения данного практикума у студентов должны формироваться следующие профессиональные компетенции:

- ✓ готовность к использованию технических средств автоматики и систем автоматизации технологических процессов;
- ✓ способность и готовность анализировать научно-техническую информацию;
- ✓ способность контролировать режимы работы оборудования объектов электроэнергетики;
- ✓ готовность к участию в проектировании технических средств и технологических процессов производства, систем электрофикации и автоматизации сельскохозяйственных объектов;
- ✓ способность осуществлять оперативные изменения схем, режимов работы энергообъектов.

МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕМ

При работе на стендах необходимо соблюдать «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

При проведении практических работ сборка схем и изменения в исследуемых схемах проводятся только при отключенном напряжении питания.

К выполнению лабораторных работ допускаются лица, прошедшие инструктаж по технике безопасности.

При замене предохранителей или перед снятием задней стенки стенда необходимо отключить стенд от питающей сети.

Корпус стенда должен быть заземлен. Сопротивление контура заземления не более 4 Ом.

Включение питания стенда и выполнение работ производить только после разрешения преподавателя.

Лабораторно-практическая работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА (ТТ)

Цель работы: ознакомиться с конструктивными особенностями трансформаторов тока. Изучить сведения о трансформаторах тока, используемых в схемах релейной защиты. Провести испытание трансформаторов тока.

Измерительные приборы, аппараты релейной защиты и автоматики включают через измерительные трансформаторы тока. Они являются наиболее распространенной разновидностью первичных преобразователей тока и позволяют:

- 1) отделить первичные цепи защищаемых элементов от вторичных цепей измерения и контроля, что обеспечивает безопасность измерений и удобство обслуживания приборов и реле;
- 2) стандартизовать приборы и реле, рассчитывая их обмотки на определенный ток (номинальный вторичный ток трансформаторов тока обычно равен 5А);
- 3) защитить от протекания токов короткого замыкания (КЗ) непосредственно по последовательно включенным обмоткам измерительных приборов и реле;
- 4) существенно снизить сечение и стоимость контрольных кабелей и проводов;
- 5) устанавливать приборы и реле на значительном расстоянии от первичных цепей, в которых производятся измерения.

Принцип действия ТТ. Трансформатор тока состоит из замкнутого магнитопровода, на котором расположены первичная W_1 и вторичная W_2 обмотки. Первичная обмотка последовательно включается в контролируруемую цепь и обтекается током I_1 . Ко вторичной обмотке подключаются измерительные приборы и реле. Токковые обмотки измерительных приборов и реле включаются между собой, последовательно по ним протекает вторичный ток I_2 .

Для трансформаторов тока характерным является то, что число витков вторичной обмотки W_2 больше числа витков первичной обмотки W_1 , а значение первичного тока I_1 не зависит от нагрузки во вторичной цепи и определяется только параметрами и нагрузкой первичной цепи. Соответственно и магнитный поток первичной цепи Φ_1 создаваемый током I_1 остается постоянным

при изменениях во вторичной цепи. Сопротивление нагрузки вторичной цепи (токовые обмотки реле, приборов, соединительных проводов) невелико и поэтому трансформатор тока работает в режиме, близком к короткому замыканию.

Следует отметить, что под нагрузкой трансформаторов тока обычно понимают или полное сопротивление Z_H его внешней вторичной цепи (Ом), равное сумме сопротивлений всех последовательно соединенных обмоток приборов, и других элементов, а также соединительных проводов и контактов, или мощность (В·А), потребляемую нагрузкой

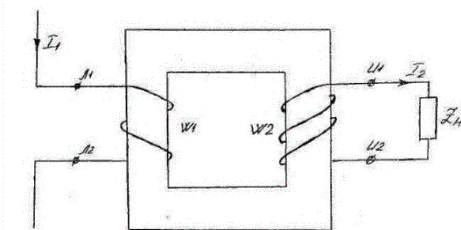


Рис. 1.1. Схема включения трансформатора тока

Работа трансформатора тока характеризуется уравнением намагничивающих сил, согласно которому намагничивающие силы (Н.С.) первичной I_1W_1 и вторичной I_2W_2 обмоток и создаваемые ими магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 геометрически складываются, создавая результирующий поток Φ_T в трансформаторе тока $I_1W_1 + I_2W_2 = I_{нам}W_1$ или $\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_T$.

Рабочий магнитный поток Φ_T пронизывает обе обмотки TT и наводит во вторичной обмотке электродвижущую силу (ЭДС) E_2 , которая создает в замкнутой цепи вторичной обмотки ток I_2 .

Магнитный поток Φ_T создается намагничивающей силой, равной $I_{нам}W_1$ иначе говоря, током намагничивания $I_{нам}$, который является частью первичного тока I_1 . Таким образом, во вторичный ток трансформируется лишь часть первичного тока:

$$I_2 = -(I_1/n_e - I_{нам}/n_e), \quad (1.1)$$

где $n_e = W_2/W_1$ – витковый коэффициент трансформации трансформатора тока.

В нормальном режиме при рабочих токах значение намагничивающего тока $I_{\text{нам}}$ невелико (0,5-3)% и поэтому коэффициент трансформации трансформатора тока можно определять как отношение первичного тока ко вторичному и он приблизительно равен витковому коэффициенту $n_s = I_1/I_2 \approx W_2/W_1$.

При расчетах релейной защиты, если ток намагничивания не превышает 10% первичного тока, коэффициент трансформации TT принимают равным $I_T = I_1/n_T$ и через него вычисляют вторичные токи (токи в реле) $I_2 = I_1/n_T$.

Погрешности трансформаторов тока. У трансформаторов тока различают три вида погрешностей: токовую, полную и угловую. Погрешности TT зависят от степени насыщения магнитопровода и тесно связаны друг с другом.

Наглядное представление о таком процессе дает схема замещения TT . В схеме замещения магнитная связь между обмотками заменяется электрической, а все первичные величины приведены к значениям вторичной стороны трансформатора тока через коэффициент трансформации $I'_1 = I_1/n_T$, $I'_{\text{нам}} = I_{\text{нам}}/n_T$.

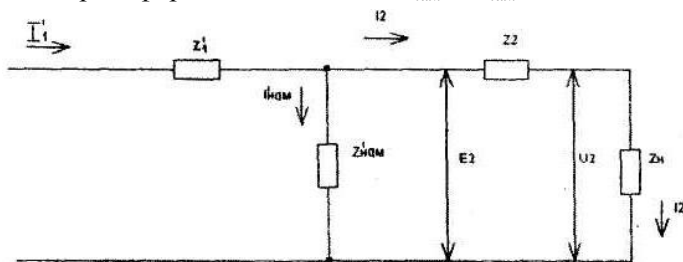


Рис. 1.2. Схема замещения трансформатора тока

Приведенные сопротивления первичной обмотки TT : $Z'_1 = Z_1/n_T^2$ и ветви намагничивания $Z'_{\text{нам}} = Z_{\text{нам}}/n_T^2$.

Чем больше значение первичного тока I_1 тем больше насыщение магнитопровода и тем меньше сопротивление ветви намагничивания $Z'_{\text{нам}}$. Вследствие этого тем больше будет ток в этой ветви $I'_{\text{нам}}$ и тем меньший ток I_2 попадает в нагрузку.

Из схемы замещения видно, что рост намагничивающего тока может произойти не только при глубоком насыщении магнитопровода, но и при непредусмотренном увеличении сопротивления

нагрузки Z_n . При этом происходит не только уменьшение тока I_2 , но и искажается форма кривой этого тока.

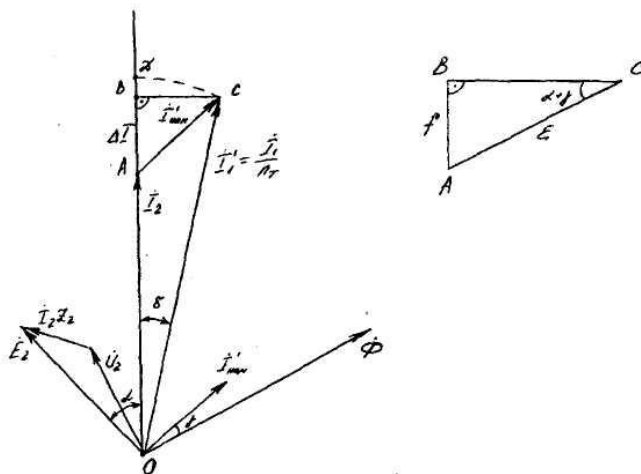


Рис. 1.3. Векторная диаграмма и «треугольник погрешностей» трансформатора тока

На основе схемы замещения строится векторная диаграмма трансформатора тока. При построении векторной диаграммы за исходный принят вектор вторичного тока I_2 .

Вектор напряжения U_2 на диаграмме опережает вектор вторичного тока I_2 на угол полного сопротивления вторичной нагрузки Z_n , $U_2 = I_2 \cdot Z_n$.

Электродвижущая сила вторичной обмотки отличается от U_2 за счет падения напряжения в сопротивлении вторичной обмотки оттока I_2 , $E_2 = U_2 + I_2 \cdot Z_n$. Вектор E_2 опережает I_2 на угол α . Вектор магнитного потока трансформатора Φ отстает от вектора наведенной им ЭДС на 90° . Намагничивающий ток трансформатора тока $I_{нам}$, создающий поток Φ , опережает последний на угол γ , обусловленный потерями в стали магнитопровода. Вектор приведенного первичного тока I_1' на диаграмме получен как сумма векторов вторичного тока I_2 и тока намагничивания $I_{нам}$, $I_1' = I_2 + I_{нам}$. Величина ΔI , равная арифметической разности между $I_1' = I_1/n_r$ и I_2 называется токовой погрешностью, (отрезок AD по векторной диаграмме) обозначается буквой f и вычисляется по формуле

$$f = ((I_2 + I_1')/I_1') \times 100, \% \quad (1.2)$$

где $I'_1 = I_1/n_T$,

отсюда

$$f = ((n_T \cdot I_2 - I_1)/I_1) \times 100.$$

Под угловой погрешностью понимается угол δ между векторами токов I_2 и I'_1 . Угловая погрешность δ показывает, насколько действительный ток I_2 сдвинут относительно «идеального тока» рассчитанного по формуле $I_2 = I_1/n_T$.

Абсолютное значение вектора тока намагничивания $I_{нам}$ (равного геометрической разности вектора приведенного первичного тока I'_1 и вектора действительного вторичного тока I_2) называется полной погрешностью TT , обозначается греческой буквой ε , выражается в процентах и вычисляется по формуле

$$\varepsilon = (|I_{нам}| / |I'_1|) \cdot 100, \% \quad (1.3)$$

где $|I_{нам}|$ и $|I'_1|$ – действующие значения тока намагничивания и приведенного первичного тока.

Из векторной диаграммы трансформатора тока видно, что при $\delta > 0$ всегда $\varepsilon > f$. Следует отметить, что при $\varepsilon < 10\%$ токовая погрешность $f < 9\%$, а угловая $\delta < 7^\circ$, что является допустимым для нормальной работы большинства защит.

Классы точности TT . Измерительные трансформаторы тока выпускаются пяти классов точности: 0,2; 0,5; 1; 3; 10. Указанные цифры представляют собой токовую погрешность в процентах от номинального тока при нагрузке первичных обмоток током 100÷120% для первых трех классов и 50-120% для двух последних. Для трансформаторов тока классов точности 0,2; 0,5 и 1 нормируется также и угловая погрешность.

Трансформаторы тока класса 0,2 используют для лабораторных измерений, класса 0,5 для включения счетчиков электроэнергии и проведения коммерческих расчетов, класса 1 и 3 для подключения других измерительных приборов и реле, класса 10 для питания токовых реле и оперативных цепей релейных защит.

Большинство трансформаторов тока выполняют с двумя сердечниками, на каждом из которых размещают свою вторичную обмотку. Первичная обмотка у них общая. Трансформаторы тока с двумя вторичными обмотками могут иметь как одинаковые, так и разные классы точности.

При разных классах точности, к одной обмотке с более высоким классом присоединяют измерительные приборы (обмотки для измерений), а к другой – реле защиты (обмотка для защиты).

Шкала номинальных токов первичных обмоток трансформаторов тока I_{n1} : 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 80; 100; 150; 250; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 1000 А и более.

Опасность размыкания вторичной обмотки ТТ. В нормальных условиях намагничивающий ток трансформатора тока мал (меньше 10%), так как он заранее подбирается таким по допустимому значению сопротивления нагрузки Z_n исходя из условия работы ТТ с малыми погрешностями.

При случайном размыкании вторичной обмотки первичный ток I_1 является током намагничивания и магнитный поток трансформатора Φ_T резко возрастает. В результате повышения потерь в стали магнитопровода (сердечника ТТ) происходит его сильный нагрев вплоть до пожара. При этом мгновенные значения, наведенные потоком Φ_T ЭДС E_2 могут оказаться очень большими опасными для изоляции ТТ и для жизни обслуживающего персонала, даже при нормальных рабочих токах, защищаемого элемента.

Поэтому при эксплуатации запрещается разрывать вторичную цепь работающего трансформатора тока, тем более что это может совпасть с режимом КЗ первичной цепи. Перед отключением какого-либо прибора от трансформатора тока необходимо предварительно замкнуть накоротко его вторичную обмотку и после этого отключить прибор или реле.

Обозначение выводов. При изготовлении трансформаторов тока выводы их первичной и вторичной обмоток условно обозначаются (маркируются) так, чтобы при помощи этих обозначений можно было определять направления вторичного тока по направлению первичного.

Выводы первичной обмотки могут обозначаться произвольно: один из них принимается за начало и обозначается буквой L_1 , а второй за конец обмотки и обозначается буквой L_2 . Маркировка выводов вторичной обмотки выполняется по следующему правилу. При прохождении тока в первичной обмотке от начала L_1 к концу L_2 за начало вторичной обмотки U_1 принимается тот ее вывод, из которого в этот момент ток вытекает в цепь нагрузки.

Соответственно второй вывод вторичной обмотки принимается за конец обмотки и обозначается буквой U_2 .

При таком обозначении выводов обмоток трансформатора ток в обмотке реле, подключенном к вторичной обмотке трансформатора тока, имеет такое же направление, как и в случае включения реле непосредственно в первичную цепь.

В условиях эксплуатации одноименные выводы обмоток определяют экспериментально. Для этой цели первичную обмотку замыкают на батарею постоянного тока и в момент замыкания первичной цепи наблюдают отклонение стрелки гальванометра, присоединенного к зажимам вторичной обмотки. При этом используется тот факт, что протекание к одноименному выводу одного контура тока, возрастающего по величине, вызывает повышение потенциала на одноименном выводе другого контура.

Характеристики намагничивания и вольтамперные характеристики трансформатора тока. В общем случае характеристика намагничивания (кривая намагничивания) представляет собой геометрическое место вершин петель гистерезиса и является зависимостью индукции B от напряженности H . Так как индукция пропорциональна электродвижущей силе E , а намагничивающая сила F пропорциональна току I , то для трансформатора тока используют более удобную для практических целей зависимость $E_2 = f(I_n)$. Характеристики такого вида приводятся в справочной литературе. Эти характеристики являются типовыми, и строятся на основании усредненных результатов специальных испытаний, трансформаторной стали на заводах изготовителей. Для построения типовой характеристики намагничивания необходимо, зная размеры магнитопровода и число витков вторичной обмотки, определить ЭДС E_2 в вольтах и ток намагничивания $I_{нам}$ в амперах, используя выражения:

$$E_2 = (E_1 \cdot S \cdot W) / 1000, \quad (1.4)$$

$$I_{нам}^1 = F \cdot (L/W), \quad (1.5)$$

где S – сечение магнитопровода $ТТ$, $см^2$,

L – средняя длина пути магнитного потока в магнитопроводе, $см$,

W – число витков вторичной обмотки.

В практике эксплуатации релейной защиты используются вольтамперные характеристики, представляющие зависимость на-

пряжения на вторичной обмотке $ТТ$ (U_2) от тока намагничивания ($I_{нам}$). $U_2 = f(I_{нам})$. Эта характеристика снимается при подаче регулируемого синусоидального напряжения на зажимы вторичной обмотки при разомкнутой первичной обмотке. Так как при этом U_2 больше E_2 за счет падения напряжения в сопротивлении Z_2 от тока намагничивания $I_{нам}$ вольтамперная характеристика располагается выше характеристики намагничивания. Характеристика намагничивания может быть построена по нескольким точкам вольтамперной характеристики. При этом величина E_2 для каждого значения $I'_{нам}$ определяется по выражению $E_2 = U_2 - I_{нам}Z_2$.

Для упрощения эта величина берется арифметической, что дает запас при расчетах погрешностей трансформаторов тока.

При снятии вольт-амперная характеристика (ВАХ) напряжения следует регулировать автотрансформатором типа ЛАТр. Рекомендуемые приборы вольтметр типа Ц4313, измеряющий среднее напряжение и амперметр – электромагнитный или электродинамический, позволяющий измерять действующее значение тока. Желательно снять ВАХ до насыщения магнитопровода $ТТ$, т.е. до перегиба ВАХ, или, по крайней мере, до значения $I_{нам} = 0,1I_{2расч.}$, где $I_{2расч.}$ – вторичный ток КЗ, при котором должна обеспечиваться точная работа $ТТ$.

Вольтамперная характеристика строится на миллиметровой бумаге. Исправность трансформатора тока оценивается сопоставлением построенной ВАХ с типовой характеристикой намагничивания или с ВАХ других $ТТ$ того же типа, класса и коэффициента трансформации.

При наличии виткового замыкания во вторичной обмотке $ТТ$, ВАХ резко снижается по сравнению с ВАХ исправного трансформатора тока и при этом резко уменьшается угол наклона ВАХ и горизонтальной оси.

Наличие вольтамперных характеристик позволяет решить вопрос о возможности совместного использования $ТТ$ в схемах дифференциальной токовой защиты. Чем ближе совпадают вольтамперные характеристики, тем меньше токи небаланса дифференциальной защиты.

Снятие ВАХ позволяют произвести расчет полной погрешности ϵ трансформатора тока. С этой точки зрения их использования предпочтительнее по сравнению с типовыми характеристиками намагничивания, поскольку за счет неоднородности стали

магнитопровода $ТТ$, возможно отклонение фактической характеристики от типовой до 20%.

Порядок выполнения работы:

- 1) изучите теоретический материал о трансформаторах тока;
- 2) проверьте правильность маркировки выводов $ТТ$;
- 3) снимите вольтамперную характеристику $ТТ$.

Работа выполняется на стенде СЭС-1-Н-К.

Проверка правильности заводской маркировки выводов трансформатора тока производится по схеме (рис. 1.4). В качестве источника постоянного тока можно использовать внутреннюю батарею комбинированного прибора Ц4313. Следует проследить, чтобы к выводам L_1 и L_2 трансформатора тока батарея и миллиамперметр были присоединены однополярными зажимами (прибор включается на измерении сопротивлений с множителем $\Omega \times I$, а выводу прибора соответствует положительный вывод источника питания). При правильной заводской маркировке стрелка миллиамперметра при замыкании цепи будет отклоняться вправо, а при размыкании – влево от нулевого положения.

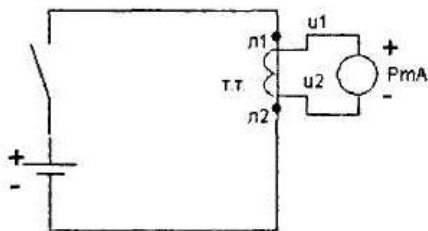


Рис. 1.4. Схема испытаний $ТТ$ при проверке полярности выводом (метод постоянного тока)

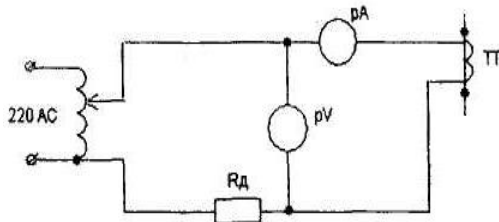


Рис. 1.5. Схема испытаний $ТТ$ при снятии характеристики намагничивания от источника напряжения

Вольтамперную характеристику $ТТ$ получают, используя схему (рис. 1.5). Амперметр $РА$ должен иметь предел измерений $5А$. В качестве вольтметра используется комбинированный прибор типа $Ц4313$ с пределом измерения $150 В$. Прежде чем снимать ВАХ следует размагнитить сердечник магнитопровода трансформатора тока. Для этого на схему подается напряжение, и производят два-три плавных подъема и снижения до нуля напряжения на обмотке $ТТ$ (амперметр при этом не должен зашкаливать). После того как магнитопровод будет размагничен, изменяют напряжение на обмотке $ТТ$ от 0 до такого его значения, при котором ток через вторичную обмотку $ТТ$ не станет равным $5А$, и записывают в таблицу значения напряжения и тока в обмотке.

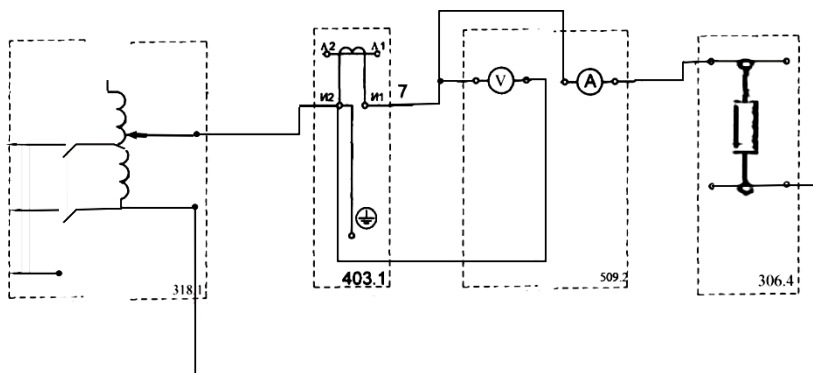


Рис. 1.6. Схема электрических соединений

Для получения характеристики следует произвести 6-8 измерений. На миллиметровой бумаге построить полученную вольтамперную характеристику $U_2 = f(I_{нам})$ и на том же графике привести типовую кривую намагничивания.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к трансформаторам тока в устройствах релейной защиты?
2. Почему нельзя размыкать вторичные цепи трансформатора тока, находящегося в работе?
3. Какие виды погрешностей регламентируются для $ТТ$?
4. Как производится маркировка выводов $ТТ$?
5. Что такое кривая намагничивания $ТТ$?
6. Что такое ВАХ $ТТ$ и как ее получить?
7. Что такое ток намагничивания трансформатора тока?

Лабораторно-практическая работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ ВКЛЮЧЕНИЯ

ВТОРИЧНЫХ ОБМОТКОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

ТОКА

Цель работы: ознакомиться со схемами соединения вторичных обмоток трансформатора тока, используемых в устройствах релейной защиты и автоматики.

При выполнении защиты элементов электрических систем могут быть использованы различные схемы соединений обмоток трансформаторов тока и токовых обмоток реле. Выбор схемы определяется её назначением (от каких видов коротких замыканий предусмотрена защита), требованием чувствительности, необходимостью экономить количество реле и трансформаторов тока. При определении параметров защиты (тока срабатывания и чувствительности) необходимо учитывать коэффициент схемы:

$$K_{cx} = I_p / I_{2гт} \quad (2.1)$$

где I_p – ток в реле, А;

$I_{2гт}$ – ток во вторичной обмотке трансформатора тока, А.

Для максимальных токовых защит выбор тока срабатывания реле производится по выражению:

$$I_{cp} = (K_n I_{нmax} K_{cx}) / (K_\epsilon K_{mm}), \quad (2.2)$$

где $K_n = 1,1-1,2$ – коэффициент надёжности, учитывающий погрешность реле и переходные режимы;

$K_\epsilon = 0,8-0,85$ – коэффициент возврата реле, учитывающий его конструктивные особенности;

$K_{тт}$ – коэффициент трансформации трансформатора тока.

Эффективность каждой схемы определяется коэффициентом чувствительности, представляющим собой отношение тока при коротком замыкании попадающего в обмотку реле к току срабатывания, а именно $K_\nu = I_p / I_{cp}$.

Порядок выполнения работы:

1) ознакомьтесь с аппаратурой, установленной на стенде НТЦ-10;

2) соберите поочередно все схемы, представленные на рисунках 2.1-2.5.

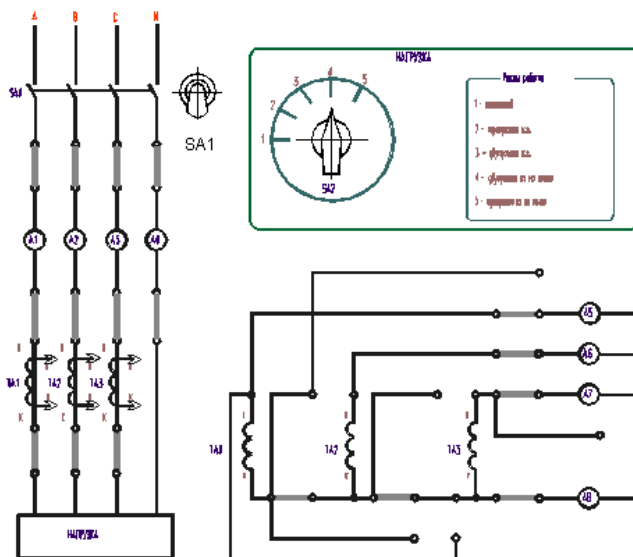


Рис. 2.1. Соединение «звезда», $K_{cx}=1$

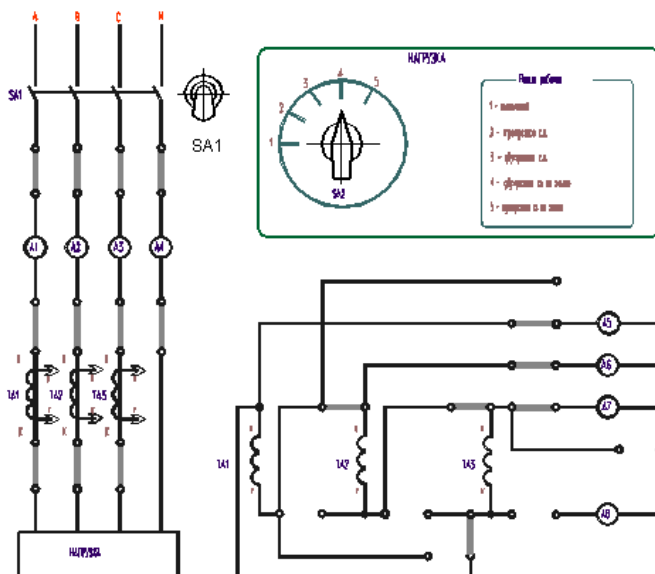


Рис. 2.2. Соединение «треугольник», $K_{cx}=\sqrt{3}$

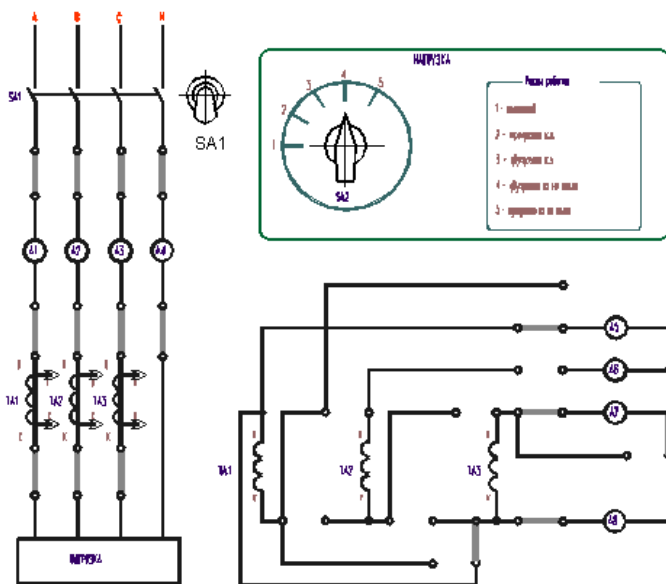


Рис. 2.3. Соединение «неполная звезда» $K_{сх}=1$

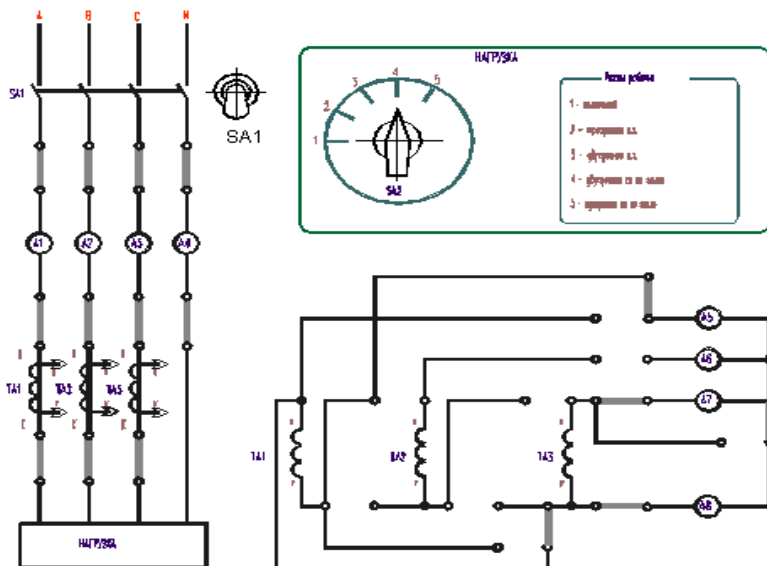


Рис. 2.4. Соединение «разность токов двух фаз», $K_{сх} = -$

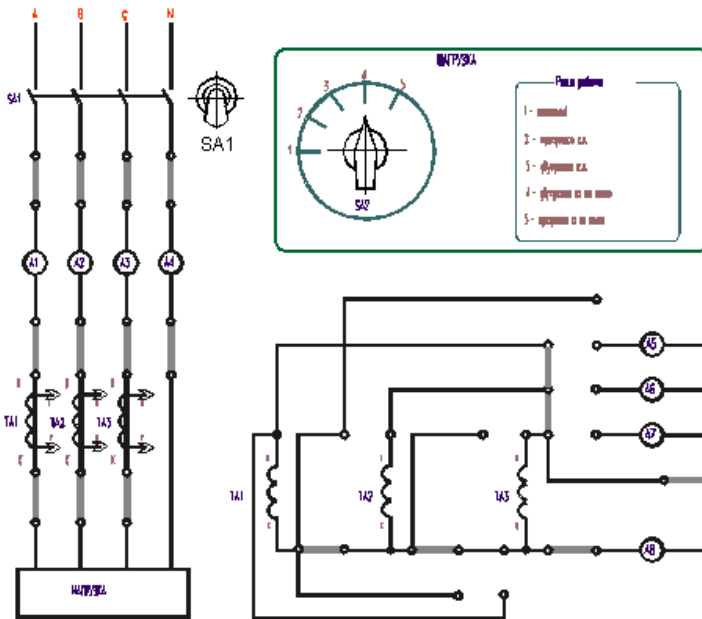


Рис. 2.5. Соединение «фильтр токов нулевой последовательности»

3) замкнуть тумблер SA1, амперметры PA1-PA4 покажут первичный ток цепи, а амперметры PA5-PA8 – токи вторичных цепей. Переключателем SA2 можно установить вид короткого замыкания в первичной цепи;

4) для каждой схемы, имитируя различные виды коротких замыканий, произвести запись показаний всех приборов, данные занести в таблицы 2.1-2.10;

Таблица 2.1

Исследование схемы включения вторичных обмоток трансформаторов тока

№п/п.	Виды опыта	I_a, A	I_b, A	I_c, A	I_o, A
1.	Номинальный режим				
2.	Трёхфазное КЗ				
3.	Двухфазное КЗ				
4.	Двухфазное КЗ на землю				
5.	Однофазное КЗ на землю				

Таблица 2.2

*Токи, протекающие во вторичных цепях трансформаторов
тока*

Соединение вторичных обмоток в «Звезду»					
№пп.	Виды опыта	I_5, A	I_6, A	I_7, A	I_8, A
1.	Трехфазное КЗ				
2.	Двухфазное КЗ				
3.	Двухфазное КЗ на землю				
4.	Однофазное КЗ на землю				
Коэффициент трансформации					
Коэффициент чувствительности					

Таблица 2.3

Соединение вторичных обмоток «треугольник» (вариант 1)

№пп.	Виды опыта	I_5, A	I_6, A	I_7, A	I_8, A
1.	Трехфазное КЗ				
2.	Двухфазное КЗ				
3.	Двухфазное КЗ на землю				
4.	Однофазное КЗ на землю				
Коэффициент трансформации					
Коэффициент чувствительности					

Таблица 2.4

Соединение вторичных обмоток «треугольник» (вариант 2)

№пп.	Виды опыта	$K_{та}$	$K_{тв}$	$K_{тс}$	$K_{то}$	$K_{ч}$
1.	Трехфазное К.З.					
2.	Двухфазное К.З.					
3.	Двухфазное К.З. на землю					
4.	Однофазное К.З. на землю					

Таблица 2.5

*Соединение вторичных обмоток «неполная звезда»
(вариант 1)*

№пп.	Виды опыта	I_5, A	I_6, A	I_7, A	I_8, A
1.	Трехфазное КЗ				
2.	Двухфазное КЗ				
3.	Двухфазное КЗ на землю				
4.	Однофазное КЗ на землю				
Коэффициент трансформации					
Коэффициент чувствительности					

Таблица 2.6

*Соединение вторичных обмоток «неполная звезда»
(вариант 2)*

<i>№пп.</i>	<i>Виды опыта</i>	$K_{та}$	$K_{тв}$	$K_{тс}$	$K_{то}$	$K_{ч}$
1.	Трехфазное КЗ					
2.	Двухфазное КЗ					
3.	Двухфазное КЗ на землю					
4.	Однофазное КЗ на землю					

Таблица 2.7

*Соединение вторичных обмоток «разность токов двух фаз»
(вариант 1)*

<i>№пп.</i>	<i>Виды опыта</i>	I_5, A	I_6, A	I_7, A	I_8, A
1.	Трехфазное КЗ				
2.	Двухфазное КЗ				
3.	Двухфазное КЗ на землю				
4.	Однофазное КЗ на землю				
Коэффициент трансформации					
Коэффициент чувствительности					

Таблица 2.8

*Соединение вторичных обмоток «разность токов двух фаз»
(вариант 2)*

<i>№пп.</i>	<i>Виды опыта</i>	$K_{та}$	$K_{тв}$	$K_{тс}$	$K_{то}$	$K_{ч}$
1.	Трехфазное КЗ					
2.	Двухфазное КЗ					
3.	Двухфазное КЗ на землю					
4.	Однофазное КЗ на землю					

Таблица 2.9

*Соединение вторичных обмоток «сумма токов трех фаз»
(вариант 1)*

<i>№пп.</i>	<i>Виды опыта</i>	I_5, A	I_6, A	I_7, A	I_8, A
1.	Трехфазное КЗ				
2.	Двухфазное КЗ				
3.	Двухфазное КЗ на землю				
4.	Однофазное КЗ на землю				
Коэффициент трансформации					
Коэффициент чувствительности					

Таблица 2.10

*Соединение вторичных обмоток «сумма токов трех фаз»
(вариант 2)*

<i>№пп.</i>	<i>Виды опыта</i>	$K_{та}$	$K_{тв}$	$K_{тс}$	$K_{то}$	$K_{ч}$
1.	Трёхфазное КЗ					
2.	Двухфазное КЗ					
3.	Двухфазное КЗ на землю					
4.	Однофазное КЗ на землю					

5) по данным показаний приборов для каждой схемы определить величину $K_{сх}$ соответствующего определённому виду короткого замыкания. Определить чувствительность токовой защиты при различных схемах её выполнения и различных видах коротких замыканий.

Контрольные вопросы

1. В каких случаях применяется схема соединения трансформаторов тока в треугольник?
2. Почему в сетях с изолированной нейтралью устанавливают два трансформатора тока (по одному на каждую крайнюю фазу), а в сетях с глухозаземлённой нейтралью – три трансформатора тока (по одному на каждую фазу)?
3. Как узнать ток во вторичной фазе по показаниям приборов в схеме, представленной на рисунке 2.1.
4. Начертить схему защиты с одним реле, включенным на разность токов двух фаз. Какая должна быть установка реле, если оно должно срабатывать при токе в линии ТА?
5. Назначение нулевого провода в схеме «полная звезда»?
6. Указать типы защит, где используется включение токовых обмоток реле по схемам, представленным на рисунке 2.3.
7. Ток каких фаз измеряет каждый из амперметров схемы, представленный на рисунке 2.2 при нормальном режиме?

Лабораторно-практическая работа №3

ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЗАЩИТАХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Цель работы: ознакомиться с конструкцией и принципом действия реле применяемых в защитах энергосистем. Изучить устройство и принцип действия реле, применяемых в системе защиты (реле тока РТ-40, реле напряжения РН-53, индукционного реле тока РТ-80, быстронасыщающегося трансформатора БНТ, дифференциального реле РНТ-565, реле времени ЭВ-100, реле направления тока РБМ-171, теплового реле).

Электромагнитное реле мгновенного действия типов РТ-40 и РН-50. Электромагнитные реле типов РТ-40 и РН-50 выполнены на электромагнитной системе с поперечным движением якоря. Принцип устройства реле РТ-40, РН-50 показан на рисунке 3.1, а конструктивное выполнение – на рисунке 3.2.

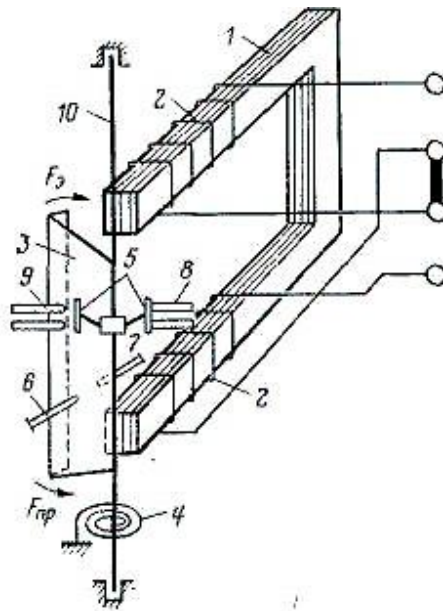


Рис. 3.1. Принцип устройства электромагнитного токового реле типа РТ-40 и реле напряжения типа РН-50

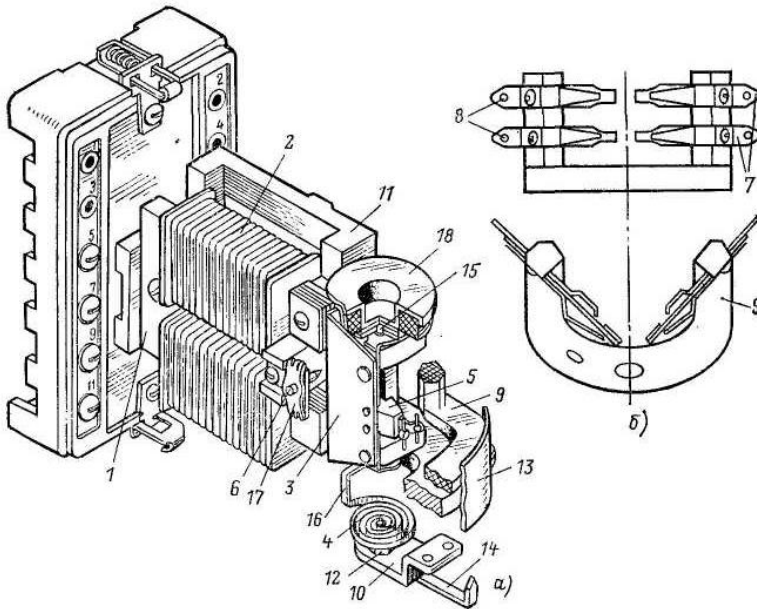


Рис. 3.2. Конструктивное выполнение реле типов РТ-40 и РН-50:
 а – общий вид; б – крепление неподвижных контактов; 1 – электромагнит;
 2 – катушки обмотки; 3 – якорь; 4 – спиральная пружина; 5 – подвижный
 контакт; 6 – левый упор; 7 – правая пара неподвижных контактов; 8 – левая
 пара неподвижных контактов; 9 – изоляционная колодка; 10 – держатель
 пружины; 11 – алюминиевая стойка; 12 – шестигранная втулка; 13 – шкала
 уставок; 14 – указатель (поводок); 15 – верхняя полюсь; 16 – хвостовик;
 17 – пластина; 18 – гаситель вибрации

Реле состоит из следующих основных частей (деталей): электромагнита 1 с обмоткой 2, состоящей из двух катушек, расположенных на верхнем и нижнем стержнях электромагнита; стального якоря 3, жестко укрепленного на оси 10; подвижных контактных мостиков 5, укрепленных на якорь с помощью изоляционной колодки; спиральной противодействующей пружины 4, связанной внутренним концом с осью якоря; неподвижных контактов 7, 8 и упорных винтов 6, ограничивающих ход якоря.

На якорь действуют электромагнитная сила F_3 и противоположная по направлению механическая сила пружины F_{np} . Якорь притягивается к электромагниту, и реле, срабатывая, размыкает контакты 7 и замыкает контакты 8 при токе в реле, при котором $F_3 > F_{np}$.

При прохождении по обмоткам электромагнита тока электромагнит стремится притянуть якорь к полюсам, т. е. повернуть его вместе с осью по часовой стрелке. Этому препятствует спиральная пружина. Усилие, действующее на якорь от электромагнита (электромагнитный момент), зависит от числа витков обмотки, значения тока в обмотке и угла поворота якоря, а усилие от пружины (противодействующий момент) – от начальной затяжки пружины, угла и поворота якоря.

При отсутствии тока в обмотке или его малом значении якорь под воздействием пружины находится в крайнем левом положении. С увеличением тока электромагнитный момент возрастает и, когда он превысит противодействующий момент пружины, якорь втягивается под полюсы и поворачивает ось с подвижным контактным мостиком, который при этом замыкает неподвижные контакты. Момент замыкания контактов называется моментом срабатывания реле. Наименьший ток, при котором реле срабатывает, называется током срабатывания I_{cp} , а наибольший ток, при котором реле возвращается в исходное положение – током возврата I_{ep} . Отношение $K = I_{ep}/I_{cp}$ так же, как у реле прямого действия, называется коэффициентом возврата.

Уставки срабатывания токовых реле РТ-40 регулируются изменением натяжения пружины с помощью поводка 14 (рис. 3.2) и изменением соединения катушек обмотки реле (последовательно или параллельно), что изменяет пределы шкалы в 2 раза. Нанесенные на шкале уставки соответствуют последовательному соединению катушек. При параллельном соединении уставки шкалы удваиваются. Коэффициент возврата у максимальных реле – не менее 0,8, у минимальных – не более 1,2.

Для гашения вибрации контактов, при ударах якоря об упоры у токовых реле РТ-40 имеется специальное механическое устройство – гаситель вибрации 18 (рис. 3.2). Гаситель вибрации представляет собой небольшой полый цилиндр, укрепленный на одной оси с якорем и заполненный песком. При срабатывании реле песок поглощает энергию удара якоря об упоры, чем предотвращается его отскакивание и вибрация контактов.

Реле напряжения переменного тока типов РН-53 и РН-54 выполнены конструктивно так же, как реле РТ-40. Отличием является отсутствие гасителя вибрации и иная схема включения обмоток. У этих реле, которые постоянно находятся под напряжением,

для снижения вибрации подвижной системы обмотка реле OP включена в сеть переменного тока не непосредственно, а через выпрямитель VS , как показано на рисунке 3.3. Выпрямитель выполнен по схеме двухполупериодного выпрямления, получившей название однофазного моста. В плечи моста включены полупроводниковые диоды $1-4$ (германиевые или кремниевые), которые пропускают ток только в одном направлении (в сторону острия треугольника, условно обозначающего диод).

К одной диагонали моста (точки a , b) подводится переменное напряжение, а к другой (точки δ , ϵ) – подключается обмотка реле с последовательно соединенными катушками.

Процесс выпрямления происходит следующим образом: в первый, положительный полупериод переменный ток I' подходит к точке a , далее проходит через диод 1 , затем через обмотку реле – в направлении, указанном сплошной стрелкой, затем через диод 3 и выходит обратно в сеть через точку b .

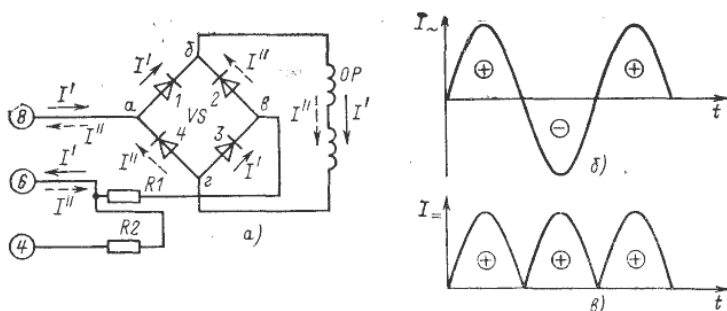


Рис. 3.3. Схема включения обмоток реле максимального напряжения типа РН-53 и минимального напряжения типа РН-54 через выпрямитель:

a – схема включения; b – переменный ток на входе выпрямителя;
 ϵ – выпрямленный ток в обмотке реле

Во второй (отрицательный) полупериод переменный ток I'' имеет обратное направление, т. е. подходит к точке b , далее проходит через диод 2 , затем через обмотку реле в том же направлении (пунктирная стрелка), что и во время первого полупериода, затем проходит через диод 4 и выходит в сеть через точку a .

Таким образом, несмотря на то, что переменный ток имеет в течение периода различное направление, выпрямленный ток

в обмотке реле проходит в одном и том же направлении, т.е. имеет пульсирующий характер, как показано на диаграмме (рис. 3.3, в).

Реле типа *PH-53* имеет коэффициент возврата не ниже 0,8, а реле типа *PH-54* – не выше 1,25. Уставки реле *PH-53*, *PH-54* регулируются изменением натяжения пружины с помощью поводка *14* (рис. 3.2) и с помощью включения одного или двух дополнительных резисторов *R1*, *R2* в цепи обмотки реле (рис. 3.3, а), что изменяет предел шкалы уставок в 2 раза.

Кроме рассмотренных, выпускаются реле напряжения постоянного тока типа *PH-51* и специальные реле переменного тока типа *PH-58* с повышенным коэффициентом возврата – 0,95.

Комбинированные токовые реле типов *PT-80* и *PT-90* по принципу действия являются комбинированными и состоят из двух элементов: индукционного и электромагнитного. Конструктивное выполнение реле *PT-80* и *PT-90* показано на рисунке 3.4.

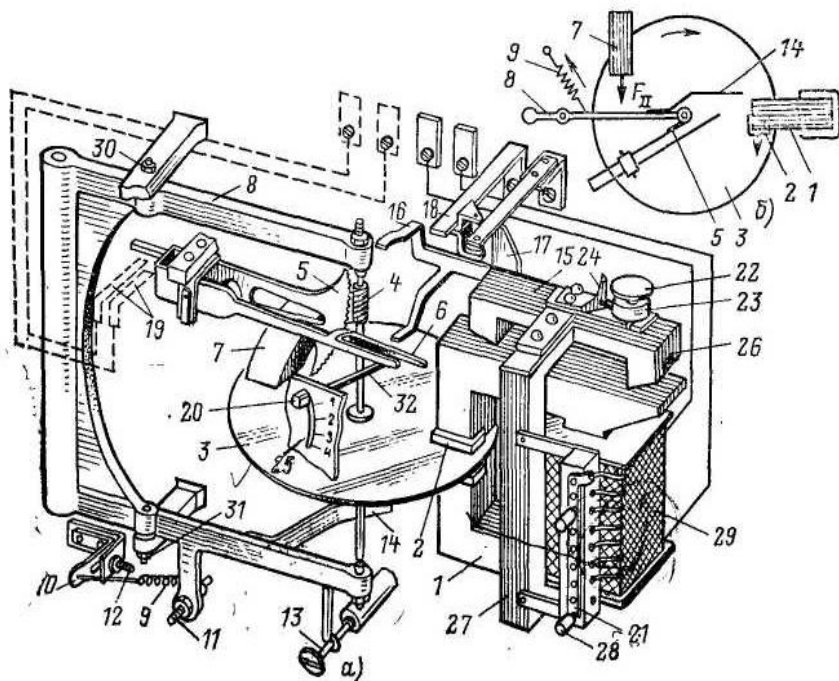


Рис. 3.4. Устройство комбинированного токового реле с зависимой характеристикой времени срабатывания и отсечкой типа *PT-80*: а – конструктивное выполнение реле; б – силы, действующие на диск

Индукционный элемент состоит из электромагнита 1 с двумя короткозамкнутыми витками (экранами) 2 на его верхнем и нижнем полюсах; подвижной рамки 8, которая может поворачиваться на своей оси на небольшой угол в подпятниках 30 и 31; алюминиевого диска 3, укрепленного вместе с червяком 4 на оси, вращающейся в подпятниках, расположенных в теле рамки; стальной скобы 14, укрепленной на рамке; зубчатого сектора 5, свободно лежащего на движке 32; тормозного постоянного магнита 7; устройства для регулировки времени срабатывания, состоящего из шкалы 25, винта 20 и движка 32; пружины 9, закрепленной на уголке 10 и удерживающей рамку в начальном положении; винтов 11, 12 и 13 для регулировки угла поворота рамки; сигнальных контактов 19, замыкающихся рычагом зубчатого сектора (только у реле типов *РТ-83*, *РТ-84*, *РТ-86*).

Электромагнитный элемент, представляющий собой токовое реле мгновенного действия, состоит из стального якоря 15 с укрепленным на нем коромыслом 16 для поворота якоря и короткозамкнутым витком 26 для устранения вибрации; замыкающего стержня 27, который вместе с якорем образует магнитопровод электромагнитного элемента; регулировочного винта отсечки 22 со шкалой 23 и упорной пластинкой 24.

Кроме того, общими для обоих элементов являются: обмотка 29 с ответвлениями, выведенными на контактную колодку 21 с двумя контактными винтами 28; контакты реле 18, замыкающиеся изоляционным упором якоря 17, и механический указатель срабатывания.

При прохождении тока по обмотке реле в зазоре между полюсами создаются магнитные потоки, сдвинутые в пространстве и по фазе, которые пронизывают находящийся в зазоре диск и создают на нем вращающий момент (рис. 3.6). При токе, равном 20-30% тока срабатывания, диск начинает вращаться и вращать укрепленный на его оси червяк 4. Но так как рамка 8 оттянута пружиной 9 в крайнее положение, то червяк не входит в зацепление с зубчатым сектором. С момента, когда диск начинает вращаться, на него, кроме силы, создаваемой электромагнитом F , (рис. 3.4, б), начинает действовать сила F_n , создаваемая тормозным постоянным магнитом 7, магнитный поток которого пересекает вращающийся диск. Эта сила препятствует вращению диска, и значение ее тем больше, чем больше частота вращения диска. С увеличением тока

в обмотке реле увеличиваются сила F , и создаваемый ею вращающий момент на диске, вследствие чего возрастает частота его вращения, что в свою очередь приводит к увеличению силы F_u постоянного магнита.

При определенном значении тока в реле суммарная сила, действующая на диск и через него на рамку, равная $F + F_m$, превысит силу пружины 9. В этот момент рамка с диском повернется, и червяк войдет в зацепление с зубчатым сектором.

Наименьший ток, при котором происходит зацепление червяка с зубчатым сектором, называется током срабатывания индукционного элемента реле.

С момента зацепления зубчатый сектор начинает подниматься и по истечении некоторого времени, достигнув своим рычагом 6 коромысла 16, поворачивает его вверх вместе с левым концом якоря электромагнитного элемента. Правый конец якоря при этом опускается, что приводит к уменьшению зазора между якорем и магнитопроводом. Благодаря этому правый конец якоря притягивается к магнитопроводу, и упор 17 замыкает (или размыкает) контакты реле 18.

С момента соприкосновения рычага зубчатого сектора с коромыслом на рычаг начинает действовать масса коромысла и частота вращения диска уменьшается. Для того чтобы при этом не произошло расцепление червяка с зубчатым сектором, установлена стальная скоба 14, которая, притягиваясь к электромагниту, усиливает зацепление червяка с зубчатым сектором.

Время, через которое происходит замыкание контактов реле, зависит от начального положения зубчатого сектора и частоты вращения диска. Начальное положение зубчатого сектора может регулироваться перемещением движка 32, на котором лежит рычаг зубчатого сектора, вдоль шкалы уставок времени срабатывания. Частота же вращения диска зависит от значения тока в обмотке реле. Чем больше ток, тем больше частота вращения диска и тем быстрее будет подниматься зубчатый сектор и, следовательно, тем быстрее, т. е. с меньшим временем, будет происходить замыкание контактов реле.

Таким образом, время действия реле зависит от значения тока в его обмотке, т. е. реле имеет *зависимую от тока характеристику времени срабатывания*. При увеличении тока в обмотке реле до (6-8) I_{cp} наступает насыщение стали электромагнита, вследствие

чего при дальнейшем увеличении тока магнитный поток остается почти неизменным и реле начинает работать с одним и тем же временем. Поэтому при указанных значениях тока зависимая часть характеристики переходит в независимую.

Характеристика времени срабатывания реле в зависимости от тока, состоящая из зависимой и независимой частей, называется *ограниченно зависимой*.

Если к обмотке реле подвести сразу большой ток, достаточный для притяжения якоря электромагнитного элемента к магнитопроводу, то реле будет срабатывать без выдержки времени – мгновенно. Таким образом, электромагнитный элемент может действовать как совместно с индукционным элементом, так и самостоятельно, отсекая часть характеристики при больших токах. Поэтому электромагнитный элемент называется отсечкой.

Ток срабатывания электромагнитного элемента регулируется путем изменения числа витков обмотки (одновременно с индукционным элементом) и, кроме того, с помощью регулировочного винта 22 (рис. 3.4, *a*).

Реле типа *PT-90* имеет характеристику времени срабатывания, мало зависящую от тока. Ее независимая часть начинается примерно при трех-, четырехкратном токе срабатывания.

Ранее выпускавшееся реле *ИТ-80* имеет конструкцию, аналогичную реле *PT-80*, и такие же характеристики.

К достоинствам реле *PT-80* следует отнести: малую инерционную погрешность и быстрый возврат части реле в первоначальное положение после ликвидации аварийного режима, возможность контроля исправного состояния реле благодаря вращению диска в нормальном режиме, постоянство временной характеристики реле при регулировании уставки по току срабатывания, возможность широкой регулировки тока срабатывания отсечки, а также возможность вывода ее из действия.

К недостаткам реле *PT-80* следует отнести значительный разброс тока срабатывания отсечки при уставках 2-8-кратной величины (до 10-15% к уставке); необходимость замены шарика в подпятнике реле в случае его износа или повреждения; медленный возврат реле в начальное положение при остаточном токе, близком к току возврата.

Электромагнитное токовое реле с быстронасыщающимся трансформатором (БНТ). Токовые реле с быстронасыщающимся трансформатором предназначены для выполнения дифференциальных защит генераторов, трансформаторов и шин. Кроме того, реле с БНТ используются в отдельных случаях для быстродействующих защит от однофазных КЗ. Реле с БНТ состоит из токового реле типа *РТ-40* и специального промежуточного быстронасыщающегося трансформатора.

Быстронасыщающийся трансформатор работает как обычный промежуточный трансформатор, если через его первичную обмотку проходит переменный ток нормальной частоты с симметричной синусоидальной формой кривой, т. е. ток, каждый период которого состоит из симметричных полупериодов – положительного и отрицательного. В этом случае, как показано на рисунке 3.5а, магнитный поток и пропорциональная ему магнитная индукция в сердечнике БНТ изменяются от положительного B_{max} до отрицательного B'_{max} максимальных значений, создавая большую ЭДС на вторичной обмотке БНТ и достаточный для работы реле ток.

Иначе работает БНТ, если через его первичную обмотку проходит ток с несимметричной формой кривой, т. е. ток, у которого каждый период состоит из одних положительных или одних отрицательных полупериодов или же из положительных полупериодов с большой амплитудой и отрицательных полупериодов с малой амплитудой (или наоборот).

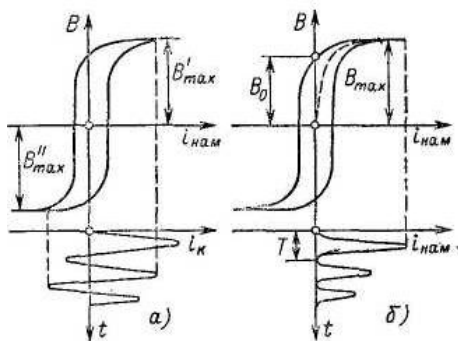


Рис. 3.5. Изменение индукции в сердечнике БИТ при прохождении тока в его первичной обмотке:

а – тока КЗ; б – намагничивающего тока силового трансформатора или тока небаланса

Такое смещение кривой тока относительно оси времени происходит из-за того, что переходные процессы сопровождаются прохождением постоянного быстро затухающего тока, который в отличие от периодического переменного тока называется аperiodическим. Таким образом, полный ток во время переходного процесса состоит из периодической и аperiodической составляющих и равен их сумме. Длительность переходного процесса зависит от соотношения индуктивного и активного сопротивлений генераторов, трансформаторов и линий электропередачи и может составлять 0,05-0,5 с. В этом случае, как показано на рисунке 3.5б, магнитный поток и магнитная индукция в сердечнике БНТ будут изменяться только от положительного максимального значения B_{max} до B_0 . Поэтому на вторичной обмотке БНТ будет создаваться небольшая ЭДС и недостаточный для работы реле ток. Это свойство БНТ используется для того, чтобы отличать токи КЗ от токов намагничивания силовых трансформаторов и токов небаланса в первые периоды КЗ, сопровождающихся переходным процессом.

Токи КЗ могут иметь несимметричную форму лишь в первый момент времени и по истечении нескольких периодов, когда затухает переходный процесс, становятся симметричными, как показано на рисунке 3.5а. Поэтому токи КЗ хорошо трансформируются через БНТ и приводят в действие реле.

Токи намагничивания силовых трансформаторов при включении их под напряжение, а также при восстановлении напряжения после отключения КЗ имеют несимметричную форму кривой, как показано на рисунке 3.5б, и поэтому плохо трансформируются через БНТ и не приводят в действие реле.

Токи небаланса достигают больших значений в первые периоды КЗ, когда они в результате переходного процесса имеют, как правило, несимметричную форму кривой и поэтому также плохо трансформируются через БНТ. После затухания переходного процесса токи небаланса могут иметь симметричную форму кривой, но их значение к этому времени значительно снижается.

Таким образом, из рассмотренного следует, что при включении токовых реле через БНТ они становятся нечувствительными к токам намагничивания силовых трансформаторов и токам небаланса при переходных процессах, что дает возможность повысить чувствительность защиты. В то же время реле с БНТ надежно срабатывает при КЗ в зоне защиты.

Электромагнитные токовые реле с БНТ типов РНТ-565, РИТ-566 и РНТ-567. Все реле РНТ (рис. 3.6) состоят из смонтированного в одном кожухе электромагнитного токового реле типа РТ-40 и промежуточного быстронасыщающегося трансформатора. Реле РНТ (рис. 3.7) выполняется на трехстержневом сердечнике C и имеет следующие обмотки: первичную – рабочую обмотку P , расположенную на среднем стержне, к которой подводится ток от трансформаторов тока; вторичную обмотку B , расположенную на левом стержне, к которой подключено токовое реле KA типа РТ-40, и короткозамкнутые обмотки K_1 и K_2 , расположенные на среднем и правом стержнях БНТ.

Принцип работы БНТ такого типа состоит в следующем. При прохождении по рабочей обмотке симметричного периодического тока I_p магнитный поток в среднем стержне наводит в обмотке K_1 ток I_k , который, проходя по обмотке K_2 , создает в правом стержне магнитный поток Φ_k . Магнитный поток Φ_p и магнитный поток Φ_k , замыкающийся через левый стержень, наводят во вторичной обмотке ток I_2 , который проходит по обмотке реле KA и вызывает его срабатывание. Таким образом, ток из рабочей обмотки P трансформируется во вторичную обмотку B как непосредственно, так и путем двойной трансформации из обмотки P в обмотку K_1 и затем из обмотки K_2 в обмотку B . При этом чем больше число витков короткозамкнутых обмоток или чем меньше их сопротивление, тем больше магнитный поток и тем, следовательно, сильнее проявляется действие двойной трансформации.

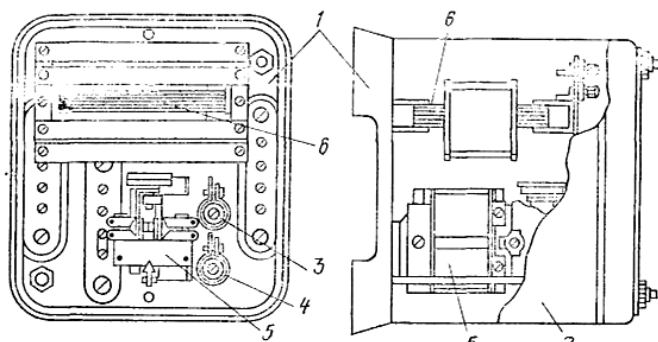


Рис. 3.6. Внешний вид реле типов РНТ-565, РИТ-567:
1 – цоколь; 2 – кожух; 3 и 4 – регулировочные сопротивления;
5 – реле РТ-40; 6 – БНТ

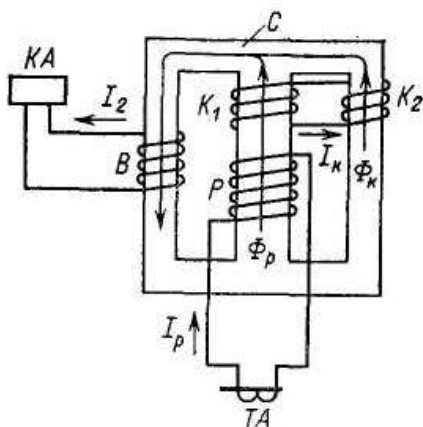


Рис. 3.7. Устройство БНТ реле РНТ-565 и РНТ-567:
 С – сердечник БНТ; Р – рабочая обмотка; В – вторичная обмотка;
 K_1 и K_2 – короткозамкнутые обмотки

При прохождении по рабочей обмотке БНТ несимметричного тока его трансформация во вторичную обмотку как непосредственная, так и особенно двойная существенно ослабляются (рис. 3.5, б), благодаря чему ток во вторичной обмотке не достигает значения, равного току срабатывания реле.

Рассмотренное выполнение БНТ обеспечивает более эффективную отстройку от токов намагничивания, а также токов небаланса трансформаторов тока.

Схема реле типа РНТ-565 приведена на рисунке 3.8а. Из схемы видно, что кроме рассмотренных обмоток (P , B , K_1 , K_2) на среднем стержне БНТ этого реле расположены уравнивательные обмотки U_1 и U_2 , которые предназначены для выравнивания магнитодвижущих сил в БНТ при использовании реле в схемах дифференциальных защит трансформаторов. В отличие от реле РНТ-565 реле РНТ-566 имеет три (рис. 3.8, б), а реле РНТ-566/2, РНТ-567 и РНТ-567/2 по две независимые рабочие обмотки.

С целью регулирования тока срабатывания реле РНТ рабочие и уравнивательные обмотки имеют отпайки для изменения числа включенных витков. Включение необходимого числа витков производится установкой штепсельных винтов в соответствующие

гнезда контактных пластин. Цифры около гнезд указывают число включенных витков.

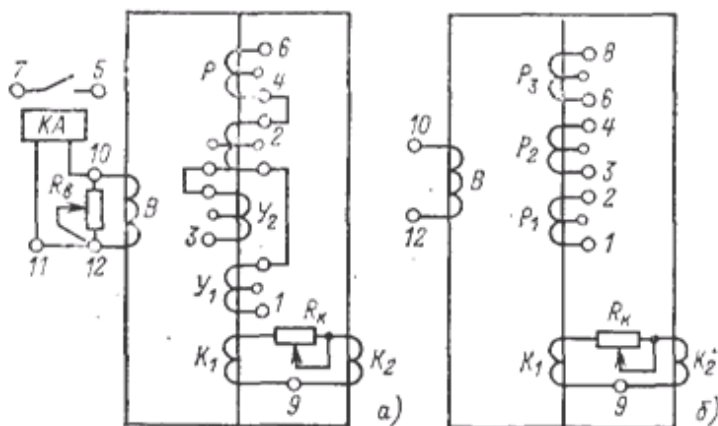


Рис. 3.8. Принципиальные схемы БНТ реле РНТ:
а - РНТ-565; б - РНТ-566

Число витков рабочей обмотки $W_{раб}$ определяется по формуле

$$W_{раб} = F_{ср} / I_{ср}, \quad (3.1)$$

где $F_{ср} = 100$ – магнитодвижущая сила срабатывания реле РНТ, может в некоторых пределах регулироваться шунтирующим сопротивлением (рис. 3.8); $I_{ср}$ – заданный ток срабатывания реле РНТ.

Число витков уравнивательных обмоток определяется из условий равенства магнитодвижущих сил, создаваемых этими обмотками в условиях сквозного КЗ.

Короткозамкнутые обмотки отпаек не имеют. Степень отстройки реле РНТ от несимметричных токов переходных процессов регулируется с помощью сопротивления R_n (рис. 3.8). Наибольший эффект имеет место при $R_n = 0$.

Реле времени типов ЭВ-100 и ЭВ-200 представлено на рисунке 3.9. В этом реле времени ведущая пружина 8 нормально растянута (заведена) и удерживается в таком положении тем, что палец 4 упирается в верхнюю часть якоря 2. При подаче напряжения на обмотку реле/якорь 2, втягиваясь, сжимает возвратную пружину 3 и освобождает палец 4. Благодаря этому под воздействием освобожденной ведущей пружины 8 зубчатый сектор 9,

укрепленный на оси 12, начинает вращаться и вращать сцепленную с ним шестерню 7, которая в свою очередь вращает валик с укрепленной на нем контактной траверсой 10.

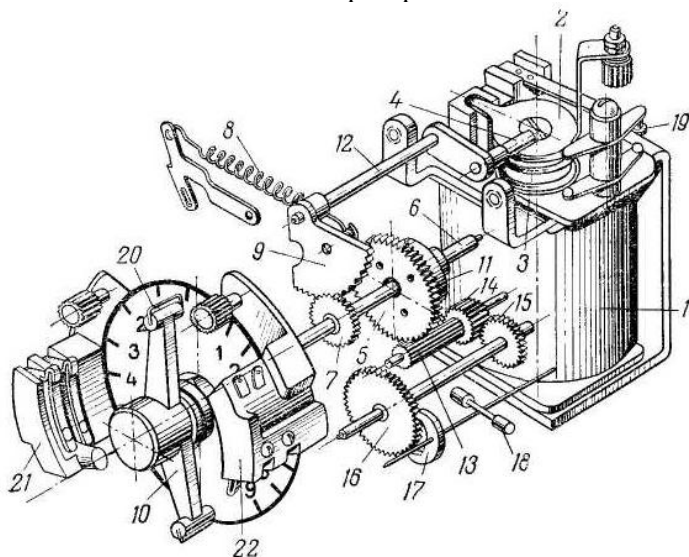


Рис. 3.9. Устройство реле времени типов ЭВ-100, ЭВ-200

В самом начале вращения валика происходит его сцепление с ведущей шестерней 5 посредством фрикционного устройства 11 на оси 6, которое в данной конструкции реле выполняет функции храповой шестерни и храповой пружины. Ведущая шестерня 5 через трубку 13 и промежуточные шестерни 14 и 15 связана с часовым механизмом 16-18. Часовой механизм обеспечивает движение контактной траверсы 10 с определенной скоростью. Поэтому выдержка времени от начала работы реле до замыкания контактов определяется расстоянием между начальным положением подвижного контакта 20 и неподвижными контактами 21 или проскальзывающими контактами 22, которые для изменения уставок можно перемещать по шкале реле. Кроме контактов с регулируемой выдержкой времени, реле времени имеют переключающие контакты мгновенного действия 19. Переключение мгновенных контактов происходит при втягивании якоря.

Реле времени типа ЭВ-100 выпускаются для работы на постоянном оперативном токе 24, 48, 110 и 220 В, а реле типа

ЭВ-200 – на переменном оперативном токе 100, 127, 220 и 380 В. Реле времени переменного тока типов ЭВ-215-ЭВ-245 выпускаются на напряжении 100, 127 и 220 В. В исходном положении обмотки этих реле находятся постоянно под напряжением. При этом ведущая пружина растянута и реле готово к действию. При снятии напряжения с реле контактами пусковых реле (или при его снижении или исчезновении по другим причинам) якорь реле отпадает и освобождает ведущую пружину, под воздействием которой реле срабатывает. При подаче напряжения реле мгновенно возвращается в исходное положение.

Реле направления тока типа РБМ 171. Реле контроля направления тока типа РБМ работает на индукционном принципе. Его главной частью является магнитопровод прямоугольной формы с четырьмя выступающими внутрь полюсными наконечниками (рис. 3.10). На двух полюсных наконечниках размещена токовая обмотка на 2,5-5А, создающая магнитный поток Φ_i . На ярме магнитопровода размещена обмотка напряжения, состоящая из четырех последовательно соединенных секций, создающая второй магнитный поток Φ_u . Номинальное напряжение обмотки 100 В.

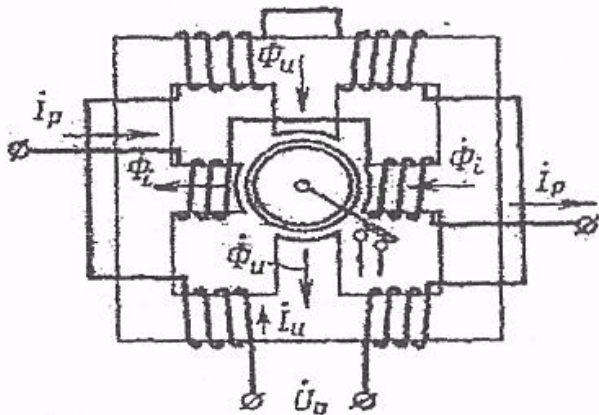


Рис. 3.10. Схема размещения обмоток реле РБМ

В зазоре между полюсными наконечниками (рис. 3.11) расположен полый алюминиевый ротор, выполненный в виде стаканчика 2, сидящего на оси, установленной в подшипниках 4. На оси ротора закреплен подвижный контакт 8 и ограничитель угла поворота ротора 5. По обе стороны от подвижного контакта

расположены неподвижные контакты 9 (на рисунке показан один из контактов).

При отсутствии тока подвижные и неподвижные контакты реле под воздействием пружины разомкнуты. При прохождении через реле тока определенного направления в результате взаимодействия магнитных полей обмоток тока и напряжения на роторе реле появляется вращающий момент положительного или отрицательного знака, который приводит его во вращение до замыкания подвижного контакта с одним из неподвижных контактов, расположенных с обеих сторон от него.

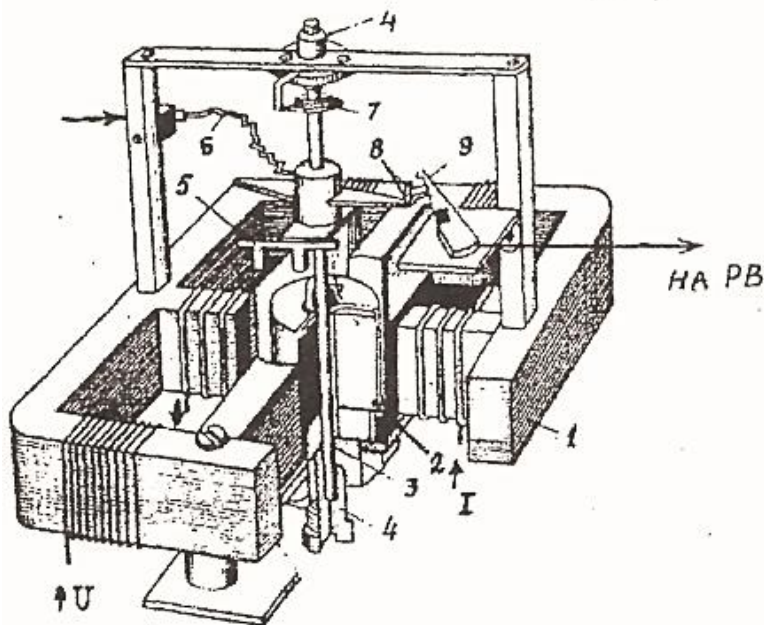


Рис. 3.11. Конструкция реле РБМ:

- 1 – магнитная система; 2 – цилиндрический алюминиевый ротор;
- 3 – ось реле; 4 – подпятник оси; 5 – ограничитель хода ротора;
- 6 – токопровод к подвижному контакту; 7 – пружина; 8 – подвижная часть контакта; 9 – неподвижная часть контакта

При отсутствии тока подвижные и неподвижные контакты реле под воздействием пружины разомкнуты. При прохождении через реле тока определенного направления в результате взаимодействия магнитных полей обмоток тока и напряжения на роторе реле

появляется вращающий момент положительного или отрицательного знака, который приводит его во вращение до замыкания подвижного контакта с одним из неподвижных контактов, расположенных с обеих сторон от него.

Знак и величина вращающего момента на роторе реле РБМ определяются уравнением:

$$M_{\text{вр}} = \kappa IU \cos(\varphi + \alpha), \quad (3.2)$$

где κ – коэффициент, зависящий от конструктивных данных реле;

I – сила тока;

U – величина напряжения;

φ – угол между векторами тока и напряжения;

α – дополнительный угол сдвига между током и напряжением, создаваемый за счет регулируемых конструктивных элементов реле (конденсатор и добавочное активное сопротивление, включаемые последовательно с обмоткой напряжения).

Из уравнения вращающего момента видно, что при сильном снижении напряжения в случае близкого КЗ ($U \rightarrow 0$) реле может не срабатывать ($M \rightarrow 0$).

Из уравнения вращающего момента реле так же следует, что максимальная чувствительность реле будет при условии: $\cos(\varphi + \alpha) = 1$, где φ – угол между векторами тока КЗ и напряжения в месте установки защиты. Этот угол обычно близок к 60° . Поэтому регулировочные параметры выбирают такими, чтобы угол α был близок к величине -60° . В этом случае реле будет работать с максимальной чувствительностью. Из-за того, что угол φ при КЗ может изменяться в некоторых пределах, чувствительность реле РБМ не остается постоянной. Поэтому отключение аварийного участка выполняют при взаимодействии реле РБМ, реагирующего на определенное направление тока и реле тока РТ, реагирующего на превышение его максимально-допустимого значения путем последовательного соединения их контактов в исполнительной цепи.

Электротепловые реле выполняются на следующих принципах:

– на преобразовании тепловых воздействий в механические перемещения, которые и используются для приведения в действие исполнительных элементов (биметаллические реле);

– на непосредственном преобразовании тепловых воздействий в изменение электрических или магнитных характеристик (термомагнитные реле).

Электротепловые реле, выполненные на базе биметаллической пластины, иногда называют биметаллическими реле. Они нашли широкое применение в автоматических выключателях и магнитных пускателях и предназначены для защиты электрических цепей от токов перегрузки.

Конструктивно биметаллическая пластина состоит из слоев двух металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения. Слой биметаллической пластины с меньшим значением коэффициента линейного расширения называется инертным (пассивным) и изготавливается из инвара (36% никеля и 64% железа) или других сплавов. Для пассивных слоев $\alpha = 3 \cdot 10^{-8} K^{-1}$. Слой пластины с большим значением коэффициента линейного расширения, а называется активным и изготавливается из константана, латуни, немагнитной стали. Для активных слоев обычно $\alpha = (5 \div 7) \cdot 10^{-8} K^{-1}$. Например, для латуни коэффициент линейного расширения почти в 20 раз больше, чем для инвара. Поэтому при увеличении температуры слой латуни удлиняется значительно больше, чем слой инвара. Эти слои соединены жестко (сваркой или пайкой). Вся биметаллическая пластина при нагреве изгибается в сторону инвара (рис. 3.12). Поскольку один конец биметаллической пластины закреплен, то механическое усилие, развиваемое пластиной при изгибании, используется для приведения в действие исполнительного элемента реле – контактов.

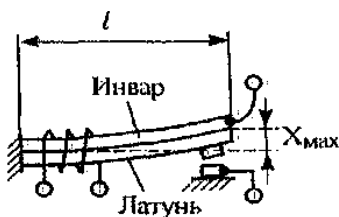


Рис. 3.12. Принцип работы биметаллического электротеплового реле

Максимальный прогиб биметаллической пластины (рис. 3.12):

$$X_{max} = 3/4 (\alpha_1 - \alpha_2) (l^2 \tau / \delta), \quad (3.3)$$

где α_1 – активный коэффициент линейного расширения;

α_2 – пассивный коэффициент линейного расширения;

δ – суммарная толщина биметаллической пластины; длина биметаллической пластины;

τ – превышение температуры биметаллической пластины относительно окружающей среды. Незакрепленный конец элемента развивает усилие

$$P = 3/16 (\alpha_1 - \alpha_2)(b\delta^2/l)ET, \quad (3.4)$$

где b – ширина биметаллической пластины;

$E = (E_1 + E_2)/2$ – средний модуль упругости биметаллической пластины.

Из вышеприведенных формул видно, что значение прогиба и усилия тем больше, чем больше разность $\alpha_1 - \alpha_2$.

Для получения большого прогиба необходима пластина большой длины и малой толщины. В то же время при необходимости получения большого усилия целесообразно иметь широкую пластину с малой длиной и большой толщиной.

Конструктивные формы биметаллических пластин разнообразны. Нагрев биметаллической пластины может осуществляться током цепи (ток протекает непосредственно через пластину) – прямой нагрев. При косвенном нагреве ток цепи протекает по нагревательному элементу и теплота от нагревательного элемента передается пластине. При комбинированном способе нагрева ток цепи протекает по пластине и нагревательному элементу соответственно.

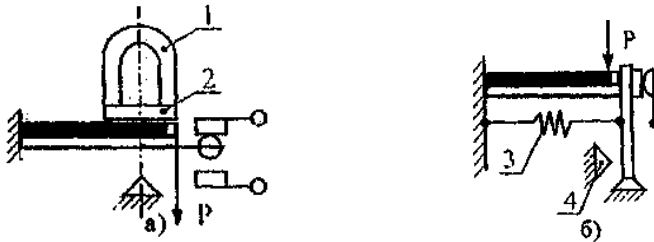


Рис. 3.13. Некоторые схемы устройства биметаллических электротепловых реле

Непосредственное воздействие биметаллической пластины на контакты нерационально, поскольку расхождение или замыкание контактов при изменении температуры происходит медленно, и

они будут подгорать. Поэтому применяются различные механизмы ускорения.

Система, представленная на рисунке 3.13а, лишена указанного недостатка. В замкнутом положении контакта контактное нажатие создается небольшим магнитом 1, притягивающим связанный с биметаллической пластиной якорь 2. При нагревании биметаллическая пластина стремится оторвать якорь от магнита. Когда температура пластины достигнет некоторого значения, соответствующего уставке срабатывания, усилие пластины преодолет притяжение магнита, и пластина скачком перейдет в нижнее положение, размыкая одни контакты и замыкая другие. Возврат реле происходит автоматически после остывания пластины.

В системе, представленной на рисунке 3.13б, биметаллическая пластина служит защелкой. Она же создает контактное нажатие за счет пружинящих свойств контактного рычага. При нагреве конец пластины изогнется вверх и освободит контактный рычаг. Под действием пружины 3 контакты разомкнутся. Движение контакта ограничивается упором 4. Эта система не имеет самовозврата, так как после остывания пластина не может вернуть контакты в исходное положение. Возврат реле здесь принудительный – обычно ручной.

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены токовые и тепловые реле.
2. Назовите основные части, объясните принцип действия и укажите область применения РТ-40 и РН-53.
3. Назовите основные части, объясните принцип действия и укажите область применения токового реле РТ-80.
4. Назовите основные части, объясните принцип действия и укажите область применения реле времени ЭВ-100.
5. Назовите основные части, объясните принцип действия и укажите область применения быстронасыщающегося трансформатора БНТ, реле РНТ-565.
6. Назовите основные части, объясните принцип действия и укажите область применения реле направления тока РБМ-171.
7. Объясните принцип действия терромагнитных реле тока.

Лабораторно-практическая работа №4

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия максимальной токовой защиты. Научиться собирать цепи максимальных токовых защит, снимать их защитные характеристики, рассчитывать уставки и выполнять настройку защиты для конкретных условий.

Одним из признаков КЗ или перегрузки в электрических сетях является появление сверхтока в линии, который становится значительно больше рабочего тока нагрузки. Именно на использовании этого принципа основано действие токовых защит.

Зависимость времени срабатывания защиты от протекающего через нее тока называют *временотокковой характеристикой* защиты.

По характеру зависимости времени действия максимальной токовой защиты (МТЗ) от тока различают:

- защиты с независимой от тока выдержкой времени;
- защиты с зависимой от тока выдержкой времени.

Бросок тока в линии не всегда является признаком повреждения на ней. Например, пуск мощного асинхронного электродвигателя так же, как и короткое замыкание в линии, вызовет увеличение рабочего тока линии. Поэтому МТЗ должна распознать вид повреждения и правильно отключить поврежденный участок.

Ток срабатывания (уставка по току) МТЗ (ток срабатывания защиты – это наименьший первичный ток в защищаемой цепи, необходимый для приведения МТЗ в действие) определяют по формуле

$$I_{сз} = (K_n K_{сзн} K_{сх}) / (K_в N_{тт}) I_{раб.макс.}, \quad (4.1)$$

где K_n – коэффициент надежности реле ($K_n = 1,2-1,4$);

$K_{сзн}$ – коэффициент самозапуска электродвигателей после отключения КЗ ($K_{сзн} = 1,2-1,6$);

$K_{сх}$ – коэффициент, зависящий от схемы соединения реле с группой трансформаторов тока ($K_{сх} = 1-2$);

$K_в$ – коэффициент возврата реле ($K_в = 0,8$);

$N_{тт}$ – коэффициент трансформации трансформаторов тока;

$I_{раб.макс.}$ – максимально возможная величина рабочего тока в защищаемом участке.

Чувствительность защиты оценивают коэффициентом чувствительности, представляющим отношение минимального тока КЗ в конце защищаемой линии к току срабатывания защиты $K_{\text{ч}} = I_{\text{кз мин}}/I_{\text{сз}}$.

Для основной зоны допустимое значение $K_{\text{чувс.}} \geq 1,5$, а для зоны резервирования – $K_{\text{чувс.}} \geq 1,2$.

Порядок выполнения работы (стенд СЭС-1-Н-К):

1) убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания;

2) соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» однофазного источника питания *G1*;

3) соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений;

4) отключите (если включен) выключатель *A9*;

5) установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора *A1*, например, 1,0;

6) установите желаемые параметры линии электропередачи *L*, например, 100 Ом и 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линий электропередачи *A2* и *A3* равными 50 Ом и 0,1 Гн;

7) установите желаемый ток срабатывания реле *A10*, например, 1,0 А;

8) установите желаемое время срабатывания реле *All*, например, 1,0 с;

9) включите выключатель «СЕТЬ» измерителя *P1*;

10) включите источник *G1*. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка;

11) включите выключатель *A9*. В результате загорится зеленая лампа блока *A8*, сигнализирующая о подаче оперативного напряжения;

12) нажмите верхнюю кнопку поста управления *A7*. В результате включится контактор *A4* (выключатель *Q*) и на модели линий *A2*, *A3* (линию *L*) будет подано напряжение. Об этом будет сигнализировать загоревшаяся красная лампа в блоке *A8*. Зеленая лампа в блоке *A8* погаснет;

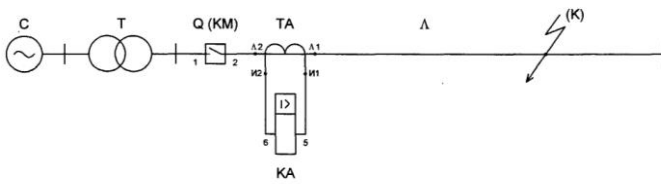


Рис. 4.1. Схема защиты

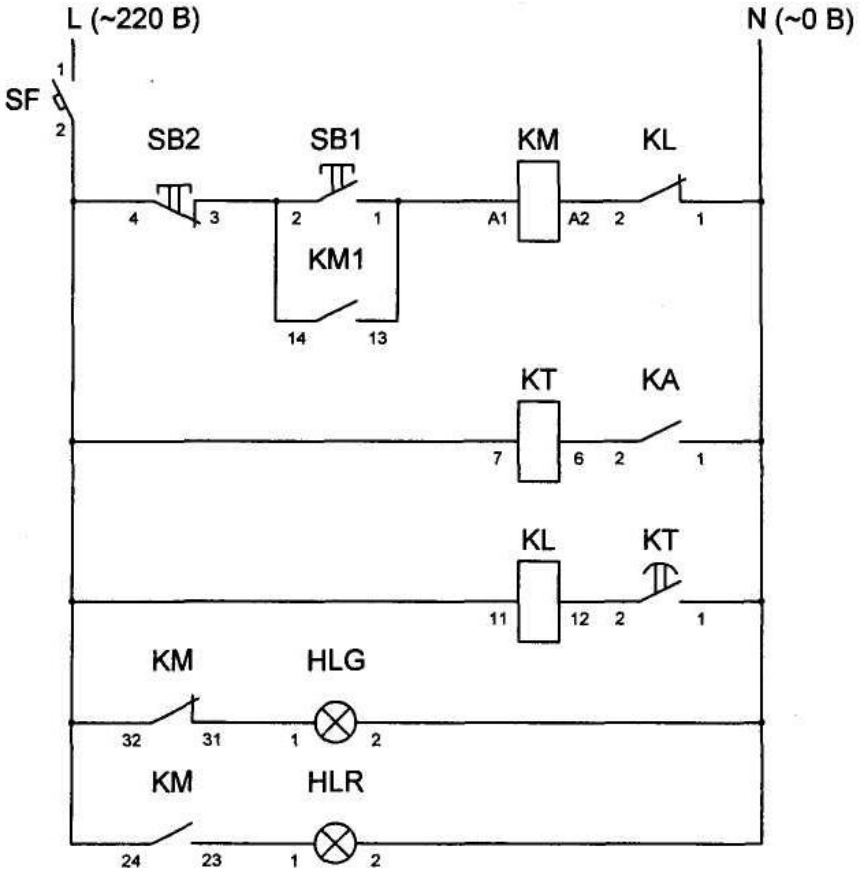


Рис. 4.2. Принципиальная схема

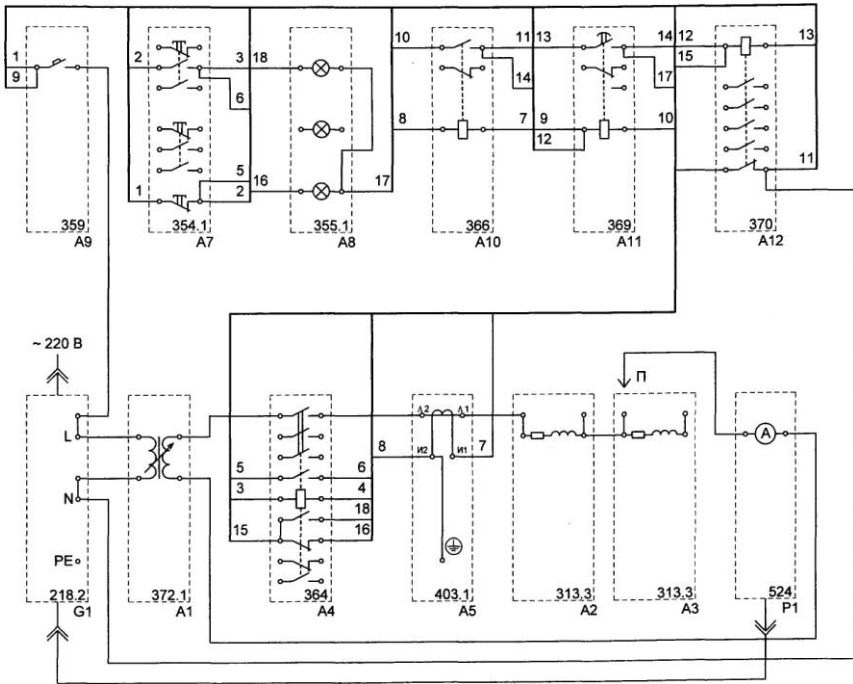


Рис. 4.3. Схема электрическая соединений

13) смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи *Л*. Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий *A2* и *A3*. В результате сработает максимальная токовая защита и поврежденная линия электропередачи *Л* (модели линий *A2*, *A3*) с выдержкой времени отключится (отключатся) от источника питания выключателем *Q* (контактором *A4*). Красная лампа в блоке *A8* погаснет, а зеленая загорится;

14) с индикаторов измерителя *P1* считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты;

15) выньте проводник «П» из гнезда;

16) по завершении эксперимента отключите однофазный источник питания *G1* и выключатель «СЕТЬ» измерителя *PL*.

Моделируя варианты коротких замыканий, в таблицу 4.1 запишите значения времени работы защиты и тока короткого замыкания.

Таблица 4.1

Показатели опыта токовой защиты

№ опыта	Место расположения точки КЗ	Уставки реле защиты		Время срабатывания, с	Ток КЗ, А
		время, с	ток, А		
1					
2					
3					

Постройте графики зависимостей тока короткого замыкания и времени срабатывания защиты от места расположения точки короткого замыкания на линии электропередачи.

Определите коэффициент чувствительности, представляющий отношение минимального тока КЗ в конце защищаемой линии к току срабатывания защиты.

Контрольные вопросы

1. Чем и как регулируют уставки по току и по времени?
2. Особенности максимально-токовых защит МТЗ.
3. Как оценивают чувствительность защиты?
4. Достоинства максимальной токовой защиты.
5. Недостатки максимальной токовой защиты.

Лабораторно-практическая работа №5

ИСПЫТАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИНДУКЦИОННОГО ТЯГОВОГО РЕЛЕ

Цель работы: изучить особенности применения защиты, ее достоинства и недостатки, устройство и работу индукционного реле.

Принципы действия и выполнения индукционных систем. Работа индукционных реле основана на взаимодействии переменных магнитных потоков с токами, индуцированными ими в подвижной системе реле. Основными элементами реле являются два электромагнита 1 и 2, подвижная система 3, расположенная в магнитном поле электромагнитов (рис. 5.1). Подвижная система выполняется из немагнитного электропроводящего материала в виде медного или алюминиевого диска, либо полого цилиндра (барabanчика), закрепленного на вращающейся оси 4. С осью 4 жестко связан подвижный контакт реле 5, замыкающий при повороте неподвижные контакты 6. Движению диска в сторону замыкания контактов противодействует спиральная пружина 7. Обмотки электромагнитов 1 и 2 питаются переменными (синусоидальными) токами I_1 и I_2 , которые создают переменные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 . Положительное направление токов и соответствующее им положительное направление потоков, определяемое по правилу буравчика, показано на рисунке 5.1. Векторная диаграмма их изображена на рисунке 5.2. Пренебрегая потерями на намагничивание, потоки Φ_1 и Φ_2 показаны на диаграмме совпадающими с токами I_1 и I_2 . Магнитный поток Φ_1 , пронизывая подвижную систему 3, наводит в диске ЭДС $E_{Д1} = \partial\Phi_1/\partial t$, поток Φ_2 – ЭДС $E_{Д2} = -\partial\Phi_2/\partial t$. Наведенные ЭДС отстают по фазе на 90° от вызывающих их магнитных потоков. Под действием ЭДС $E_{Д1}$ и $E_{Д2}$ в подвижной системе возникают вихревые токи $I_{Д1}$ и $I_{Д2}$, замыкающиеся вокруг оси индуцирующего их магнитного потока. Положительные направления $I_{Д1}$ и $I_{Д2}$, определенные по правилу буравчика по положительному направлению потоков Φ_1 и Φ_2 , показаны на рисунке 5.2. Вследствие малой индуктивности контура вихревых токов их векторы $I_{Д1}$ и $I_{Д2}$ принимаются совпадающими по фазе с вызвавшими их ЭДС ($E_{Д1}$ и $E_{Д2}$).

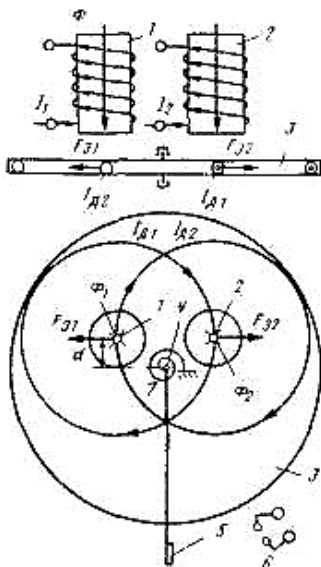


Рис. 5.1. Принцип устройства индукционного реле

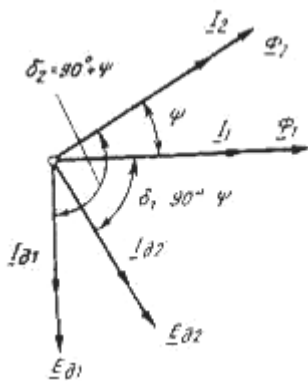


Рис. 5.2. Векторная диаграмма ЭДС, токов и магнитных потоков индукционного реле

В рассматриваемой конструкции возникают две силы: $F_{31} = k_1 \Phi_1 I_{\delta 2}$ – обусловленная взаимодействием магнитного потока Φ_1 и тока $I_{\delta 2}$, наведенного другим потоком Φ_2 , и

$F_{\Sigma 2} = \kappa 2\Phi_2 I_{Д1}$, вызванная воздействием потока Φ_2 на ток Д1 наведенный потоком Φ_1 .

Силы взаимодействия потока Φ_1 со «своим» током $I_{Д1}$ и Φ_2 с вихревым током $I_{Д2}$ равны нулю. Направление сил $F_{\Sigma 1}$ и $F_{\Sigma 2}$ и создаваемые ими моменты вращения $M_{\Sigma 1}$ и $M_{\Sigma 2}$ определяются их средними значениями за период, которые зависят от угла сдвига фаз между взаимодействующими потоками и токами в диске. Силы $F_{\Sigma 1}$ и $F_{\Sigma 2}$ определяются по правилу «левой руки» и показаны на рисунке 5.1. Результирующая электромагнитная сила $F_{\Sigma} = F_{\Sigma 1} + F_{\Sigma 2}$. Результирующий электромагнитный момент $M_{\Sigma} = F_{\Sigma} d$, где d – плечо силы F_{Σ} относительно оси вращения. Момент M_{Σ} приводит в движение подвижную систему 3, которая в зависимости от знака (направления) M_{Σ} действует в сторону замыкания или размыкания контактов реле 5.

Электромагнитная сила F_{Σ} и ее момент M_{Σ} . Значение результирующей электромагнитной силы F_{Σ} выражается через магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , создаваемые токами, питающими обмотки электромагнитов реле, угол сдвига фаз между ними φ и частоту входных токов f : $F_{\Sigma} = \kappa' f \Phi_1 \Phi_2 \sin \varphi$.

Соответственно электромагнитный момент

$$M_{\Sigma} = F_{\Sigma} d = \kappa'' f \Phi_1 \Phi_2 \sin \varphi, \quad (5.1)$$

где Φ_1 и Φ_2 – действующие значения магнитных потоков, $\kappa, \kappa', \kappa''$ – постоянные величины.

Анализируя выражение (5.1), можно сделать следующие выводы:

1) результирующий момент пропорционален действующим (или амплитудным) значениям магнитных потоков и зависит от сдвига фаз φ между токами, подведенными к реле. Это означает, что индукционные реле могут служить для сравнения фаз входных токов. Реле имеет максимальный момент при $\varphi = 90^\circ$ и не действует при $\varphi = 0$;

2) знак момента зависит от $\sin \varphi$. Результирующая сила F_{Σ} направлена от оси опережающего к оси отстающего магнитного потока;

3) конструкция реле должна обеспечить создание не менее двух переменных магнитных потоков (Φ_1 и Φ_2), пронизывающих подвижную систему в разных точках и сдвинутых по фазе на угол $\varphi \neq 0$;

4) поскольку действующие значения магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 являются постоянными величинами, то мгновенное значение моментов индукционных реле в отличие от электромагнитных не изменяется во времени. Поэтому у индукционных реле отсутствует вибрация контактов, если токи и напряжения, создающие соответствующие потоки, синусоидальны;

5) на индукционном принципе могут выполняться только реле переменного тока: реле тока, направления мощности, сопротивления и др.

Порядок выполнения работы:

- 1) спишите паспортные данные реле;
- 2) зарисуйте схему (рис. 5.3);
- 3) начертите таблицу испытаний реле;
- 4) изучите устройство реле;
- 5) сделайте прогноз: как влияет на ток срабатывания индукционного реле изменение количества витков обмотки?
- 6) соберите схему (рис. 5.3), рычажок тумблера SA15 должен быть внизу. Затем приступайте к выполнению лабораторной работы. Проверьте токи срабатывания на указанных уставках. Для этого включите тумблер SA5, переведите PR1 в крайнее левое положение, V1 покажет некоторое начальное напряжение.

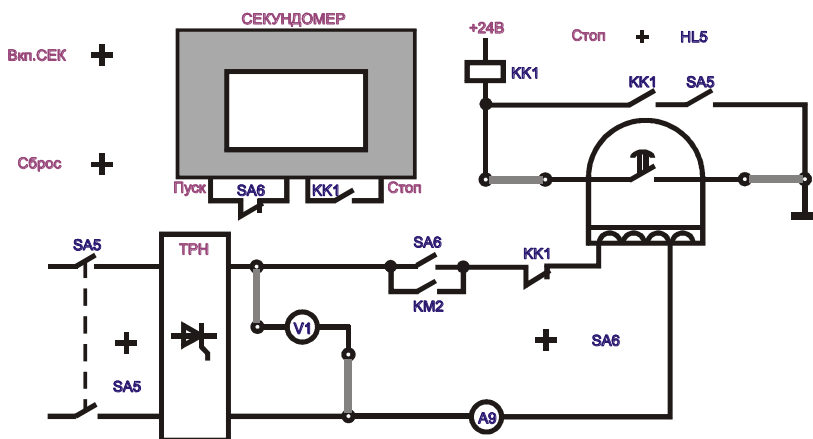


Рис. 5.3. Схема опыта

Включите SA6, медленно увеличивая PR1, следите за показанием A9, для расширения предела которого используйте его кнопку.

Определите ток начала работы реле (диск начинает вращаться) $I_{н.р.}$, А. Продолжая увеличивать ток в обмотке реле, с помощью ТРН засеките ток срабатывания $I_{с.р.}$ (зубчатый сектор входит в зацепление), по окончании отсчета загорается HL5. Затем уменьшите его до величины отпуска катушки $I_{в.р.}$.

ВНИМАНИЕ! Не допускать случаев, когда по какой-либо причине реле находится в состоянии срабатывания электромагнитного элемента более 5 с и при замыкании контактов от привода реле времени более 2 с. Между экспериментами делать паузы 1 мин.

Рассчитайте коэффициент возврата по формуле $K_v = I_{в.р.}/I_{с.р.}$. Результаты опытов занести в таблицу 5.1;

Таблица 5.1

Показатели опыта максимальной токовой защиты

N опыта	$I_{ср.}$ по уставке, А	Опытные данные			
		$I_{ср.}$, А	$I_{в.р.}$, А	K_v	ток начала работы реле $I_{н.р.}$, А
1					
2					
3					
4					
5					

7) проанализируйте опытные данные;

8) сделайте прогноз: как влияет на ток срабатывания отсечки воздушный зазор между якорем и электромагнитом? Дайте письменный ответ;

9) установите максимальную уставку по времени. Уставку индукционного элемента реле установите минимальной. Изменяя воздушный зазор между якорем и электромагнитом определите токи срабатывания электромагнитного элемента реле (отсечки). Для этого после включения ТРН выведите PR1 в крайнее левое положение, после чего замкните SA6 и увеличивая ток при помощи PR1 следите за показанием A9, пока не сработает электромагнитный элемент (*рекомендуется слегка придерживать поворотный механизм пальцами, чтобы исключить зацепление зубчатого сектора с червяком*).

Рекомендации: перед началом эксперимента переключите катушку реле на 6-й контакт (что соответствует току 0,3А, установите ток в катушке 0,6А ($2I_n$)). Придерживая пальцами поворотный механизм, поворачивайте регулировочный винт воздушного зазора электромагнитного элемента до тех пор, пока он не сработает. Отключите SA5. Зазор отрегулирован. Теперь можно проводить измерения для остальных отводов катушки.

Повторите опыт на другом значении уставки индукционного элемента реле, опытные данные занесите в таблицу 5.2.

Таблица 5.2

Показатели опыта максимальной токовой защиты

Ток уставки индукционного элемента реле, А	Кратность уставки отсечки	Ток срабатывания электромагнитного элемента, А	Примечание
1			
2			
3			
4			
5			

Установите уставку индукционного элемента реле. Якорь электромагнитного элемента реле закрепите до замыкания его контактов. Снимите 5-12 точек зависимости времени срабатывания реле от тока в обмотке реле.

Включите ТРН тумблером SA5 и замкните SA6, установите при помощи PR1 некоторый ток I_p , после чего разомкните SA6. Произведите сброс секундомера при помощи кнопки SB3. Затем вновь подайте напряжение на реле тумблером SA6. При этом пойдёт отсчёт времени срабатывания реле при установленном токе в его катушке. Когда реле сработает, загорится HL5, время на индикаторе зафиксируется, а цепь, подающая напряжение на катушку, заблокируется контактом контрольного реле KK1. Чтобы вернуть схему в исходное состояние, необходимо отключить тумблеры SA5 и SA6. Для повторения эксперимента необходимо вновь включить тумблер SA5, произвести сброс показаний секундомера и включить тумблер SA6. Далее увеличить ток и проделать вышеуказанные операции.

Результаты моделирования занести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Расчетная таблица характеристики $t_c = f(I_p/I_{уст.})$

N	Кратность тока $I_p/I_{уст.}$	Время срабатывания, с
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		
6.		
7.		
8.		
9.		
10.		
11.		
12.		

По данным таблицы 5.3 постройте характеристику $t_c = f(I_p/I_{уст.})$.

Контрольные вопросы

1. Устройство реле РТ-84?
2. Работа индукционного элемента реле и его назначение?
3. Работа отсечки (электромагнитного элемента) реле, регулирование тока срабатывания отсечки?
4. Назначение постоянного магнита в реле?
5. Назначение короткозамкнутых витков электромагнита реле?
6. Преимущество применения в схемах защиты реле РТ-84 по сравнению с РТ-40?
7. Зависимость времени срабатывания реле от тока в обмотке реле?

Лабораторно-практическая работа №6 МОДЕЛИРОВАНИЕ МГНОВЕННОЙ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия мгновенной токовой отсечки. Научиться собирать цепи мгновенных токовых отсечек, снимать их защитные характеристики, рассчитывать уставки и выполнять настройку защиты для конкретных условий.

Токовая отсечка – разновидность токовой защиты, позволяющая обеспечить быстрое отключение КЗ.

Токовые отсечки (ТО) подразделяются на следующие:

- отсечки мгновенного действия;
- отсечки с выдержкой времени (0,3-0,6 с).

Селективность токовых отсечек достигается ограничением их зоны работы. Величина тока КЗ, протекающего по линии, зависит от места повреждения:

$$I_k = E_c / (X_c + X_{wk}) = E_c / (X_c + X_y L_k), \quad (6.1)$$

где E_c – ЭДС системы;

X_c – сопротивление системы;

X_{wk} – сопротивление линии до точки КЗ;

X_y – удельное сопротивление линии;

L_k – длина от начала линии до места КЗ.

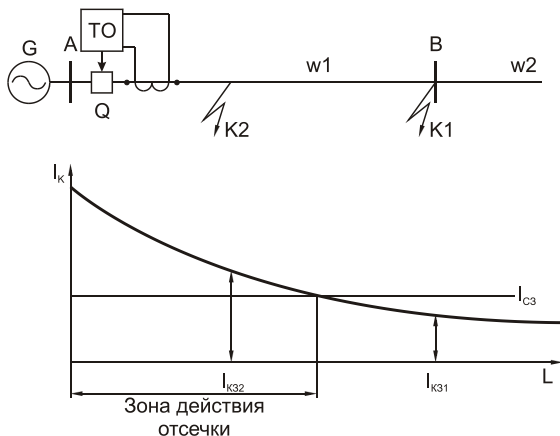


Рис. 6.1. Токовая отсечка (ТО)

Для обеспечения селективности ток срабатывания защиты больше тока КЗ на шинах противоположной подстанции $I_{C3} > I_{K31}$.

Токовые отсечки применяются как в радиальных сетях с односторонним питанием, так и в сети, имеющей двустороннее питание.

Токовые отсечки используются как основные (в сетях низкого напряжения) и резервные (сети высокого напряжения) защиты на линиях с односторонним питанием. На линиях с двусторонним питанием отсечки используются как резервные защиты.

Ток срабатывания отсечки. По условию селективности защита не должна работать за пределами защищаемой линии AB , в точке B (рис. 6.2):

$$I_{C3} = k_H I_{K(B)_{\max}}, \quad (6.2)$$

где $I_{K(B)_{\max}}$ – максимальный ток КЗ в фазе линии при КЗ на шинах подстанции B ;

k_H – коэффициент надежности, 1,2-1,3 – для отсечек ЛЭП с реле типа РТ.

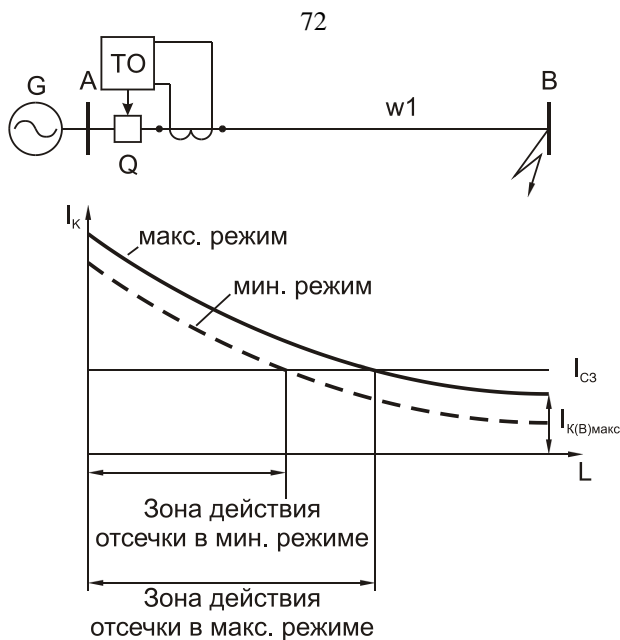


Рис. 6.2. Зона действия ТО

Зона действия *ТО* определяется графически (рис. 6.2) или по формуле

$$X_{mo}\% = 100/X_w(E_c/I_{c3} - X_c), \quad (6.3)$$

где X_w – сопротивление линии;

X_c – сопротивление системы.

ПУЭ рекомендуют применять отсечку, если её зона действия охватывает не меньше 20% защищаемой линии.

Для устранения *мертвой зоны направленных защит* отсечка применяется и при меньшей зоне действия.

При схеме работы линии *блоком с трансформатором* отсечку отстраивают от тока КЗ за трансформатором (рис. 6.3). В этом случае отсечка защищает всю линию и весьма эффективна.

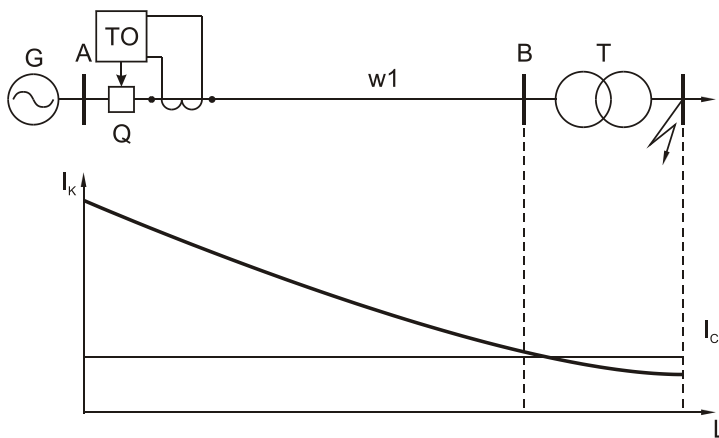


Рис. 6.3. Зона действия *ТО* с трансформатором

Время действия отсечки. При применении быстродействующих промежуточных реле (с временем срабатывания 0,02 с) $t_{TO}=0,04-0,06$.

В схемах с промежуточными реле в расчетах не учитывается апериодическая составляющая тока, поскольку она затухает очень быстро, за 0,02-0,03 с.

На линиях, защищенных от перенапряжений трубчатыми разрядниками, отсечка может сработать при их действии. Время срабатывания разрядника: $t_p = 0,01-0,02$ с, а при их каскадном действии – 0,04-0,06 с. В этом случае применяют промежуточные реле с временем действия – 0,06-0,08 с.

Достоинства:

- 1) конструктивно одна из самых простых защит;
- 2) высокая быстрота действия.

Недостатки:

- 1) неполный охват зоной действия защищаемой линии;
- 2) непостоянство зоны действия под влиянием сопротивлений в месте повреждения и изменений режима системы.

Порядок выполнения работы (стенд СЭС-1-Н-К):

- 1) убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания;
- 2) соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» однофазного источника питания GI ;
- 3) соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений;
- 4) отключите (если включен) выключатель $A9$;
- 5) установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора $A1$, например, 1,0;
- 6) установите желаемые параметры линии электропередачи L , например, 100 Ом и 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линий электропередачи $A2$ и $A3$ равными 50 Ом и 0,1 Гн;
- 7) установите желаемый ток срабатывания реле $A10$, например, 1,0 А;
- 8) включите выключатель «СЕТЬ» измерителя PI ;
- 9) включите источник GI . О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка;
- 10) включите выключатель $A9$. В результате загорится зеленая лампа блока $A8$, сигнализирующая о подаче оперативного напряжения;
- 11) нажмите верхнюю кнопку поста управления $A7$. В результате включится контактор $A4$ (выключатель Q) и на модели линий $A2$, $A3$ (линию L) будет подано напряжение. Об этом будет сигнализировать загоревшаяся красная лампа в блоке $A8$. Зеленая лампа в блоке $A8$ погаснет;
- 12) смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи L . Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий $A2$ и $A3$. В результате сработает мгновенная токовая отсечка

и поврежденная линия Л (модели линий А2, А3) отключится от источника питания выключателем Q (контактором А4). Красная лампа в блоке А8 погаснет, а зеленая загорится;

13) с индикаторов измерителя Р1 считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты;

14) выньте проводник «П» из гнезда;

15) по завершении эксперимента отключите однофазный источник питания G1 и выключатель «СЕТЬ» измерителя Р1.

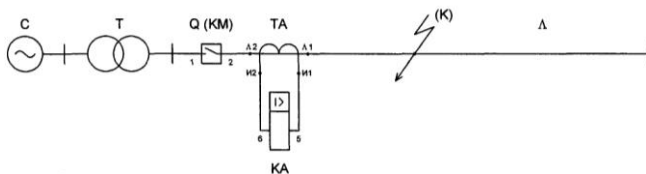


Рис. 6.4. Схема токовой отсечки

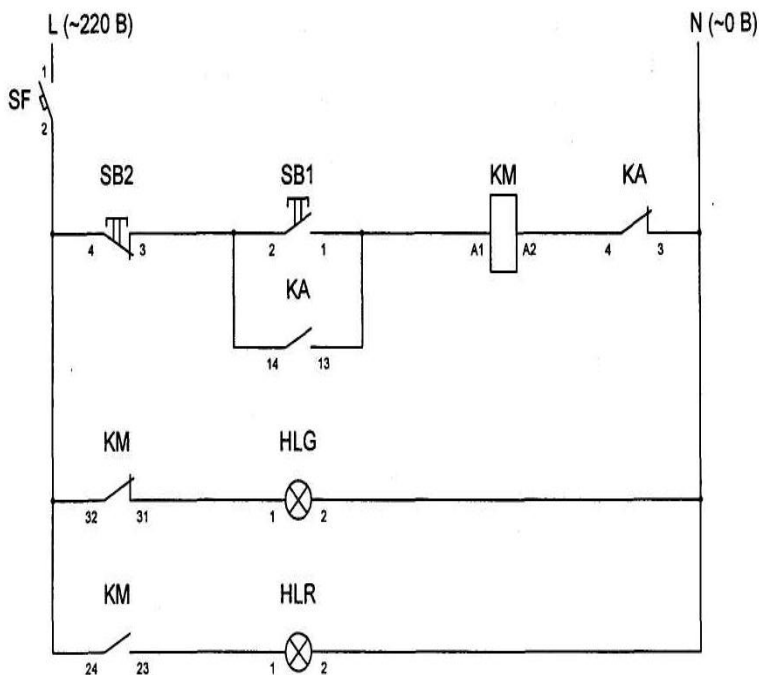


Рис. 6.5. Схема электрическая принципиальная

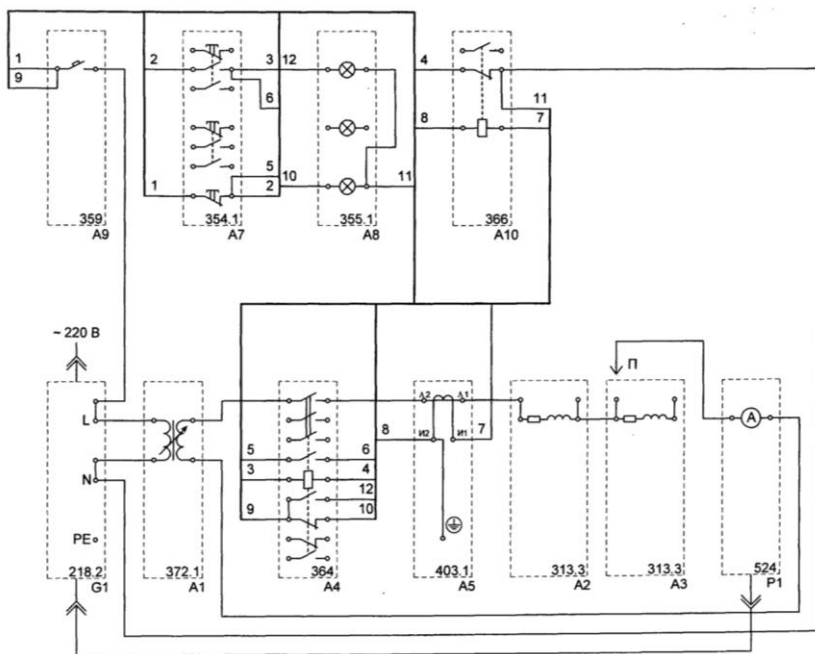


Рис. 6.6. Схема электрическая соединений

Моделируя варианты коротких замыканий, запишите в таблицу 6.1 полученные данные значений времени работы защиты и тока короткого замыкания.

Таблица 6.1

Значения опыта токовой отсечки

№	Уставка тока срабатывания реле, А	Параметры линии электропередачи		Время срабатывания, с	Ток КЗ, А
		R	L		
1.					
2.					
4.					
5.					
6.					
7.					

Постройте графики зависимостей тока короткого замыкания и времени срабатывания защиты от места расположения точки короткого замыкания на линии эл. передачи.

Определите коэффициент чувствительности, представляющим отношение минимального тока КЗ в конце защищаемой линии к току срабатывания защиты. Определить зону действия отсечки рекомендуемой ПЭУ.

Контрольные вопросы

1. Чем и как регулируют уставки по току и по времени?
2. Особенности токовой отсечки защит МТЗ.
3. Как оценивают чувствительность защиты?
4. Достоинства токовой отсечки защиты.
5. Недостатки токовой отсечки защиты.

Лабораторно-практическая работа №7

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ РАДИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия максимальной токовой защиты радиальной электрической сети с односторонним питанием. Научиться собирать цепи максимальной токовой защиты радиальной электрической сети с односторонним питанием, снимать их защитные характеристики, рассчитывать уставки и выполнять настройку защиты для конкретных условий.

Появление сверхтока в каком-либо элементе не всегда является признаком повреждения именно этого элемента. Дело в том, что сверхток проходит не только по поврежденному элементу, но и по связанным с ним неповрежденным элементам электроустановки или электросети. Так, например, в электросети, состоящей из трех последовательно соединенных участков (рис. 7.1), при КЗ в точке K сверхток I_K проходит от источника питания E к месту повреждения как по поврежденному участку I , так и по неповрежденным участкам II и III .

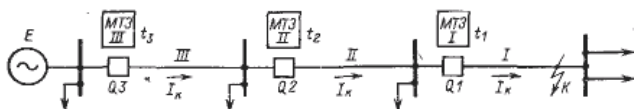


Рис. 7.1. Работа максимальной токовой защиты в радиальной сети с односторонним питанием

Если сверхток превысит ток срабатывания, то придут в действие (запустятся) и сработают максимальные токовые защиты всех трех участков: $MTЗ I$, $MTЗ II$, $MTЗ III$. В результате такого действия будут отключены не только поврежденный, но и неповрежденные участки электросети, что недопустимо. Правильная ликвидация аварии будет иметь место лишь в том случае, если сработает только защита $MTЗ I$ и отключит выключатель $Q1$, ближайший к месту повреждения.

Таким образом, вторым требованием, которому должна удовлетворять максимальная токовая защита, является правильный выбор поврежденного участка. Для выполнения этого требования,

которое называется *избирательностью* или *селективностью*, максимальные токовые защиты участков электросети должны иметь различное время срабатывания, возрастающее по направлению к источнику питания.

Время срабатывания защиты от момента возникновения сверхтока до воздействия на выключатель называется *выдержкой времени*. В рассматриваемом случае наименьшую выдержку времени t_1 должна иметь защита *МТЗ I*, несколько большую t_2 – защита *МТЗ II* и еще большую t_3 – защита *МТЗ III*. При такой настройке выдержек времени защит электросети (рис. 7.1) при возникновении КЗ в точке *K* запустятся все защиты, но первой сработает защита *МТЗ I* и отключит выключатель *Q1*. После этого прохождение тока КЗ прекратится и защиты *МТЗ II* и *МТЗ III* вернуться в исходное положение до того, как истечет установленная на них выдержка времени. В результате ликвидации аварии будет отключен только поврежденный участок *I*, а неповрежденные участки *II* и *III* останутся в работе.

Для выявления момента возникновения аварии и обеспечения действия в рассмотренной выше последовательности максимальная токовая защита состоит из двух органов: *пускового органа*, который выявляет момент возникновения КЗ или другого нарушения нормального режима работы и производит пуск защиты, и *замедляющего органа* (органа выдержки времени), который замедляет действие защиты для обеспечения селективности. В качестве пусковых органов максимальной токовой защиты используются реле увеличения тока (максимальные токовые реле), а в качестве замедляющего органа – реле времени. Токовые реле типов РТВ, РТ-80, РТ-90 содержат в себе оба органа. Поэтому при выполнении максимальной токовой защиты с использованием этих реле отдельные реле времени не устанавливаются.

Как известно, указанные выше токовые реле имеют зависимую характеристику времени срабатывания. Поэтому максимальная токовая защита, выполняемая с помощью этих реле, называется максимальной токовой защитой с зависимой характеристикой времени срабатывания (кривая *a* на рисунке 7.2).

При использовании в качестве пусковых органов максимальной токовой защиты токовых реле мгновенного действия типа РТ-40 выдержка времени создается отдельными реле времени типа

ЭВ или РВМ. Время срабатывания максимальной токовой защиты, выполненной с помощью указанных реле, не зависит от тока КЗ, так как реле времени всегда срабатывают с одним и тем же установленным на них временем срабатывания. Поэтому защита такого типа называется максимальной токовой защитой с независимой характеристикой времени срабатывания (прямая *б* на рисунке 7.2).

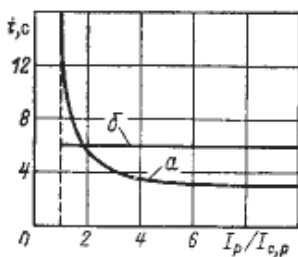


Рис. 7.2. Характеристики времени срабатывания максимальной токовой защиты:

а – зависимая; б – независимая

Порядок выполнения работы (стенд СЭС-1-Н-К):

- 1) убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания;
- 2) соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» однофазного источника питания *Г1*;
- 3) соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений;
- 4) отключите (если включен) выключатель *А9*;
- 5) установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора *А1*, например, 1,0;
- 6) установите переключателями желаемые параметры моделей линий электропередачи *А2* и *А3*, например, 50 Ом и 0,1 Гн;
- 7) установите желаемый ток срабатывания реле *А10* и *А15*, например, 1,0 А;
- 8) установите желаемое время срабатывания реле *АН*, например, 1,0 с;
- 9) включите выключатель «СЕТЬ» измерителя *Р1*;
- 10) включите источник *Г1*. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка;

11) включите выключатель *A9*. В результате загорится зеленая лампа блока *A8*, сигнализирующая о подаче оперативного напряжения;

12) нажмите последовательно две верхние кнопки поста управления *A7*. В результате включатся выключатели *Q1*, *Q2* (контакторы *A4*, *A13*) и на линии *Л1*, *Л2* (модели линий *A2*, *A3*) будет подано напряжение. Об этом будут сигнализировать загоревшиеся красные лампы в блоке *A8*. Зеленая лампа в блоке *A8* погаснет;

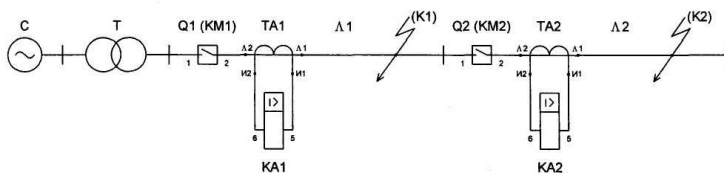


Рис. 7.3. Схема максимальной токовой защиты радиальной электрической сети с односторонним питанием

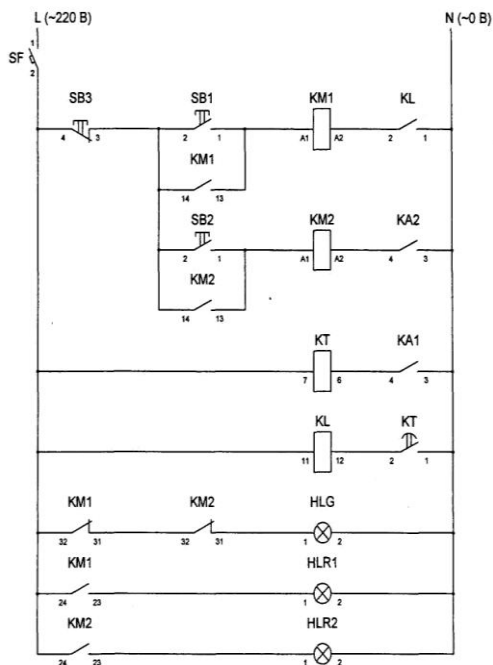


Рис. 7.4. Принципиальная схема максимальной токовой защиты радиальной электрической сети с односторонним питанием

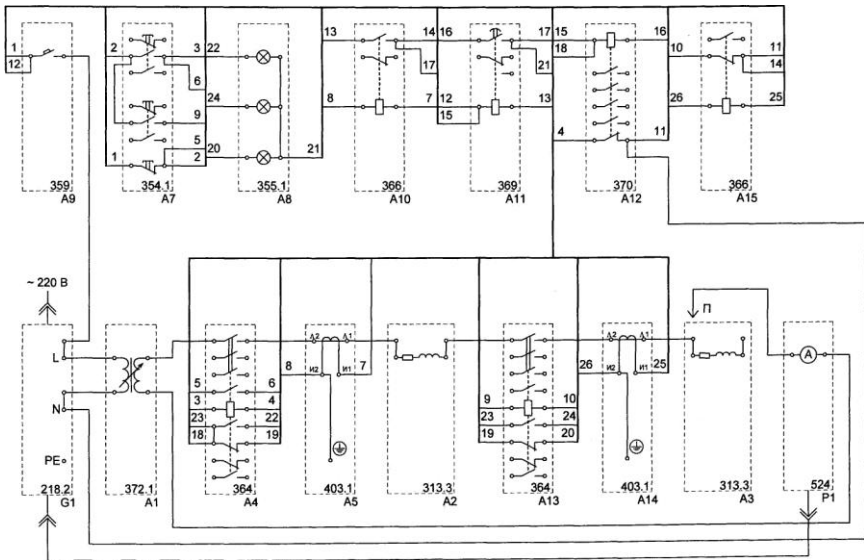


Рис. 7.5. Схема электрических соединений максимальной токовой защиты радиальной электрической сети с односторонним питанием

13) смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи Л2. Для чего воткните проводник «П» в гнездо начала модели линии А3. В результате сработает мгновенная токовая отсечка и поврежденная линия Л2 (модель линии А3) отключится от источника питания выключателем Q2 (контактором А13). Вторая сверху красная лампа в блоке А8 погаснет;

14) с индикаторов измерителя P1 считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты;

15) извлеките проводник «П» из гнезда;

16) нажмите вторую сверху кнопку поста управления А7. В результате включится выключатель Q2 (контактор А13) и на линию Л2 (модель линии А3) вновь будет подано напряжение. Об этом будет сигнализировать загоревшаяся вторая сверху красная лампа в блоке А8;

17) смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи Л1. Для чего воткните проводник «П» в гнездо конца модели линии А2. В результате сработает максимальная токовая защита и поврежденная линия электропередачи Л1 (модель линии А3) с выдержкой времени отключится от источника питания

выключателем $Q1$ (контактором $A4$). Первая сверху красная лампа в блоке $A8$ погаснет;

18) с индикаторов измерителя $P1$ считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты;

19) выньте проводник «П» из гнезда;

20) по завершении эксперимента отключите однофазный источник питания $G1$ и выключатель «СЕТЬ» измерителя $P1$.

Моделируя варианты коротких замыканий, в таблицу 7.1 запишите полученные данные значений времени работы защиты и тока короткого замыкания.

Таблица 7.1

Значения опыта максимальной токовой защиты

№	Место расположения точки КЗ	Уставки реле защиты		Время срабатывания, с	Ток КЗ, А
		время, с	ток, А		
1					
2					
4					
5					
6					
7					

Постройте графики зависимостей тока короткого замыкания и времени срабатывания защиты от места расположения точки короткого замыкания на линии электропередачи.

Определите коэффициент чувствительности, представляющий отношение минимального тока КЗ в конце защищаемой линии к току срабатывания защиты.

Контрольные вопросы

1. Чем и как регулируют уставки по току и по времени?
2. В чем проявляется селективность максимальных токовых защит МТЗ?
3. Как оценивают чувствительность защиты?
4. Достоинства максимальных токовых защит.
5. Недостатки максимальных токовых защит.
6. Какая защита называется максимальной токовой защитой с независимой характеристикой времени срабатывания?
7. В чем различие зависимых максимальных токовых защит от независимых?
8. Почему максимальные токовые защиты участков электросети должны иметь различное время срабатывания?

Лабораторно-практическая работа №8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия дифференциальной защиты электропередачи. Научиться собирать цепи дифференциальной защиты электропередачи, снимать их защитные характеристики, рассчитывать уставки и выполнять настройку защиты для конкретных условий.

Назначение и виды дифференциальных защит. На линиях отходящих от шин электростанций или узловых подстанций, часто по условиям устойчивости требуется обеспечить отключение КЗ в пределах *всей защищаемой линии без выдержки времени*. Это требование нельзя выполнить с помощью мгновенных токовых отсеков, защищающих только часть линии. Кроме того, отсеки неприменимы по условию селективности, на коротких ЛЭП, где токи КЗ в начале и в конце линии примерно одинаковы. В этих случаях используются *дифференциальные защиты (ДЗ)*, обеспечивающие мгновенное отключение КЗ в любой точке защищаемого участка и не действующие при КЗ за пределами зоны действия.

Дифференциальные защиты подразделяются на следующие:

- продольные – для защит как одинарных, так и параллельных линий;
- поперечные – для защиты только параллельных линий.

Продольная дифференциальная защита. Принцип действия продольных дифференциальных защит основан на сравнении величины и фазы токов в начале и конце защищаемой линии.

При КЗ вне защищаемой линии токи в начале и конце линии направлены в одну сторону и равны по величине (рис. 8.1, а). При КЗ в пределах защищаемой линии, токи направлены в разные стороны и не равны по величине (как правило) (рис. 8.1, б).

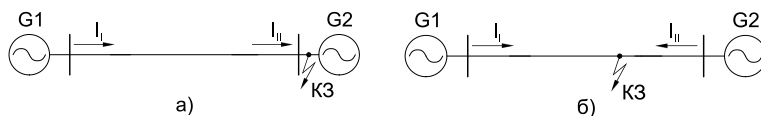


Рис. 8.1. Продольная дифференциальная защита

Принцип сравнения токов показан на рисунке 8.2: по концам линии установлены трансформаторы тока с *одинаковым* коэффициентом трансформации. Их вторичные обмотки соединяются кабелем и подключаются к *дифференциальному реле*.

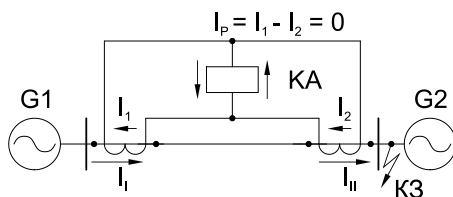


Рис. 8.2. Принцип сравнения токов

Различают две схемы построения дифференциальной защиты:

- 1) с циркулирующими токами;
- 2) с уравновешенными напряжениями.

На рисунке 8.2 представлена схема с циркулирующими токами. Для этой схемы ток, протекающий по реле, определяется по формуле $I_p = I_1/n_{T1} - I_2/n_{T2}$, при этом $n_{T1} = n_{T2} = n_T$.

При отсутствии погрешностей $I_1 = I_2$ и $I_p = 0$ реле не работает. Не происходит срабатывания и при качаниях в системе.

По принципу действия дифференциальная защита не реагирует на внешние КЗ, качания и токи нагрузки.

В действительности же трансформаторы тока работают с погрешностью: $I_1 - I_2 = I_{нб}$, чтобы не произошло ложного срабатывания защиты: $I_{с.з.} > I_{нб.макс.}$

Работа схемы с циркулирующими токами при КЗ на защищаемой линии с односторонним и двусторонним питанием представлена на рисунках 8.3а, б. Ток, протекающий через реле, определяется по формуле

$$I_p = I_1 + I_2 = I/n + I_{II}/n = I_{кз}/n,$$

где $I_{кз}$ – полный ток КЗ.

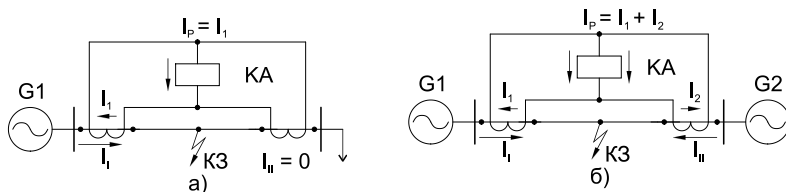


Рис. 8.3. Работа схемы с циркулирующими токами

Дифференциальная защита реагирует на *полный ток* I_{K3} в месте повреждения, поэтому в сети с двусторонним питанием она обладает большей чувствительностью, чем токовые защиты.

Схема с уравновешенными напряжениями. Работа дифференциальной защиты на основе схемы с уравновешенными напряжениями представлена на (рис. 8.4).

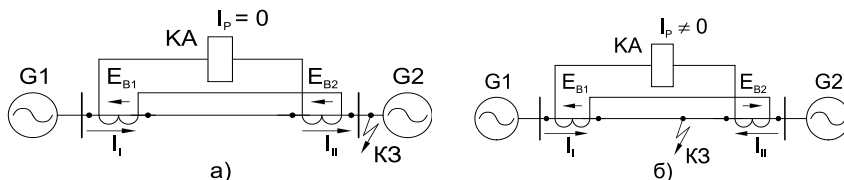


Рис. 8.4. Работа дифференциальной защиты на основе схемы с уравновешенными напряжениями

Порядок выполнения работы (стенд СЭС-1-Н-К):

- 1) убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания;
- 2) соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» однофазного источника питания $G1$;
- 3) соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений;
- 4) отключите (если включен) выключатель $A9$;
- 5) установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора $A1$, например, 1,0;
- 6) установите желаемые параметры линии электропередачи L , например, 100 Ом и 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линий электропередачи $A2$ и $A3$ равными 50 Ом и 0,1 Гн;
- 7) установите желаемый ток срабатывания реле $A10$, например, 1,0 А;
- 8) включите выключатель «СЕТЬ» измерителя $P1$;
- 9) включите источник $G1$. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка;
- 10) включите выключатель $A9$. В результате загорится зеленая лампа блока $A8$, сигнализирующая о подаче оперативного напряжения.

11) нажмите последовательно две верхние кнопки поста управления *A7*. В результате включатся контакторы *A4*, *A13* (выключатели *Q1*, *Q2*) и на модели линий *A2*, *A3* (линию *Л*) будет подано напряжение. Об этом будут сигнализировать загоревшиеся красные лампы в блоке *A8*. Зеленая лампа в блоке *A8* погаснет;

12) смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи *Л*. Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий *A2* и *A3*. В результате сработает дифференциальная защита и поврежденная линия *Л* (модели линий *A2*, *A3*) отключится (отключатся) от источника питания выключателями *Q1* и *Q2* (контакторами *A4* и *A13*). Красные лампы в блоке *A8* погаснут, а зеленая лампа загорится;

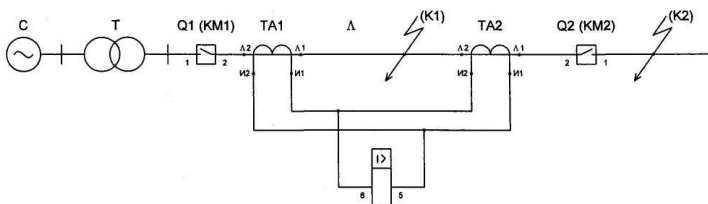


Рис. 8.5. Схема дифференциальной защиты электропередачи

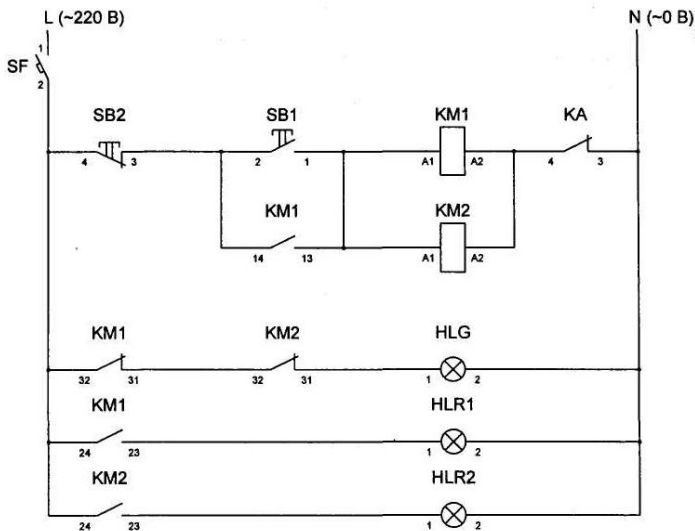


Рис. 8.6. Принципиальная схема дифференциальной защиты электропередачи

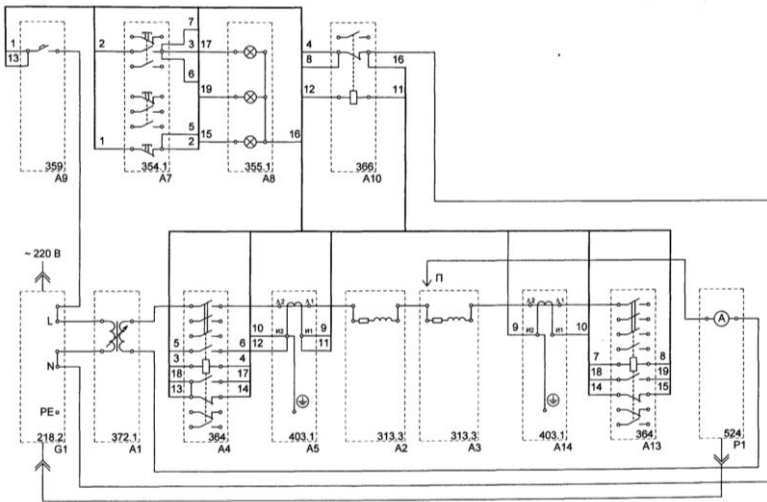


Рис. 8.7. Схема электрических соединений дифференциальной защиты электропередачи

- 13) с индикаторов измерителя PI считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты;
- 14) извлеките проводник «П» из гнезда;
- 15) по завершении эксперимента отключите однофазный источник питания $G1$ и выключатель «СЕТЬ» измерителя PI .

Моделируя варианты коротких замыканий, в таблицу 8.1 записать значения времени работы защиты и тока короткого замыкания.

Таблица 8.1

Значения опыта дифференциальной защиты

№	Уставка тока срабатывания реле, А	Параметры линии электропередачи		Время срабатывания, с	Ток КЗ, А
		R	L		
1.					
2.					
4.					
5.					
6.					
7.					

Постройте графики зависимостей тока короткого замыкания и времени срабатывания защиты от места расположения точки короткого замыкания на линии электропередачи.

Определите коэффициент чувствительности, представляющий отношение минимального тока КЗ в конце защищаемой линии к току срабатывания защиты.

Контрольные вопросы

1. Чем и как регулируют уставки по току и по времени?
2. Нарисуйте схемы построения дифференциальной защиты?
3. Как оценивают чувствительность защиты?
4. Достоинства дифференциальных токовых защит.
5. Недостатки дифференциальных токовых защит.
6. На какие два вида подразделяются дифференциальные защиты?

Лабораторно-практическая работа №9

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия максимальной токовой защиты электрической цепи с помощью автоматического выключателя. Научиться собирать цепи максимальной токовой защиты электрической цепи с помощью автоматического выключателя, снимать их защитные характеристики, рассчитывать уставки и выполнять настройку защиты для конкретных условий.

Наряду с плавкими предохранителями в сетях напряжением ниже 1000 В для защиты от КЗ и перегрузки широко применяются автоматические выключатели. Автоматические выключатели представляют собой аппараты, которые состоят из выключателя с мощной контактной системой для отключения тока КЗ и реле защиты, действующих на его отключение при возникновении повреждения или перегрузки. Из-за подгорания контактов автоматические выключатели допускают отключение не более чем 2-3 раза в час, вследствие чего они не могут применяться для частых операций в цепях управления.

Автоматические выключатели имеют ряд преимуществ по сравнению с плавкими предохранителями. Одно из них состоит в большей оперативности автоматических выключателей, которые всегда готовы к быстрому включению немедленно после отключения защищаемой цепи. Другим существенным преимуществом автоматических выключателей является то, что они одновременно отключают все три фазы защищаемого присоединения, в то время как перегорание предохранителя лишь в одной из фаз может привести к опасному для электродвигателей режиму работы на двух фазах.

В зависимости от типа автоматического выключателя в нем устанавливаются различные реле защиты прямого действия, так называемые расцепители.

Электромагнитный расцепитель для защиты от КЗ представляет собой электромагнит, который при определенном токе

мгновенно притягивает якорь, вследствие чего происходит отключение автоматического выключателя.

Тепловой расцепитель представляет собой тепловое реле, принципиальная схема которого показана на рисунке 9.1. Тепловое реле реагирует на количество тепла, выделяемое в его нагревательном элементе *б* при прохождении тока. Под действием этого тепла нагревается биметаллическая пластинка *1*, выполненная из двух различных металлов *а* и *б*, которые при нагревании удлиняются в разной степени.

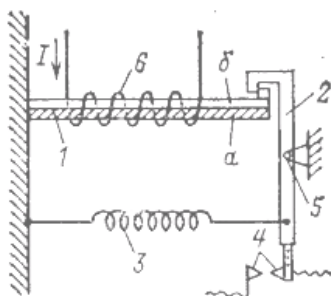


Рис. 9.1. Принципиальная схема теплового реле

Поскольку металл *б* удлиняется больше металла *а*, пластинка *1* изгибается в сторону металла *а* и, выходя из зацепления, освобождает защелку *2*, которая, поворачиваясь под воздействием пружины *3* вокруг оси *5*, производит отключение автоматического выключателя и замыкание контакта *4*. Время срабатывания тепловых расцепителей, с помощью которых осуществляется защита от перегрузки, тем больше, чем меньше перегрузка.

Комбинированный расцепитель, осуществляющий защиту от перегрузки и от КЗ, представляет собой комбинацию из двух расцепителей: теплового и электромагнитного.

Существуют автоматические выключатели, в которых действие электромагнитного расцепителя замедляется до 0,18-0,63 с, что позволяет осуществлять с их помощью селективную защиту отдельных участков сети.

В автоматических выключателях могут устанавливаться расцепители *минимального напряжения*, срабатывающие при исчезновении напряжения или при снижении его до уставки срабатывания расцепителя, а также *независимый расцепитель* для

отключения автоматического выключателя при подаче импульса от ключа или кнопки управления.

Автоматические выключатели характеризуются следующими параметрами:

- номинальным током $I_{a,ном}$, прохождение которого допустимо в течение неограниченно длительного времени;
- *номинальным напряжением*, при котором может применяться автоматический выключатель данного типа;
- *предельным отключаемым током* $I_{пред}$, т. е. током КЗ, который может быть отключен автоматическим выключателем.

Предельный допустимый ток автоматического выключателя должен быть больше максимального тока КЗ, который может проходить по защищаемому участку сети $I_{a,пред} \geq I_{к,мах}$.

Номинальный ток расцепителя должен быть не меньше расчетного тока, равного максимальному току, который может длительно проходить по защищаемому участку цепи с учетом возможной перегрузки $I_{расц,ном} \geq I_{расч}$.

Автоматический выключатель с таким расцепителем способен, не перегреваясь, как угодно долго пропускать расчетный ток нагрузки.

Ток уставки $I_{уст}$ электромагнитного расцепителя, с помощью которого осуществляется защита от КЗ, определяется по выражению:

$$I_{уст} = k_p k_n I_n, \quad (9.1)$$

где k_p – коэффициент разброса срабатывания электромагнитных расцепителей, равный 1,15-1,2;

k_n – коэффициент надежности, который принимается равным: для защиты электродвигателей 1,8-2, для защиты цепей напряжения не менее 2; для остальных цепей 1,5;

I_n – максимально возможный кратковременный расчетный ток перегрузки.

Для цепей постоянного тока расчетный ток уставки принимается на 30% больше определенного по выражению.

Уставка тока мгновенного срабатывания (отсечка), кратная номинальному току автоматического выключателя (расчетная кратность тока срабатывания электромагнитного расцепителя), определяется из выражения

$$K_{уст} = I_{уст} / I_{ном}, \quad (9.2)$$

где $I_{ном}$ – номинальный ток автоматического выключателя.

За действительную уставку отсечки принимается ближайшее большее значение по паспортным данным соответствующего автоматического выключателя. При этом, действительный ток срабатывания электромагнитного расцепителя будет равен

$$I_{уст.д.} = k_{уст.д} I_{ном.}$$

Ток уставки теплового расцепителя выбирается по выражению

$$I_{уст.т.} = k_p k_n I_n, \quad (9.3)$$

где $k_p = 1,1$;

$k_n = 1 - 1,1$, для неперегружаемых цепей (нагревательных элементов, оперативных цепей постоянного тока и т. п.), 1,1-1,3 для цепей, в которых возможны кратковременные перегрузки (например, при пуске электродвигателей), 0,15-0,25 для цепей, в которых ток проходит кратковременно (например, цепи электромагнитов включения выключателей);

I_n – ток нагрузки или номинальный ток цепи, А.

Порядок выполнения работы (стенд СЭС-1-Н-К):

1) убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания;

2) соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» однофазного источника питания GI ;

3) соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений;

4) отключите (если включен) выключатель $A9$;

5) установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора $A1$, например, 1,0;

6) установите желаемые параметры линии электропередачи L , например, 100 Ом и 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линий электропередачи $A2$ и $A3$ равными 50 Ом и 0,1 Гн;

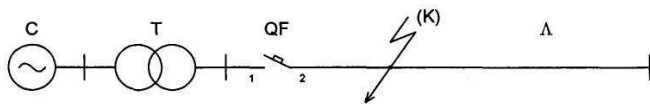


Рис. 9.2. Схема защиты автоматическим выключателем

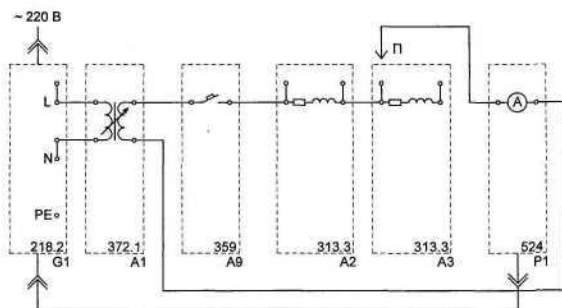


Рис. 9.3. Схема электрических соединений

- 7) включите выключатель «СЕТЬ» измерителя $P1$;
- 8) включите источник $G1$. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка;
- 9) включите выключатель $A9$;
- 10) смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи L . Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий $A2$ и $A3$. В результате сработает электромагнитный или тепловой расцепитель выключателя QF ($A9$) и поврежденная линия L (модели линий $A2, A3$) отключится им от источника питания;
- 11) с индикаторов измерителя $P1$ считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты;
- 12) извлеките проводник «П» из гнезда;
- 13) по завершении эксперимента отключите однофазный источник питания $G1$ и выключатель «СЕТЬ» измерителя $P1$.

Моделируя варианты коротких замыканий, запишите в таблицу 9.1 полученные значения времени работы защиты и тока короткого замыкания.

Таблица 9.1

Значения опыта защиты автоматическим выключателем

№	Параметры линии электропередачи		Время срабатывания, с	Ток КЗ, А
	R	L		
1.				
2.				
4.				
5.				
6.				
7.				

Постройте графики зависимостей тока короткого замыкания и времени срабатывания защиты от места расположения точки короткого замыкания на линии электропередачи.

Определите коэффициент чувствительности, представляющий отношение минимального тока КЗ в конце защищаемой линии к току срабатывания защиты.

Контрольные вопросы

1. Какие бывают расцепители?
2. Какими параметрами характеризуются автоматические выключатели?
3. Как оценивают чувствительность защиты?
4. Достоинства автоматических выключателей.
5. Недостатки автоматических выключателей.
6. Что представляет собой комбинированный автоматический выключатель?

Лабораторно-практическая работа №10

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЙ ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОТЕПЛОГО РЕЛЕ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия тепловой защиты электрической цепи с помощью электротеплового реле. Научиться собирать цепи тепловой защиты электрической цепи с помощью электротеплового реле, снимать их защитные характеристики, рассчитывать уставки и выполнять настройку защиты для конкретных условий.

Электротепловые реле. В релейной защите и автоматике находят применение электротепловые реле, работа, которых основана на явлениях выделения теплоты при прохождении электрического тока. В них, в частности, используют биметаллические элементы, которые в зависимости от конструкции реле могут иметь непосредственный, косвенный или комбинированный нагрев.

Защитная характеристика электротеплового реле должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к защитным характеристикам предохранителей. Необходимо отметить, что у электротепловых реле она более удовлетворительна при малых кратностях тока, чем у предохранителей. Однако в связи с недостаточным быстродействием электротепловое реле нельзя использовать для защиты от короткого замыкания, так как нагревательные элементы и биметаллический элемент могут сгореть раньше, чем сработает реле. Необходимо или защищать реле, включая последовательно с ним плавкий предохранитель, или, как это выполнено у автоматических выключателей, предусматривать максимальный электромагнитный расцепитель мгновенного действия. Недостатком реле является также зависимость его защитной характеристики от окружающей среды. Аналитическое выражение защитной характеристики электротеплового реле получить весьма сложно, поэтому в каждом отдельном случае такую характеристику находят опытным путем.

Порядок выполнения работы (стенд СЭС-1-Н-К):

1) убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания;

2) соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» однофазного источника питания *G1*;

3) соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений;

4) отключите (если включен) выключатель *A9*;

5) установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора *A1*, например, 1,0;

6) установите желаемые параметры линии электропередачи *L*, например, 100 Ом и 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линий электропередачи *A2* и *A3* равными 50 Ом и 0,1 Гн;

7) вращая регулировочный винт, установите желаемую уставку электротеплового реле *A6*;

8) если выступает шток электротеплового реле *A6*, то нажмите его;

9) включите выключатель «СЕТЬ» измерителя *P1*;

10) включите источник *G1*. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка;

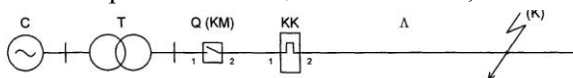


Рис. 10.1. Схема защиты с помощью электротеплового реле

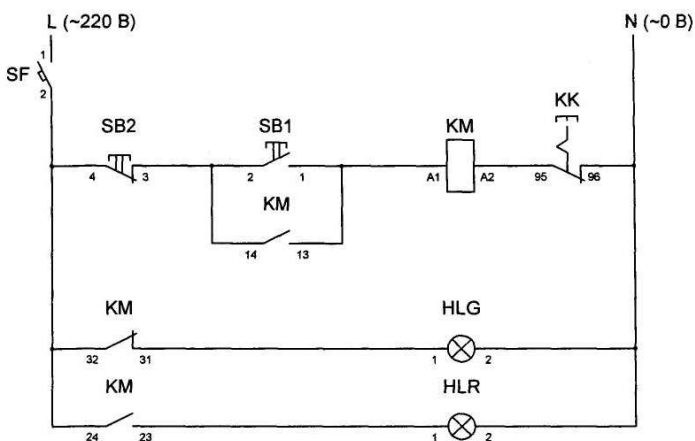


Рис. 10.2. Схема электрическая принципиальная

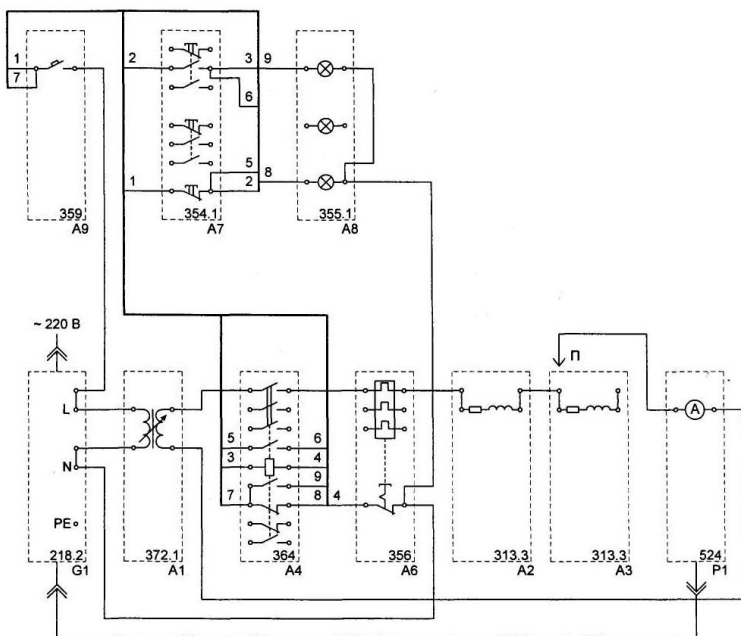


Рис. 10.3. Схема электрическая соединений

- 11) включите выключатель $A9$;
- 12) смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи L . Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий $A2$ и $A3$. В результате через некоторое время сработает электротепловое реле и поврежденная линия L (модели линий $A2$, $A3$) отключится им от источника питания;
- 13) с индикаторов измерителя $P1$ считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты;
- 14) извлеките проводник «П» из гнезда;
- 15) по завершении эксперимента отключите однофазный источник питания $G1$ и выключатель «СЕТЬ» измерителя $P1$.

Моделируя варианты коротких замыканий, запишите в таблицу 10.1 полученные значения времени работы защиты и тока короткого замыкания.

Таблица 10.1

Значения опыта тепловой защиты

№	Уставка электротеплового реле, А	Параметры линии электропередачи		Время срабатывания, с	Ток КЗ, А
		<i>R</i>	<i>L</i>		
1.					
2.					
4.					
5.					
6.					
7.					

Определите коэффициент чувствительности, представляющий отношение минимального тока КЗ в конце защищаемой линии к току срабатывания защиты.

Контрольные вопросы

1. Назначение электротеплового реле?
2. Какими параметрами характеризуется электротепловое реле?
3. Как оценивают чувствительность защиты?
4. Достоинства электротеплового реле.
5. Недостатки электротеплового реле.

Лабораторно-практическая работа №11

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Цель работы: изучить защиту электродвигателей. Отстроить защиту электродвигателя на стенде НТЦ-10.

Защита от короткого замыкания между фазами является основной защитой электродвигателей и установка её обязательна во всех случаях.

Виды защит, моделируемые в работе:

1) *Токовая отсечка.* Осуществляется на реле типа РТ-84. Ток срабатывания определяется по формуле

$$I_{cp} = (K_{cx} K_n I_n 1,8 I_n) / K_{TT}, \quad (11.1)$$

где 1,8 – коэффициент, учитывающий апериодическую постоянную пускового тока;

$K_{cx} = \bar{\quad}$ – коэффициент схемы;

$K_n = 1,2$ – коэффициент надёжности;

$K_{TT} = 80$.

Методика расчета:

а) определяем номинальный ток двигателя:

$$I_{ном} = P_{ном} / (\bar{\quad} U_n \eta \cos \varphi); \quad (11.2)$$

б) рассчитываем ток срабатывания отсечки с отстройкой от пусковых токов при установке двух трансформаторов тока:

$$K_{cx} = \bar{\quad} 190 / 2 (K_{TT} = 80), \quad (11.3)$$

$$I_{cp} = (\bar{\quad} \cdot 1,2 \cdot 1,8 \cdot 6,4 \cdot I_{ном}) / 80 = 33A; \quad (11.4)$$

в) коэффициент чувствительности отсечки:

$$K_{ч} = (I_{кз} \cdot 0,87) / (I_{cp} K_{тт}); \quad (11.5)$$

2) *Защита от перегрузки двухфазная максимально-токовая, отстраивается от номинального тока электродвигателя.*

$$I_{cp} = (K_n I_n K_{cx}) / (K_{г} K_{TT}), \quad (11.6)$$

где $K_n = 1,1-1,2$ (для защит, действующих на сигнал);

$K_n = 1,5-1,75$ (для защит, действующих на отключение);

$K_{г} = 0,8-0,85$.

Принимаем для токовой отсечки и для защиты от перегрузки уставки тока срабатывания $I_{отс} = 2 \cdot I_{пер}$.

Порядок выполнения работы:

- 1) собрать схему защиты электродвигателя (рис. 11.1);
 - 2) рассчитать релейную защиту асинхронного электродвигателя.
- Данные для расчета: $P_n = 1000 \text{ кВт}$; КПД = 95,2%; $\cos\varphi = 0,92$;
 $I_n/I_n = 6,4$; $U_n = 6 \text{ кВ}$; $I_{кз} = 20 \text{ кА}$.

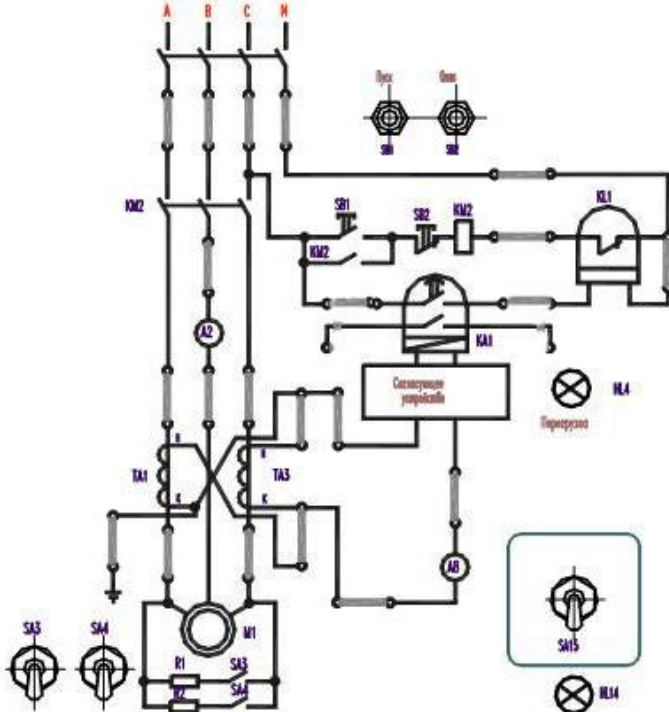


Рис. 11.1. Схема защиты электродвигателя (1 вариант)

- 3) после сборки схемы (рис. 11.1) осуществите пуск двигателя нажатием кнопки SB1, предварительно включив SA1 и SA7. Отключите двигатель M1 нажатием кнопки SB2. Выключите тумблер SA7;
- 4) произведите настройку защиты;
- 5) снимите кожух с реле PT-84. Установите перемычку на минимальный ток срабатывания;
- 6) переведите тумблер SA15 в верхнее положение, замкните SA5, SA7, включите SA5, нажмите SB1.

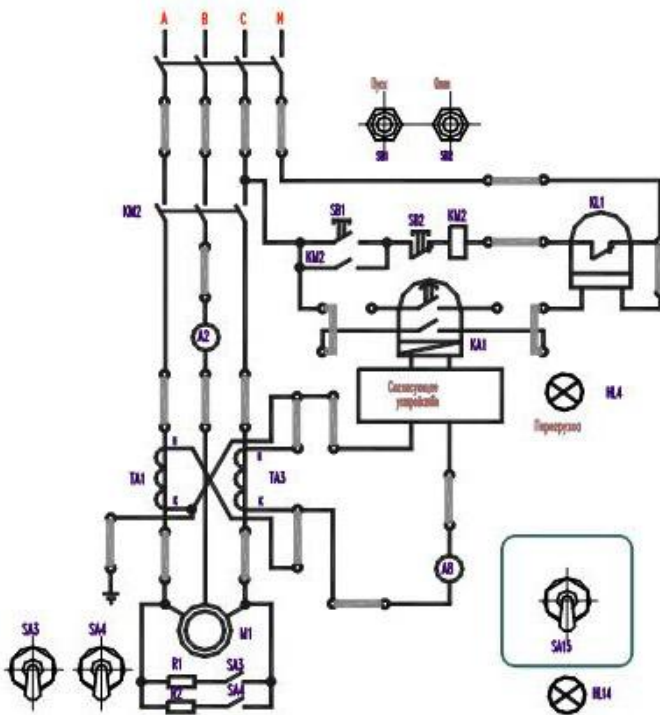


Рис. 11.2. Схема защиты электродвигателя (2 вариант)

Первый вариант. Уставку выдержки времени реле *PT-84* установить минимальной. Необходимо убедиться, что переключатель *SA2* находится в положении *1* и на панели не осталось никаких «лишних» перемычек от выполнения предыдущих лабораторных работ и регуляторы *RP3*, *RP4* находятся в крайнем против хода часовой стрелки положении. Для создания перегрузки необходимо замкнуть тумблер *SA3* (*SA4* отключен).

Поворачивая регулятор *RP3* по часовой стрелке, добиться того, чтобы диск реле пришел во вращение, а зубчатый сектор вошел в зацепление с червячной передачей. После срабатывания контакта реле тока с замедлением включится реле блокировки *KL1* и двигатель отключится. Отключить *SA3*. Затем опыт можно повторить.

Второй вариант. Переставить перемычки в цепи питания блокировочного реле *KL1* в положение, показанное на рисунке 11.2. Для создания КЗ (двухфазного) необходимо разомкнуть

SA3 и включить *SA4* с соблюдением вышеуказанных предосторожностей. Настройка срабатывания электромагнитного элемента производится после того, как регулятором *RP4* добились более быстрого вращения диска реле тока, чем при включении *SA3*, затем, удерживая поворотную рамку реле тока в положении, не позволяющем произвести зацепления зубчатого сектора с червячной передачей, поворотом регулировочного винта электромагнитного элемента добиться его срабатывания. Вновь блокировочное реле *KL1* отключит двигатель уже без выдержки времени. Отключить *SA4*. Затем эксперимент можно повторить.

При желании перегрузку можно осуществить с выдержкой времени.

Контрольные вопросы

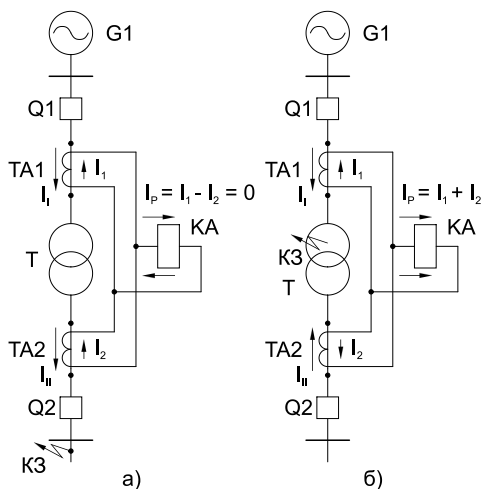
1. Какие виды защиты и от каких повреждений устанавливаются на электродвигателях?
2. Какие защиты на электродвигателях выполняются с выдержкой времени?
3. Каково назначение промежуточного реле в схемах защиты?
4. Каково назначение указательных реле в схемах защиты?
5. Каким образом производится выбор тока срабатывания защиты от междуфазных замыканий?

Лабораторно-практическая работа №12

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучить устройство и принцип действия дифференциальной защиты трансформатора. Научиться собирать цепи дифференциальной защиты трансформатора, снимать их защитные характеристики, рассчитывать уставки и выполнять настройку защиты для конкретных условий.

Дифференциальная защита (ДЗ) предназначена для защиты от КЗ между фазами, на землю и от витковых замыканий. Принцип действия ДЗ такой же как у продольной дифференциальной защиты линий – основан на сравнении величин и направлении токов до и после защищаемого элемента. Распределение токов при КЗ в трансформаторе и вне его представлено на рисунке 12.1.



12.1. Особенности дифференциальной защиты трансформаторов

Задачей при проектировании защиты является уравнивание вторичных токов в плечах защиты так, чтобы ток в реле отсутствовал и ДЗ не работала при нагрузке и внешних КЗ (рис. 12.1, а). При КЗ в трансформаторе (рис. 12.1, б), если $I_p > I_{с.р.}$ – реле срабатывает и отключит трансформатор.

Дифференциальная защита трансформаторов имеет ряд особенностей по сравнению с продольной дифференциальной защитой линий:

1) Первичные токи обмоток трансформатора не равны по величине и в общем случае не совпадают по фазе. В режиме нагрузки и внешнего КЗ $I_{II} > I_I$, отношение токов $I_{II}/I_I = N$ равно коэффициенту трансформации силового трансформатора.

2) В трансформаторе с соединением обмоток Y/Δ – токи I_I и I_{II} различаются и по величине и по фазе: угол сдвига зависит от *группы соединения* обмоток трансформатора. Наиболее распространённое соединение обмоток Y/Δ – II гр. Векторные диаграммы распределения токов в обмотках трансформатора с такой группой соединения показаны на рисунке 12.1.

Поэтому необходимы специальные меры по выравниванию вторичных токов по величине: $I_I = I_I/n_{T1} = I_2 = I_{II}/n_{T2}$, а при разных схемах соединения обмоток и по фазе, с тем, чтобы поступающие в реле токи в нормальном режиме и при внешнем КЗ были равны.

При прохождении через трансформатор сквозного тока нагрузки или КЗ ток в реле равен $I_p = I_I - I_2$.

Пренебрегая током намагничивания трансформатора, который в нормальном режиме имеет малое значение, можно считать, что первичные токи равны $I_I = I_{II}$ и, следовательно, вторичные токи равны $I_I = I_2$. С учетом этого $I_p = I_I - I_2 = 0$.

Таким образом, если схема дифференциальной защиты выполнена правильно и ТТ имеют точно совпадающие характеристики, то при прохождении через трансформатор тока нагрузки или внешнего КЗ ток в реле отсутствует и дифференциальная защита на такие режимы не реагирует.

Практически вследствие несовпадения характеристик ТТ вторичные токи не равны $I_I \neq I_2$ и поэтому в реле проходит ток небаланса, т. е. $I_p = I_I - I_2 = I_{p,нб}$.

Для того чтобы дифференциальная защита не подействовала от тока небаланса, ее ток срабатывания должен быть больше этого тока, т. е. $I_{с.а} = k_n I_{p,нб}$.

При КЗ в трансформаторе или любом другом месте между ТТ направление токов I_2 и I_{II} изменится на противоположное, как показано на рисунке 12.1б. При этом $I_p = I_I + I_2$.

Таким образом, при КЗ в зоне дифференциальной защиты в реле проходит полный ток КЗ, деленный на коэффициент трансформации трансформаторов тока. Под влиянием этого тока защита срабатывает и производит отключение поврежденного трансформатора.

Порядок выполнения работы (стенд СЭС-1-Н-К):

1) убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания;

2) соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» однофазного источника питания $G1$;

3) соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений;

4) отключите (если включен) выключатель $A9$;

5) установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора $A1$, например, 1,0;

6) установите желаемые параметры линии электропередачи L , например, 100 Ом и 0,2 Гн, а также место расположения на ней точки короткого замыкания, например, в середине линии. Для этого переключателями установите параметры моделей линий электропередачи $A2$ и $A3$ равными 50 Ом и 0,1 Гн;

7) установите желаемый ток срабатывания реле $A10$, например, 1,0 А;

8) включите выключатель «СЕТЬ» измерителя $P1$;

9) включите источник $G1$. О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка;

10) включите выключатель $A9$. В результате загорится зеленая лампа блока $A8$, сигнализирующая о подаче оперативного напряжения;

11) нажмите последовательно две верхние кнопки поста управления $A7$. В результате включатся контакторы $A4$, $A13$ (выключатели $Q1$, $Q2$) и на модели линий $A2$, $A3$ (линию L) будет подано напряжение. Об этом будут сигнализировать загоревшиеся красные лампы в блоке $A8$. Зеленая лампа в блоке $A8$ погаснет;

12) смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи L . Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий $A2$ и $A3$. В результате сработает дифференциальная защита и поврежденная линия L (модели линий $A2$, $A3$) отключится (отключатся) от источника питания выключателями $Q1$ и $Q2$

(контакторами $A4$ и $A13$). Красные лампы в блоке $A8$ погаснут, а зеленая лампа загорится;

13) с индикаторов измерителя PI считайте значение тока короткого замыкания и время работы защиты;

14) извлеките проводник «П» из гнезда;

15) по завершении эксперимента отключите однофазный источник питания $G1$ и выключатель «СЕТЬ» измерителя PI .

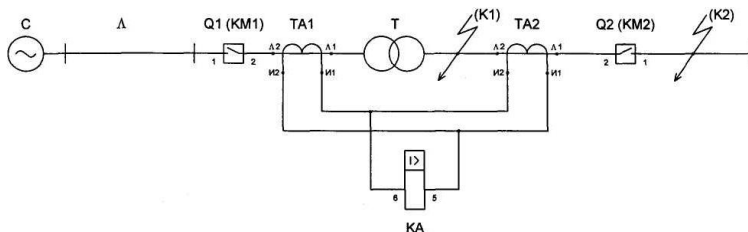


Рис. 12.2. Дифференциальная защита трансформатора

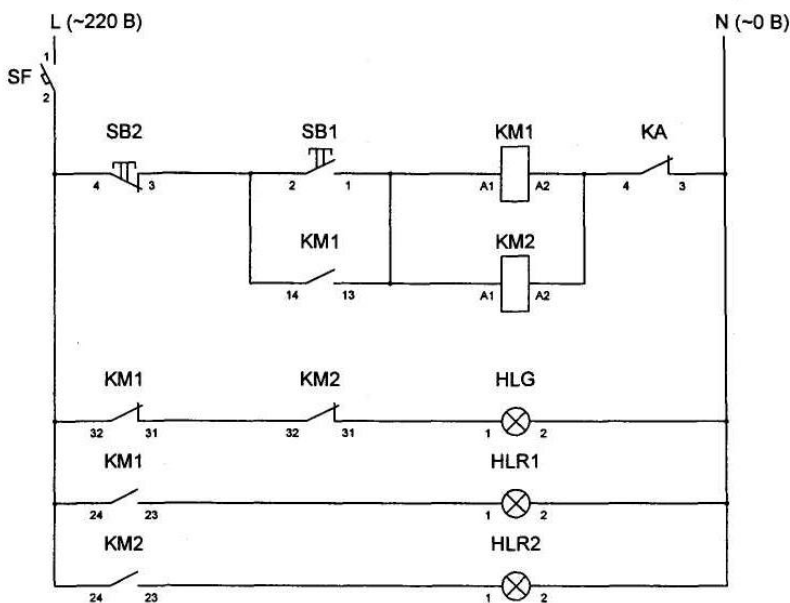


Рис. 12.3. Схема электрическая принципиальная

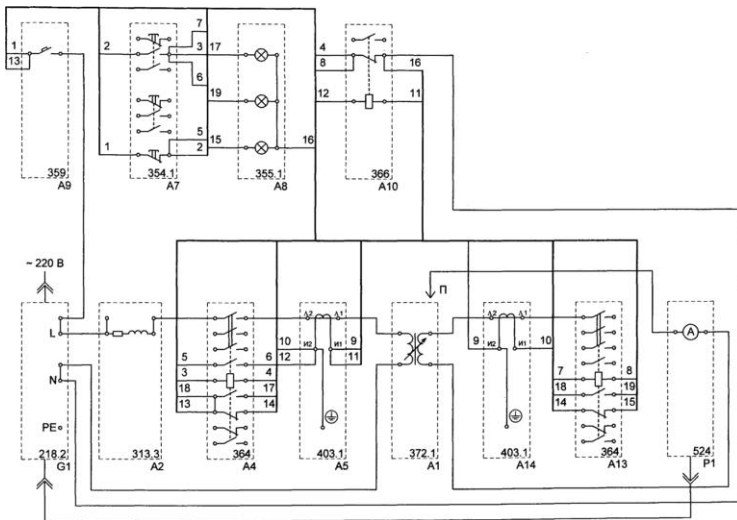


Рис. 12.4. Схема электрических соединений

Моделируя варианты коротких замыканий, в таблицу 12.1 запишите значения времени работы защиты и тока короткого замыкания.

Таблица 12.1

Значения опыта дифференциальной защиты трансформатора

Точка КЗ	Уставка тока срабатывания реле, А	Время срабатывания, с	Ток КЗ, А

Постройте графики зависимостей тока короткого замыкания и времени срабатывания защиты от места расположения точки короткого замыкания на линии электропередачи.

Контрольные вопросы

1. Назначение защиты трансформатора.
2. Почему в реле проходит ток небаланса?
3. Как оценивают чувствительность защиты?
4. Какие защиты устанавливают на трансформаторе?
5. С помощью каких реле выполняют дифференциальную защиту.

Лабораторно-практическая работа №13

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПОНИЖАЮЩЕГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы: изучить работу защит силовых трансформаторов. Смоделировать защиты в действии на стенде НТЦ-10.

Работа схемы защиты трансформатора. Полная схема защиты на переменном оперативном токе понижающего трансформатора, подключенного к ответвлению от линий, показана на рисунке 13.1.

На трансформаторе установлены:

- дифференциальная защита;
- максимальная токовая защита;
- защита от перегрузки, действующая на сигнал.

Оперативные цепи дифференциальной и максимальной защит питаются от трансформаторов тока ($4ТТ$; $5ТТ$) и защиты от перегрузки – от трансформаторов собственных нужд.

Дифференциальная защита выполнена с помощью реле типа $РНТ-565$ ($8РТН$ и $9РТН$). Для питания защиты со стороны высшего напряжения используются встроенные в силовой трансформатор трансформаторы тока $4ТТ$. Вследствие относительно малой мощности встроенных трансформаторов тока их вторичные обмотки соединяются на каждой фазе последовательно. Дифференциальная защита действует на включение коротко замыкателя $2КЗ$ и отключение выключателя $ВЗ$. При срабатывании дифференциальной защиты контакты $8РТН$ и $9РТН$ замыкают цепь токовых промежуточных реле $17РП$ и $18РП$ типа $РТ-341$, последние срабатывают и дешунтируют катушки включения короткозамыкателя $37КВ$ и $38КВ$ и отключения выключателя $ВЗ$ $39КО$ и $40КО$. В результате этого включается короткозамыкатель $2КЗ$ и отключается выключатель $ВЗ$. Короткозамыкатель создает искусственное короткое замыкание, что приводит к отключению $В1$.

Для создания $КЗ$ в цепи высшего напряжения используется тумблер $SA9$, а в цепи низшего напряжения тумблер $SA10$.

Максимальная защита выполнена с помощью токовых реле $11РТ$ и $12РТ$ типа $РТ-40$, токовые реле времени $15РВ$ типа $РВМ$.

Токовые реле максимальной защиты $11PT$ и $12PT$ включены на трансформаторы тока $4TT$ со стороны высшего напряжения (в плечо дифференциальной защиты), что позволяет ввести в зону действия максимальной защиты силовой трансформатор.

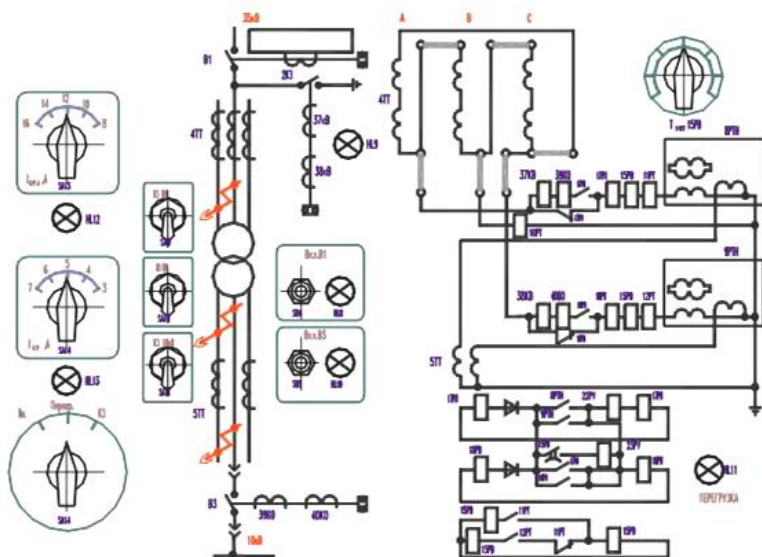


Рис. 13.1. Полная схема защиты на переменном оперативном токе понижающего трансформатора

На стенде максимальная токовая защита выполняется с одной выдержкой времени.

Без выдержки времени она отключает КЗ на шинах низшего напряжения (на рисунке 13.1 эта цепь не показана). С выдержкой времени она работает при КЗ в трансформаторе, резервируя его дифференциальную защиту.

При срабатывании токового реле $11PT$ или $12PT$ замыкается цепь обмотки реле времени $15PB$. Второй контакт $15PB2$ замыкается с выдержкой времени и приводит в действие промежуточные реле $17PP$ и $18PP$, которые включают короткозамыкатель $2K3$. Создается КЗ при помощи тумблера $SA11$.

Сигнал о перегрузке подается токовым реле $10PT$, оперативная цепь которого питается от трансформатора собственных нужд. Загорается $HL11$.

При помощи переключателя SA12 выбирается режим работы трансформатора: номинальный, перегрузка, КЗ.

Расчет защиты силового трансформатора ТМЗ-6500-110/10.
Исходные данные: $U_k\% = 10,5$; $I_{кз10} = 3,5$ кА; $I_{кз110} = 2,5$ кА; $S_n = 6500$ кВА.

Дифференциальная защита. Номинальный ток защищаемого трансформатора в цепи высокого напряжения (ВН-110 кВ), при этом цепь низкого напряжения – $I_n, 110$:

$$I_n, 110 = S_n / (\sqrt{3} \cdot U_n), \quad (13.1)$$

схема соединения трансформатора тока Ксх:

$$\Delta \quad \text{«неполная звезда»}$$

$$K_{сх} = \frac{\sqrt{3}}{3} \quad K_{сх} = 1$$

расчетный коэффициент трансформации трансформатора тока КТТ:

$$K_{тт} = K_{сх} \cdot I_n / 5, \quad (13.2)$$

вторичные токи в плечах защиты, соответствующие номинальной мощности защищаемого трансформатора

$$i_n \Delta = K_{сх} \cdot I_n / K_{тт}. \quad (13.3)$$

Определение уставок и чувствительность защиты:

1) *первичный ток небаланса*, обусловленный погрешностью трансформатора тока при внешних КЗ, приведенный к стороне с наибольшим вторичным током в плече защиты:

$$I'_{н.б} = \varepsilon I_{кзmax}, \quad (13.4)$$

где $\varepsilon = 0,1$ – относительное значение тока намагничивания;

2) *составляющая первичного тока небаланса*, обусловленная регулированием напряжения защищаемого трансформатора

$$I''_{н.б} = \Delta U \cdot I_{кзmax}, \quad (13.5)$$

3) *первичный расчетный ток небаланса* при внешнем КЗ:

$$I_{н.б} = I'_{н.б} + I''_{н.б}, \quad (13.6)$$

4) *первичный ток срабатывания защиты* из условия отстройки от расчетного тока небаланса при внешнем КЗ:

$$I_{с.з} = K_n \cdot I_{н.б}, \quad (13.7)$$

5) *первичный ток срабатывания защиты* из условия отстройки от броска тока намагничивания, приведенный к стороне с наибольшим вторичным током

$$I_{с.з.} = K \cdot I_{н}; \quad (13.8)$$

6) *принят расчетный ток срабатывания:*

$$I_{с.з.расч.} = 840A;$$

7) *расчетный ток срабатывания реле, отнесенный к стороне с наибольшим номинальным вторичным током*

$$i_{ср.р} = (\bar{I}_{с.з.расч})/K_{mm2} \quad (13.9)$$

для реле РНТ-565 токи срабатывания регулируются в пределах 2,87-12,5 А;

8) *расчетное число витков в плече защиты с наибольшим вторичным током*

$$W_{1расч.} = F_{ср}/I_{ср.расч.} \quad (13.10)$$

9) *принятое число витков основной стороны $W_{p1} = 5$ витков;*

10) *расчетное число витков для другого плеча обмотки реле*

$$W_{2расч.} = W_{p1} \cdot (i_{н1}/i_{н2}); \quad (13.11)$$

11) *принятое число витков другого плеча обмотки $W_{p2} = 3$;*

12) *принятый ток срабатывания реле со стороны плеча защиты с наибольшим вторичным током*

$$i_{ср1} = F_{ср}/W_{p1}; \quad (13.12)$$

13) *первичный ток небаланса при внешнем КЗ, обусловленный округлением расчетного числа витков обмоток реле.*

$$I''_{н.б} = I_{кз} (W_{2расч} - W_{p2})/W_{2расч.} \quad (13.13)$$

14) *уточненный первичный ток небаланса при внешнем КЗ:*

$$I_{пр.н.б} = I_{н.б} + I''_{н.б}, \quad (13.14)$$

15) *принятый первичный ток срабатывания защиты*

$$I_{с.з} = (i_{ср1} \cdot K_{mm2})/\bar{\quad}, \quad (13.15)$$

16) *уточненный коэффициент отстройки от тока небаланса при внешнем КЗ*

$$K_{н.ут} = I_{с.з}/I_{н.б}, \quad (13.16)$$

17) *чувствительность защиты при минимальном токе КЗ в зоне защиты*

$$K_{ч} = 0,87 \cdot I_{кзmax}/I_{ср}. \quad (13.17)$$

Максимальная токовая защита от сверхтоков при внешних КЗ устанавливается на низкой стороне и отстраивается от максимальных токов нагрузки; из условия возврата реле после снижения тока до максимального тока нагрузки:

$$I_{cp} = (K_n \cdot K_{cx} \cdot I_{n,max}) / (K_\theta \cdot K_{TT2}), \quad (13.18)$$

Коэффициент чувствительности защиты при двухфазном КЗ на стороне НН трансформатора:

$$K_\theta = (0,87 \cdot I_{кз} I_0) / (I_{cp} \cdot K_{TT2}). \quad (13.19)$$

Порядок выполнения работы (стенд СЭС-1-Н-К):

1) соберите схему, представленную на рисунке 13.1, без подключения нагрузки и нейтрали;

2) установите переключки трансформаторов тока *4ТТ* так, чтобы при их сборке получился треугольник. После расчета дифференциальной защиты и максимальной токовой защиты установите при помощи *SA13*: $i_{cpl} = 12 \text{ A}$; *SA14* $I_{cp} = 5 \text{ A}$; *SA12* – номинальный режим работы. После установки включите лабораторную установку;

3) включите *SA1*;

4) нажмите *SB5* (загорится *HL10*) – замкнулся выключатель *B3*;

5) нажмите *SB4* (загорится *HL8*) – замкнулся выключатель *B1*.

Установка готова к работе.

6) проверьте работу защит при различных режимах работы: *SA9* – КЗ на стороне высокого напряжения (отключение без задержки); *SA10* – КЗ на стороне низкого напряжения (отключение без задержки); *SA11* – КЗ на стороне нагрузки напряжения (отключение с задержкой); *SA12* – режим нагрузки: перегрузка – включение индикации *HL11*, КЗ – отключение без задержки).

Контрольные вопросы

1. Принцип действия максимальной токовой защиты.
2. Принцип действия дифференциальной защиты.
3. Как устроено реле типа РНТ565?
4. Что называется K_{cx} ?

Лабораторно-практическая работа №14

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Цель работы: изучить устройство и принцип действия автоматического повторного включения линии электропередачи. Научиться собирать цепи автоматического повторного включения линии электропередачи, снимать их защитные характеристики, рассчитывать уставки и выполнять настройку для конкретных условий.

Большинство повреждений воздушных линий электропередачи возникает в результате схлестывания проводов при сильном ветре и гололеде, нарушения изоляции во время грозы, падения деревьев, набросов, замыкания проводов движущимися механизмами и т.д. Эти повреждения неустойчивы и при быстром отключении поврежденной линии самоустраниются. В этом случае при повторном включении линии она остается в работе и электроснабжение потребителей не прекращается. Повторное включение осуществляется автоматически устройством автоматического повторного включения (УАПВ). При устойчивых повреждениях защита вновь отключает линию после действия УАПВ, т.е. происходит неуспешное АПВ. По статистическим данным УАПВ в системах электроснабжения нашей страны имеют в среднем 60-75% успешных действий. Такая эффективность УАПВ делает их одним из основных средств повышения надежности электроснабжения. В эксплуатации применяются устройства АПВ, различающиеся по следующим основным признакам: по числу фаз выключателей, включаемых устройством АПВ, – трехфазное (ТАПВ) и однофазное (ОАПВ); по способу проверки синхронизма при АПВ – для линий с двусторонним питанием; по способу воздействия на привод выключателя – механические и электрические устройства АПВ; по кратности действия – АПВ однократного и многократного действия.

Несмотря на указанные различия, все устройства АПВ должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- 1) должны находиться в состоянии постоянной готовности к действию и срабатывать при всех случаях аварийного отключения выключателя, кроме случаев отключения выключателя релейной защитой после включения его дежурным персоналом; не должны

приходить в действие при оперативных отключениях выключателя дежурным персоналом, что обеспечивается пуском устройств АПВ от несоответствия положений выключателя и его ключа управления, которое возникает всегда при любом автоматическом отключении выключателя. В эксплуатации используется также пуск устройства АПВ при срабатывании релейной защиты. Однако такой пуск не обеспечивает действия АПВ при аварийных отключениях, не сопровождающихся срабатыванием релейной защиты, поэтому его рекомендуется применять лишь в некоторых частных случаях. Схемы АПВ должны допускать возможность автоматического вывода их из действия при срабатывании тех или иных защит. Действие УАПВ должно быть согласовано с действием других устройств автоматики.

2) Устройство АПВ должны иметь минимально возможное время срабатывания t_{anel} для того, чтобы сократить продолжительность перерыва питания потребителей. Практически можно выполнить АПВ без замедления. Однако эта возможность ограничивается рядом условий. Для успешного действия АПВ необходимо, чтобы время срабатывания t_{anel} было больше времени $t_{ГП}$, необходимого для восстановления готовности привода к работе на включение (для применяемых типов приводов с учетом условий их работы $t_{ГП} \approx 0,1 \dots 0,3$ с); времени $t_{ДС}$, необходимого для деионизации среды в точке повреждения (для установок напряжением до 220 кВ $t_{ДС} \approx 0,2$ с); времени готовности выключателя $t_{ГВ}$, необходимого для восстановления отключающей способности выключателя после отключения им тока КЗ. Для однократного АПВ время $t_{ГВ}$ всегда меньше суммы времени $t_{ГП}$ и времени включения выключателя $t_{ВВ}$. Поэтому определяющим обычно является условие $t_{АПВ} > t_{ГП}$. При этом с учетом времени запаса $t_{ЗАП} = 0,4-0,5$ с время срабатывания УАПВ для линии с односторонним питанием:

$$t_{АПВ} \geq t_{ГП} + t_{ЗАП} = 0,5-0,8 \text{ с.} \quad (14.1)$$

В отдельных случаях для воздушных линий, когда велика вероятность их повреждения при падении деревьев и по другим причинам, для эффективности АПВ его выдержку времени целесообразно принимать несколько повышенной – около нескольких секунд. В этом случае также уменьшается вероятность неселективного перегорания предохранителей при неуспешном АПВ, установленных на элементах систем электроснабжения,

расположенных ближе к источнику питания, чем рассматриваемый выключатель с устройством АПВ. Схема УАПВ во всех случаях должна быть выполнена так, чтобы продолжительность воздействия на включение выключателя была достаточной. Реле времени, используемое в схемах УАПВ для создания выдержки времени $t_{АПВ1}$, имеет погрешности, зависящие от температуры среды. Для линий с двусторонним питанием появляются дополнительные требования при определении $t_{АПВ1}$. При применении УАПВ должно, как правило, предусматриваться ускорение действия защиты на случай неуспешного АПВ. Если защита на линиях 35 кВ и ниже выполнена на переменном оперативном токе, то с целью упрощения защиты ее можно не ускорять.

3) Автоматически с заданной выдержкой времени устройства АПВ должны возвращаться в состояние готовности к новому действию после включения в работу выключателя. При выборе выдержки времени $t_{АПВ2}$ на возврат устройства АПВ в состояние готовности к действию должны выполняться следующие требования:

– устройство не должно производить многократные включения выключателя на не устранившееся короткое замыкание, что обеспечивается при условии, если релейная защита с максимальной выдержкой времени $t_{C.3max}$ успеет отключить выключатель, включенный на короткое замыкание, раньше, чем устройство АПВ вернется в состояние готовности к новому действию, т. е. должно быть

$$t_{АПВ2} \geq t_{АПВ1} + t_{В.В.} + t_{C.3 max} + t_{ОВ} + t_{ЗАП} \quad (14.2)$$

где $t_{ЗАП}$ – время, принимаемое равным ступени селективности защиты линии;

– устройство должно быть готово к работе не раньше, чем это допускается по условиям работы выключателя после успешного включения его в работу устройством АПВ.

Опыт показывает, что для однократного АПВ оба указанных в пункте 3 требования выполняются, если принять $t_{АПВ2}=15-25$ с. Для УАПВ двукратного действия время возврата в состояние готовности после второго цикла принимается равным $t_{АПВ2} = 60-100$ с.

Порядок выполнения работы (стенд СЭС-1-Н-К):

1) убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания;

2) соедините гнезда защитного заземления устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» однофазного источника питания GI :

3) соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений;

4) отключите (если включен) выключатель $A9$;

5) установите переключателем желаемое значение коэффициента трансформации трансформатора $A1$, например, 1,0;

6) установите желаемые параметры линии электро-передачи L (модели линии электропередачи $A2$), например, 50 Ом и 0,1 Гн;

7) установите желаемый ток срабатывания реле $A10$, например, 1,0 А;

8) установите желаемое время срабатывания реле AN (время АПВ), например, 3,0 с;

9) включите выключатель «СЕТЬ» измерителя PI ;

10) включите источник GI . О наличии напряжения на его выходе должна сигнализировать светящаяся лампочка;

11) включите выключатель $A9$. В результате загорится зеленая лампа блока $A8$, сигнализирующая о подаче оперативного напряжения;

12) нажмите верхнюю кнопку поста управления $A7$. В результате включится контактор $A4$ (выключатель Q) и на модель линии $A2$ (линию L) будет подано напряжение. Об этом будет сигнализировать загоревшаяся красная лампа в блоке $A8$. Зеленая лампа в блоке $A8$ погаснет;

13) смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи L . Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий $A2$ и $A3$. В результате сработает мгновенная токовая отсечка и поврежденная линия электропередачи L (модель линии $A2$) отключится от источника питания выключателем Q (контактором $A4$). Красная лампа в блоке $A8$ погаснет, а зеленая загорится;

14) сразу после отключения контактора $A4$ смоделируйте саморазрушение короткого замыкания на линии электропередачи L путем вынимания проводника «П» из гнезда. В результате действия автоматики, через заданное время 3,0 с произойдет повторное включение выключателя Q (контактора $A4$) и линия электропередачи вновь окажется под напряжением (произойдет успешное АПВ линии электропередачи). Об этом будет сигнализировать красная лампа в блоке $A8$;

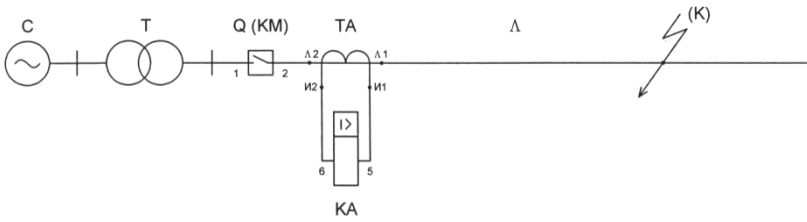


Рис. 14.1. Схема автоматического повторного включения линии электропередачи

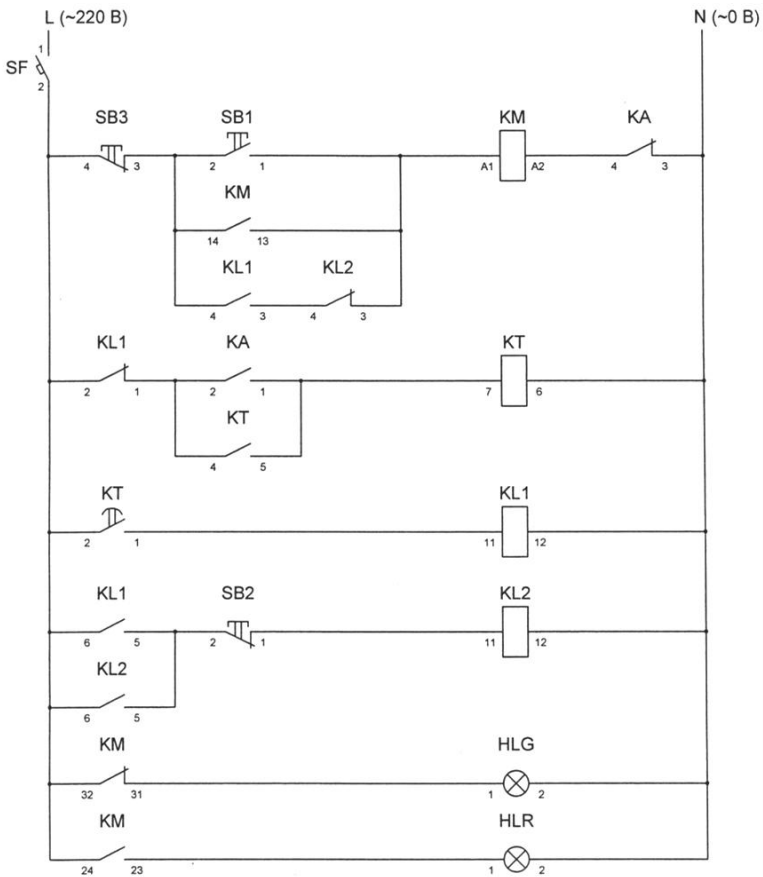


Рис. 14.2. Схема электрическая принципиальная

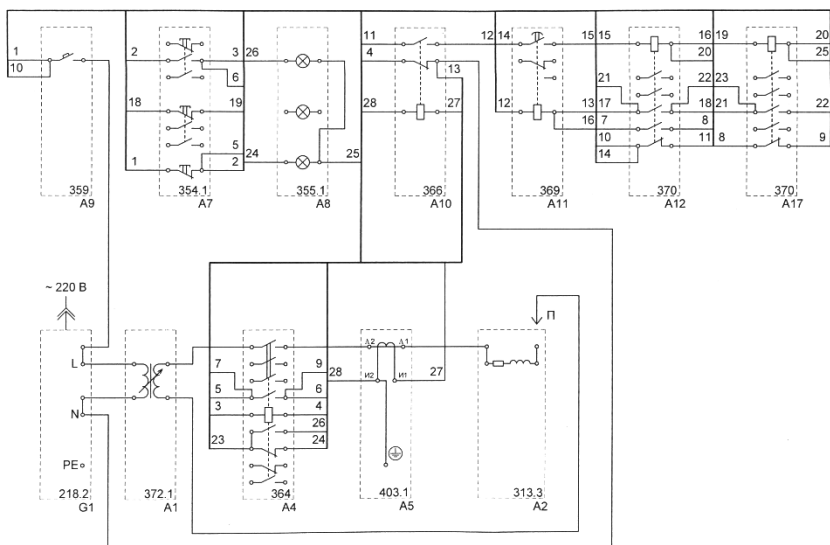


Рис. 14.3. Схема электрических соединений

15) нажмите вторую сверху кнопку поста управления $A7$ для восстановления работоспособности схемы АПВ;

16) вновь смоделируйте короткое замыкание на линии электропередачи L . Для чего воткните проводник «П» в гнездо между моделями линий $A2$ и $A3$. В результате сработает мгновенная токовая отсечка и поврежденная линия электропередачи L (модель линии $A2$) отключится от источника питания выключателем Q (контактором $A4$). Красная лампа в блоке $A8$ погаснет, а зеленая загорится. Через заданное время 3,0 с произойдет повторное включение выключателя Q (контактора $A4$) и линия электропередачи вновь окажется под напряжением при сохранившемся коротком замыкании на ней. Поэтому вновь сработает мгновенная токовая отсечка и поврежденная линия электропередачи L (модель линии $A2$) отключится от источника питания выключателем Q (контактором $A4$). Красная лампа в блоке $A8$ погаснет, а зеленая загорится. Таким образом АПВ линии электропередачи будет не успешным;

17) отключите однофазный источник питания $G1$ по завершении работы.

Контрольные вопросы

1. Назначение и основные требования, предъявляемые к АПВ.
2. Что значит успешное и неуспешное АПВ?
3. Как в схеме АПВ обеспечивают однократное повторное включение?
4. Как работает цепь АПВ при самоустраняющихся за время бестоковой паузы коротких замыканиях?
5. Произойдет ли АПВ, если выключатель, находящийся в отключенном состоянии, оперативно будет включен на короткое замыкание? Ответ пояснить по схеме АПВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Моделирование выполняются на стендах НТЦ-10 и СЭС-1-Н-К. Конструктивно стенд НТЦ-10 состоит из корпуса 1 и блока электрических машин и аппаратов 2 (рис. П. 1).

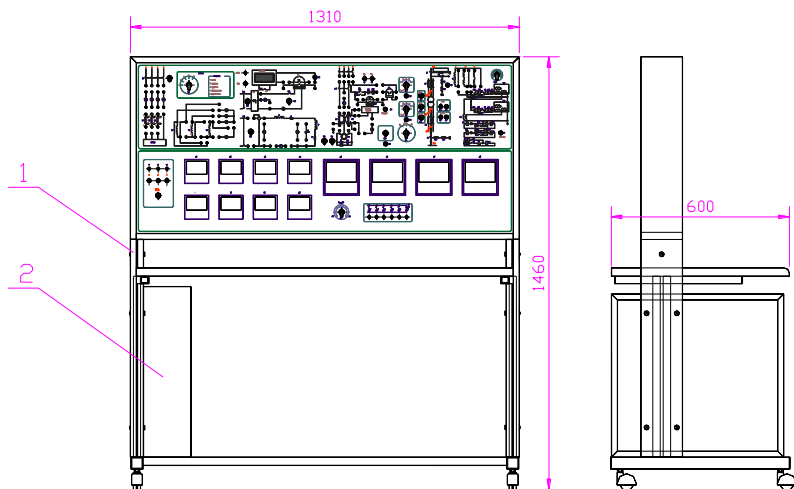


Рис. П. 1. Стенд НТЦ-10:

1 – корпус; 2 – блок электрических машин и аппаратов

Корпус состоит из стола и жестко соединенной с ним настольной приставки с лицевой панелью, на которой изображена принципиальная электрическая схема и установлена коммутационная и исследуемая аппаратура.

Принципиальная электрическая схема, на лицевой панели, для удобства выполнения работ, разделена на функциональные блоки.

На лицевой панели расположены:

- ✓ амперметры $A1-A9$;
- ✓ вольтметры $V1-V2$;
- ✓ измеритель рассогласования $\phi 1$;
- ✓ секундомер;

- ✓ рукоятки переключателей;
- ✓ сигнальная арматура;
- ✓ тумблер SA1 для включения стенда;
- ✓ предохранители.

Пределы измерения приборов указаны на панели.

Для сборки исследуемых схем используются перемычки, при помощи которых производится коммутация соответствующих гнезд, выведенных на лицевую панель стенда.

Блок электрических машин и аппаратов состоит из корпуса, в котором расположены исследуемые электрические машины и аппараты.

Блок электрических машин и аппаратов соединен с корпусом посредством жгута с разъёмом.

С помощью индикаторов HL1-HL3 производится контроль подачи на стенд трехфазного напряжения по фазам А, В, С после включения тумблера SA1.

Стенд СЭС-1-Н-К (рис. П. 2) состоит из каркаса, в который вставляются модули в соответствии с собираемой схемой.

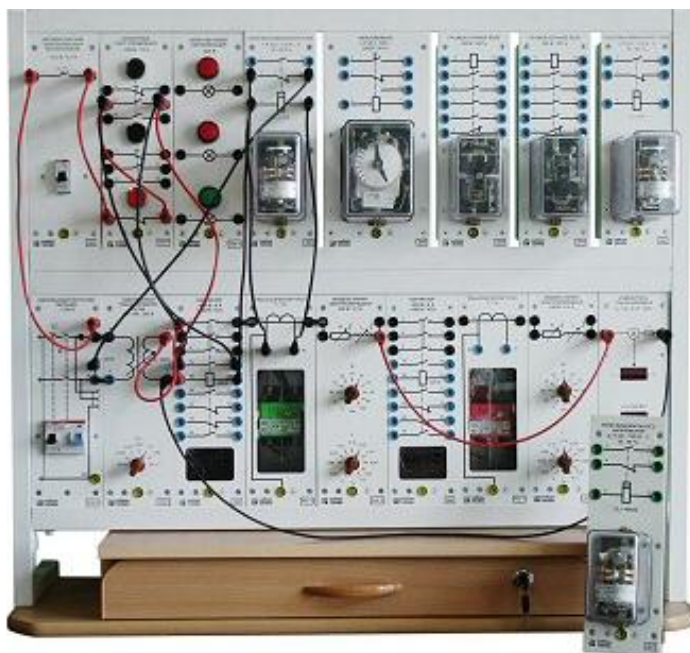


Рис. П. 2. Стенд СЭС-1-Н-К

В состав аппаратной части стенда входят следующие модули:

- ✓ однофазный источник питания;
- ✓ модели линии электропередачи;
- ✓ блок световой сигнализации;
- ✓ кнопочный пост управления;
- ✓ электротепловое реле;
- ✓ автоматический однополюсный выключатель;
- ✓ контактор;
- ✓ реле максимального тока;
- ✓ реле минимального напряжения;
- ✓ реле времени;
- ✓ промежуточное реле;
- ✓ однофазный трансформатор;
- ✓ трансформатор тока;
- ✓ измеритель тока и времени.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, В. А. Релейная защита и автоматика систем электропитания / В. А. Андреев, Е. В. Бондаренко. – М. : Высшая школа, 2006. – 639 с.
2. Будзко, И. А. Электроснабжение сельского хозяйства / И. А. Будзко, Т. Б. Лещинская, В. И. Сукманов. – М. : Колос, 2000. – 536 с.
3. Правила устройства электроустановок (ПЭУ). – 7-е изд. – М. : Энергосервис, 2002. – 222 с.
4. Практикум по электроснабжению сельского хозяйства / под редакцией / И. А. Будзко. – М. : Колос, 1982. – 319 с.
5. Гловацкий, В. Г. Современные средства релейной защиты и автоматизации электросетей / В. Г. Гловацкий, И. В. Пономарев. – М.: Энергомашвин, 2006. – 534 с.
6. Веников, В. А. Электроэнергетические системы в примерах и иллюстрациях. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 504 с.
7. Шабай, М. А. Расчеты релейной защиты и автоматизации распределительных сетей : монография. – СПб. : ПЭИК 2003. – 390 с.
8. Электроснабжение промышленных предприятий : методические указания по выполнению лабораторных работ на стенде. – Могилев, 2008. – 36 с.

АЛФАВИТНО-ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматический выключатель, 75
Амперметр, 18, 104
Быстронасыщающийся трансформатор, 30
Вектор магнитного потока, 8
Векторная диаграмма, 8
Вихревые токи, 47
Вольт-амперная характеристика, 12
Времятоковая характеристика защиты, 42
Выключатель, 45, 58, 65, 66, 75, 76, 100, 102
Дифференциальные защиты, 67, 72
Замыкатель, 92
Индикатор измерителя, 45, 58, 65, 66, 71, 77, 81, 90
Источника питания, 13, 43, 57, 58, 61, 63, 65, 69, 70, 76, 77, 80, 81, 89, 100, 102
Классы точности, 9
Короткие замыкания, 15, 18, 20, 45, 59, 66, 71, 77, 81, 91
Линии электропередачи, 43, 45, 46, 57, 59, 65, 66, 69, 70, 71, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 89, 91, 97, 100, 102, 106, 110
Магнитный поток, 6, 32, 47
Обмотка, 5, 6, 10, 11, 12, 14, 15, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 51, 52, 53
Переключатель, 18
Полосные наконечники, 36
Проводник, 45, 57, 58, 65, 66, 70, 71, 77, 81, 89, 90, 100, 102
Режим работы, 94, 96
Реле, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 15, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 55, 56, 57, 59, 62, 63, 66, 68, 69, 71, 73, 74, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 91, 92, 93, 95, 96, 100, 106, 110
Соединение разность токов двух фаз, 17
треугольник, 16
фильтр токов нулевой последовательности, 18
Схема электрических соединений, 14, 65, 71, 77, 91, 102
Трансформатор тока, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 15, 18, 19, 21, 32, 33, 42, 83, 89, 92, 96, 109
Тумблер, 18, 50, 52, 84, 85, 92, 105
Уставка, 29, 41, 51
Устройство автоматического повторного включения, 97

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Меры безопасности при работе с электрооборудованием.....	4
Лабораторно-практическая работа №1. Исследование трансформаторов тока (ТТ).....	5
Лабораторно-практическая работа №2. Исследование схем включения вторичных обмоток трансформаторов тока.....	15
Лабораторно-практическая работа №3. Изучение конструкции и характеристик реле, применяемых в защитах энергосистем.....	22
Лабораторно-практическая работа №4. Моделирование максимальной токовой защиты линии электропередачи.....	42
Лабораторно-практическая работа №5. Моделирование максимальной токовой защиты с применением индукционного токового реле.....	47
Лабораторно-практическая работа №6. Моделирование мгновенной токовой отсечки линии электропередачи.....	54
Лабораторно-практическая работа №7. Моделирование максимальной токовой защиты радиальной электрической сети с односторонним питанием.....	61
Лабораторно-практическая работа №8. Моделирование дифференциальной защиты линии электропередачи.....	67
Лабораторно-практическая работа №9. Моделирование максимальной токовой защиты электрической цепи с помощью автоматического выключателя.....	73
Лабораторно-практическая работа №10. Моделирование тепловой защиты электрической цепи с помощью электротеплового реле.....	79
Лабораторно-практическая работа №11. Испытание релейной защиты высоковольтного электродвигателя.....	83
Лабораторно-практическая работа №12. Моделирование дифференциальной защиты трансформатора.....	87
Лабораторно-практическая работа №13. Моделирование релейной защиты понижающего трансформатора.....	92
Лабораторно-практическая работа №14. Автоматическое повторное включение линии электропередачи.....	97
Приложение. Оборудование для выполнения практических занятий.....	104
Рекомендуемая литература.....	107
Алфавитно-предметный указатель.....	108

Учебное издание

**Кузнецов Михаил Александрович
Крючин Павел Владимирович
Фатхутдинов Марат Рафаилович**

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Практикум

Подписано в печать 2.11.2015. Формат 60×841/16

Усл. печ. л. 6,39, печ. л. 6,88.

Тираж 100. Заказ №300.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО Самарской ГСХА
446442, Самарская область, г. Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, 2

Тел.: (84663) 46-2-47

Факс 46-6-70

Е-mail: ssaariz@mail.ru

Отпечатано с готового оригинал-макета в ООО «Медиа-Книга»

443070, г. Самара, ул. Песчаная, 1, оф. 310

Тел. (846) 267-36-82. Е-mail: izdatkniga@yandex.ru



Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования
«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

Кафедра «Электрификация и автоматизация АПК»

М.Р. Фатхутдинов, А.А. Гашенко, П.В. Крючин, М.А. Кузнецов

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Методические указания
для выполнения курсового проекта

Кинель
РИЦ СГСХА
2015

УДК
ББК
Ф-27

Фатхутдинов, М. Р.

Ф-27 Эксплуатация электрооборудования : методические указания для выполнения курсового проекта / М. Р. Фатхутдинов, А. А. Гашенко, П. В. Крючин, М. А. Кузнецов. – Кинель : РИЦ СГСХА, 2015. – 64 с.

Методические указания содержат рекомендации по выполнению курсового проекта по эксплуатации электрооборудования, требования к его структуре и оформлению, основные теоретические сведения. Учебное издание предназначено для студентов, обучающихся по направлению 35.03.06 «Агроинженерия», профиль подготовки «Электрооборудование и электротехнологии».

©ФГБОУ ВО Самарская ГСХА, 2015
© Фатхутдинов М. Р., Гашенко А. А., Крючин П. В.,
Кузнецов М. А., 2015

Оглавление

Предисловие	4
Структура курсового проекта	5
Правила оформления	6
Исходные данные для выполнения проекта	7
Защита курсового проекта	7
Указания к выполнению курсового проекта по тематике «Расчет годовой производственной программы ЭТС для хозяйства, состоящего из следующих объектов»	10
Рекомендуемая литература	43
Приложения	44

Предисловие

Методические указания соответствуют государственному образовательному стандарту ФГОС-3 дисциплины «Эксплуатация электрооборудования» для студентов высших учебных заведений.

В методических указаниях приводятся пояснения по выбору исходных данных, рекомендации по выполнению курсового проекта, основные теоретические сведения, требования к его структуре и оформлению.

Целью выполнения данного курсового проекта является формирование и развитие у студентов следующих компетенций: понимание социальной значимости своей будущей профессии и способностью использовать типовые технологии технического обслуживания, ремонта и восстановления изношенных деталей машин и электрооборудования (ПК-12).

Задачи выполнения курсового проекта – формирование умений расчета объема работ по обслуживанию электрооборудования, расчета затрат труда на техническое обслуживание, расчет численности персонала ЭТС и распределение его по подразделениям, выбор формы и структуры ЭТС хозяйства, планирование работ ЭТС.

Курсовой проект состоит из пояснительной записки объемом 40-50 страниц и 1 чертежа графического материала, включающего годовой график проведения текущих ремонтов электрооборудования хозяйства.

Тематика курсового проекта определяется в соответствии с задачами изучения дисциплины «Эксплуатация электрооборудования» и посвящена расчету годовой производственной программы ЭТС для хозяйства, состоящего из четырех объектов.

Структура курсового проекта

Курсовой проект выполняется студентом в соответствии с темой, указанной в индивидуальном задании. Индивидуальное задание выдается преподавателем, тематика проекта утверждается деканом факультета в начале учебного семестра.

Курсовой проект должен содержать: титульный лист; задание на курсовой проект; реферат; оглавление; введение; основную часть; выводы и предложения; список использованной литературы и источников; приложения.

Титульный лист оформляется строго по образцу, приведенному в приложении 1.

Задание на курсовой проект содержит тему, основные исходные данные для выполнения курсового проекта и оформляется руководителем (прил. 2). Рекомендуемый объем 1 страница.

Реферат содержит краткое точное изложение содержания работы, включающее основные сведения и выводы, а также сокращения, используемые в проекте (прил. 3). Рекомендуемый объем 1-2 страницы.

Оглавление включает наименование всех разделов с указанием номеров страниц (прил. 4).

Введение. Во введении обосновывается актуальность темы исследования, определяется объект исследования, формулируется цель и задачи. Рекомендуемый объем 1-2 страницы.

Основная часть. В основной части проекта должны содержаться соответствующие теоретические сведения; используемые исходные данные, необходимые расчеты и результаты расчетов в виде таблиц, обоснования расчетов, оценка результатов. Рекомендуемый объем 33-43 страницы.

Выводы и предложения. В выводах и предложениях обобщаются основные положения, делаются выводы и определяются возможные направления для дальнейшего исследования проблемы. Рекомендуемый объем 1-2 страницы.

Список использованной литературы и источников оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание». Рекомендуемый объем 1-2 страницы.

Приложения. В приложении приводится квартальный график технического обслуживания.

Правила оформления

Оформление курсового проекта должно соответствовать ГОСТ (ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание», ГОСТ 7.82-2001 «Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов», ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления», ГОСТ 7.12-93 «Библиографическая запись. Сокращение слов на русском языке. Общие требования и правила», ГОСТ 2.105-95 «ЕСКД. Общие требования к текстовым документам»). Проект должен быть предоставлен в отпечатанном виде. Допускается и рукописный вариант, при этом объем увеличивается в 1,5 раза.

Курсовой проект должен быть напечатан на стандартном листе писчей бумаги в формате А4 с соблюдением следующих требований:

- поля: левое – 30 мм, правое – 10 мм, верхнее – 15 мм, нижнее – 20 мм;
- шрифт размером 14 пт, Times New Roman;
- межстрочный интервал – полуторный;
- отступ красной строки – 1,25;
- выравнивание текста – по ширине.

Каждый структурный элемент содержания проекта начинается с новой страницы. Наименование структурных элементов следует располагать по центру строки без точки в конце, без подчеркивания, отделяя от текста тремя межстрочными интервалами.

Иллюстрированный материал следует располагать в проекте непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые. На все иллюстрации должны быть ссылки. Иллюстрации (чертежи, графики, схемы, документы, рисунки, снимки) должны быть пронумерованы и иметь названия под иллюстрацией. Нумерация иллюстраций может быть сквозной по всему тексту проекта (например: рисунок 1, рисунок 2 и т.д.) или в пределах раздела (например рисунок 1.1, 2.1 и т.д.).

Таблицы располагаются непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые или на следующей странице. На все таблицы должны быть ссылки в тексте. Нумерация таблиц может быть сквозной по всему тексту в пределах раздела или проекта. Порядковый номер таблицы проставляется в правом верхнем

углу над ее названием после слова «Таблица». Тематический заголовок таблицы размещается над таблицей и выравнивается по центру строки, точка в конце заголовка не ставится.

Формулы приводятся сначала в буквенном выражении, затем дается расшифровка входящих в них индексов, величин в той же последовательности, в которой они даны в формуле. Уравнения и формулы следует выделять из текста в отдельную строку.

Уравнения и формулы нумеруются в круглых скобках справа от формулы. Нумерация уравнений и формул может быть сквозной по всему тексту курсового проекта или в пределах раздела.

Цитирование различных источников оформляется ссылкой на данный источник указанием его порядкового номера в списке использованной литературы и источников.

Чертеж графической части выполняют на листе формата А1 с использованием карандаша или графического редактора.

Исходные данные для выполнения проекта

В исходные данные входят наименование объектов подлежащих разработке, электрооборудование, а также степень удаления объекта.

Перечень вопросов, подлежащих разработке

1. Расчет объема работ по обслуживанию электрооборудования.
2. Расчет затрат труда на техническое обслуживание.
3. Расчет численности персонала ЭТС и распределение его по подразделениям.
4. Выбор формы и структуры ЭТС.
5. Планирование работ ЭТС.
6. Выбор ремонтно-обслуживающей базы ЭТС.
7. Обоснование технологической схемы ремонта электрооборудования и выбор технологического оборудования.
8. Расчет резервного фонда электрооборудования.

Защита курсового проекта

Защита производится публично. На защите присутствуют, как правило, все студенты группы. При защите курсовых проектов могут присутствовать заведующий кафедрой, декан, представители УМУ, представители ректората.

По результатам защиты курсовых проектов выставляется оценка по «пятибалльной» шкале («отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно»).

Положительные оценки по результатам защиты проставляются членами комиссии в протокол защиты, а в зачётно-экзаменационную ведомость и в зачетную книжку студента оценка выставляется по решению комиссии ведущим преподавателем.

Неудовлетворительные оценки проставляются только в зачётно-экзаменационную ведомость.

Критерии оценки знаний при защите курсового проекта

Оценка «отлично» выставляется студенту при выполнении курсового проекта в полном объеме; проект отличается глубиной проработки всех разделов, оформлен с соблюдением установленных норм; студент свободно владеет теоретическим материалом, безошибочно применяет его при решении поставленных задач; на все вопросы дает правильные и обоснованные ответы, убедительно защищает свою точку зрения, владеет разносторонними навыками и приемами выполнения практических заданий.

Оценка «хорошо» выставляется студенту при выполнении курсового проекта в полном объеме; проект отличается глубиной проработки всех разделов, оформлен с соблюдением установленных норм; студент твердо владеет теоретическим материалом, применяет его при решении поставленных задач; на большинство вопросов дает правильные и обоснованные ответы, убедительно защищает свою точку зрения.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту при выполнении курсового проекта в полном объеме; проект выполнен без глубокой проработки всех разделов, оформлен с соблюдением установленных норм; студент усвоил знания только по основному материалу; на вопросы отвечает неуверенно или допускает незначительные ошибки, неуверенно защищает свою точку зрения.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту при выполнении курсового проекта в полном объеме; проект выполнен без глубокой проработки всех разделов, оформлен с соблюдением установленных норм; студент не может защитить свои решения, допускает грубые фактические ошибки при ответах на вопросы или уклоняется от ответа.

Расчет годовой производственной программы ЭТС для хозяйства, состоящего из следующих объектов

Тема проекта. Расчет годовой производственной программы ЭТС для хозяйства, состоящего из следующих объектов: свинарник откормочник на 1500 мест, овчарня на 300 баранов, мастерская РТБ на 40 тракторов, теплица площадью 1000м².

Исходные данные на курсовой проект

1 Расчет объема работ по обслуживанию электрооборудования.

Определение трудоемкости работ по техническому обслуживанию (ТО), текущему ремонту (ТР) и капитальному ремонту (КР) электрооборудования производится тремя методами [1, 2, 4]:

- измерение объема работ в условных единицах электрооборудования (УЕЭ);

- объем работ определяется в единицах трудоемкости (в нормочасах);

- электрооборудование сначала переводят в условные единицы ремонта (УЕР), а затем по трудоемкости одной УЕР определяют трудоемкость отдельных видов работ (ТО, ТР, ЗС, КР).

Используем первый метод для расчета общего числа персонала ЭТС и штата ИТР, а третий для определения затрат труда по видам технического обслуживания для каждого электрифицированного объекта хозяйства и определения численности электромонтеров в группах по видам работ (ТО, ТР, ЗС, КР) и ремонта электрооборудования [4]. Расчет ведется в форме таблицы 1.

Электрооборудование для каждого электрифицированного объекта хозяйства определенное на основании задания заносят в графу 1, а количество оборудования в каждой группе в графу 3.

В графу 4 заносят условное обозначение среды, в которой работает оборудование, определяемое в приложении 5, в графу 5 число часов работы в сутки (прил. 6) и 6 графу коэффициент сезонности (прил. 7).

Таблица 1

Расчетная таблица с картой учета электрооборудования

Наименование и характеристика оборудования	Единица измерения	Количество	Среды	Число часов работы в сутки	Коэффициент сезонности	Объем работ в условных единицах электрооборудования (УЕЭ)		Годовое количество физ. ремонтов на единицу измерения по нормам, шт.				Коэффициент перевода физических ремонтов в условные				Количество условных ремонтов в год			
						Един.	Общ.	ТО	ТР	ЗС	КР	ТО	ТР	ЗС	КР	ТО	ТР	ЗС	КР
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Бригада №1																			
Объект																			
Тип электрооборудования																			
Всего																			

Объем работ на единицу оборудования УЕЭ определяют по приложению 14 и заносят в графу 7. При этом следует учесть, что в объем работ в УЕЭ силового оборудования входит также и объем работ по ТО и ТР аппаратуры управления и проводки, поэтому графы 7 и 8 расчетной таблицы 1 записываются только для силового оборудования [4].

Объем работ по каждой группе оборудования определяется путем перемножения данных, приведенных в графах 3 и 7. Общий объем работ по участку обслуживания определяется суммированием УЕЭ в графе 8.

Определение физического количества ремонтов проводится по данным таблицы 5 в зависимости от места установок и времени работы в сутки, определить годовое количество ТО, ТР, ЗС, КР на единицу оборудования и занести соответственно в графы 9, 10, 11, 12.

При постановке оборудования на консервацию, то к годовому количеству физических ТО по нормам (графа 9) добавить одно ТО на консервацию.

Таблица 2

Годовое количество ТО, ТР, ЗС и КР электрооборудования в зависимости от места его установки и времени работы в сутки

Электротехническое оборудование и место его установки	Время работы электротехнического оборудования											
	До 8 ч.				До 16 ч.				Более 16 ч.			
	ТО	ТР	ЗС	КР	ТО	ТР	ЗС	КР	ТО	ТР	ЗС	КР
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Электродвигатели, сварочные трансформаторы, щиты, сборки, пускорегулирующая аппаратура и прочее электротехническое оборудование:												
- в сырых помещениях с выделением аммиака	24	2	2	0,18	34	2	2	0,25	57	3	3	0,42
- во влажных и сырых помещениях и на открытом воздухе или под навесом	16	2	1	0,14	22	2	1	0,2	37	3	2	0,33
- в пыльных помещениях	7	2	1	0,14	10	2	1	0,2	17	3	2	0,33
- в сухих помещениях с нормальной средой	5	1	1	0,11	7	1	1	0,15	12	2	3	0,25

Окончание таблицы 2

Электроводонагреватели электродные и котлы электродные паровые	5	1	-	0,3	5	1	-	0,3	5	1	-	0,3
Электроводонагреватели емкостные и проточные (элементные)	5	1	-	0,2	5	1	-	0,2	5	1	-	0,2
Установки электрокалориферные	5	1	-	-	5	1	-	-	5	1	-	-
Электропроводки, щитки, светильники:												
– в сухих помещениях с нормальной средой	2	-	-	-	2	-	-	-	2	-	-	-
– в сырых, пыльных, загазованных помещениях и на открытом воздухе	4	-	-	-	4	-	-	-	4	-	-	-
Надземная часть заземляющих устройств (заземляющие магистрали)	4	-	-	0,07	4	-	-	0,07	4	-	-	0,07
Заземляющие устройства	4	-	-	0,07	4	-	-	0,07	4	-	-	0,07
Воздушные линии:												
– на деревянных опорах	3	1	-	0,17	3	1	-	0,17	3	1	-	0,17
– на металлических и ж/б опорах	3	1	-	0,11	3	1	-	0,11	3	1	-	0,11
Кабельные линии	3	1	-	0,08	3	1	-	0,08	3	1	-	0,08
Распределительные устройства подстанций	3	1	-	0,33	3	1	-	0,33	3	1	-	0,33
Силовые трансформаторы подстанций	2	0,33	-	0,14	2	0,33	-	0,14	2	0,33	-	0,14

Примечание: Замена смазки производится во вращающихся электрических машинах мощностью более 70 кВт.

Количество условных ремонтов в год (графы 17, 18, 19, 20) таблицы 1 определяют умножения годового количества физических ремонтов (графы 9, 10, 11, 12) на коэффициент перевода физических ремонтов по группам оборудования (графы 13, 14, 15, 16), берется из приложения 3, на количество (графа 3) и на коэффициент сезонности (графа 6).

Общий годовой объем работ по ТО, ТР, ЗС, КР для участка обслуживания или хозяйства определяют в физических и услов-

ных ремонтах как сумма объемов работ по электрифицированным объектам (итоги граф 17, 18, 19, 20).

В приложении 8 приведен фрагмент примера расчета с использованием таблицы 1.

2 Расчет затрат труда на техническое обслуживание

Данные затрат труда на проведение работ необходимы для определения численности персонала ЭТС.

Мероприятия по содержанию электрооборудования в технически исправном состоянии на протяжении всего амортизационного периода обеспечивается выполнением плановых и внеплановых мероприятий по обслуживанию и ремонту. К плановым мероприятиям относятся ТО, ТР, ЗС, КР.

Оперативное (дежурное) техническое обслуживание, выполненное оперативным персоналом относится к внеплановым.

Годовые затраты для ТО, ТР, ЗС, КР определяются путем умножения трудоемкости условной единицы ремонта (табл. 3) на количество условных ремонтов соответствующего вида работ из таблицы 1 (графы 17, 18, 19, 20).

Таблица 3

Норматив трудоемкости на 1 условную единицу ремонта, чел.-ч.

Виды работ	Норматив трудоемкости, чел.-ч.
Техническое обслуживание (ТО)	0,50
Текущий ремонт (ТР)	4,80
Замена смазки (ЗС)	0,25
Капитальный ремонт (КР)	12,5

Результаты расчета сводим в таблицу 4.

Таблица 4

Расчет затрат труда

Объекты хозяй- ства	Количество условных ремонтв в год, шт.				Затраты труда на проведение видов работ, чел.-ч.				
	ТО	ТР	ЗС	КР	ТО	ТР	ЗС	КР	ДО
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Бригада №1									
Объект									
Всего									

Для удобства составления графиков текущих и капитальных ремонтов, а также графиков ТО, следует определить затраты труда по отдельным объектам хозяйства, а не в целом по хозяйству.

В графу 1 заносят объекты хозяйства из таблицы 1. Из этой же таблицы (графы 17, 18, 19, 20) заполняют графы 2, 3, 4, 5 соответственно.

Затраты труда на проведение видов работ (графа 6, 7, 8, 9) получают путем умножения трудоемкости вида работ (табл. 3) на количество условных ремонтв в год на данном объекте (графы 2, 3, 4, 5).

В приложении 9 приведен пример расчета с использованием таблицы 4.

Затраты труда на проведение оперативного (дежурного) обслуживания можно определить по формуле [4]:

$$Z_{д.о} = K_{д.о} (Z_{т.о} + Z_{т.р} + Z_{з.с}), \text{ чел.-ч}, \quad (1)$$

где $Z_{д.о}$ – затраты труда, чел.-ч, на проведение оперативного (дежурного) обслуживания;

$K_{д.о}$ – коэффициент долевого участия и затрат труда на дежурное обслуживание, $K_{д.о} = 0,15$;

$Z_{т.о}, Z_{т.р}, Z_{з.с}$ – затраты труда, чел.-ч, на выполнение ТО, ТР, ЗС.

$$Z_{д.о} = 0,15 \cdot (2888434 + 248251 + 367,5) = 4760,15 \text{ чел.-ч.}$$

3 Расчет численности персонала ЭТС и распределение его по подразделениям

Количество персонала в группах обслуживания и ремонта электрооборудования определяют по формуле [1, 4]

$$N_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} Z_i}{\Phi_D}, \quad (2)$$

где N_x – количество персонала, чел, в группе;
 Z_i – годовые затраты труда, чел.-ч, на выполнение i -го вида работ;
 Φ_D – действительный фонд рабочего времени, ч.

$$N_x = \frac{2888434 + 248251 + 367,5}{1748} = 18,2 \text{ чел.}$$

Действительный фонд рабочего времени рассчитывают в следующем порядке [4]:

1) при пятидневной рабочей неделе с двумя выходными днями в году определяют количество рабочих дней

$$d_{\text{раб}} = d_k - 2d_n - d_n, \quad (3)$$

где $d_{\text{раб}}$ – количество рабочих дней в году;
 d_k – количество календарных дней в году;
 d_n – количество недель в году, $d_n = 52$.
 d_n – количество праздничных дней в году, согласно Кзот $d_n = 14$.

$$d_{\text{раб}} = 365 - 2 \cdot 52 - 14 = 247, \text{ дней}$$

2) находят действительный фонд рабочего времени, ч:

$$\Phi_D = [(d_{\text{раб}} - d_{\text{отп}}) \cdot t - n d_{\text{отп}}] n_{\text{раб}}, \quad (4)$$

где $d_{\text{отп}}$ – количество отпускных дней в году, согласно Кзот $d_{\text{отп}} = 20$ дней;
 t – средняя продолжительность рабочей смены (при двух выходных днях в неделю – 8 ч);

- n – число часов, на которое укорочен праздничный день (обычно 1 ч);
- d_{nn} – количество, праздничных дней в году, согласно Кзот $d_{nn} = 8$ дней;
- $\eta_{раб}$ – коэффициент, учитывающий потери рабочего времени по уважительным причинам, $\eta_{раб} = 0,95..0,96$.

$$\Phi_{Д} = [(251 - 20) \cdot 8 - 8] \cdot 0,95 = 1748 \text{ ч.}$$

Число электромонтеров в группе дежурного обслуживания, чел [4]:

$$N_{Д.О} = \frac{3_{Т.О} + 3_{Т.Р} + 3_{З.С}}{\Phi_{Д}} \cdot K_{Д.О}, \quad (5)$$

где $K_{Д.О}$ – коэффициент, учитывающий затраты труда на дежурное обслуживание, $K_{Д.О} = 0,15$;

$\Phi_{Д}$ – действительный фонд рабочего времени, ч.

$$N_{Д.О} = \frac{2888434 + 248251 + 367,5}{1748} \cdot 0,15 = 2,7 \text{ чел.}$$

Зная численность электромонтеров по видам работ, можно определить среднегодовое число электромонтеров, ч [4]:

$$N = \sum N_i + N_{Д.О}. \quad (6)$$

$$N = 2,723 + 18,154 = 21 \text{ чел.}$$

Для учета различных способностей, опыта, квалификации электромонтеров рассчитывают гарантированное число электромонтеров, обеспечивающих выполнение максимально возможного объема работ при наихудших условиях. Для этого можно воспользоваться выражением [1, 4]

$$N_{Г} = N(1 + \rho K')(1 + \rho K''), \quad (7)$$

где N – среднегодовое число электромонтеров, чел;

ρ – оценка доверительного интервала изменения случайных величин, $\rho = 1...3$;

K' – коэффициент вариации объема работ исполнителей, $K' = 0,05 \dots 0,1$,

K'' – коэффициент вариации производительности исполнителей, $K'' = 0,07 \dots 0,15$.

$$N_{\Gamma} = 21 \cdot (1 + 2 \cdot 0,06) \cdot (1 + 2 \cdot 0,08) = 27,2$$

Значения коэффициентов K' и K'' определяют по результатам обследования ЭТС. В приближенных расчетах используют формулы нормального распределения случайных величин [4]:

$$K' = \frac{\tau_{\max} - \tau_{\min}}{6\tau}, \quad (8)$$

$$K'' = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{6f}, \quad (9)$$

где $\tau_{\max}, \tau_{\min}, \tau$ – наибольшие, наименьшие и средние трудозатраты на ТО (ТР) однотипных электродвигателей одним и тем же исполнителем,

$$\tau_{\max} = 12ч, \tau_{\min} = 8ч, \tau = 10ч ;$$

f_{\max}, f_{\min}, f – наибольший, наименьший и средний расход времени различными исполнителями на ТО (ТР) однотипных электродвигателей,

$$f_{\max} = 11ч, f_{\min} = 8ч, f = 9,5ч .$$

$$K' = \frac{12 - 8}{6 \cdot 10} = 0,06.$$

$$K'' = \frac{11 - 8}{6 \cdot 9,5} = 0,05.$$

Окончательное решение о количестве электромонтеров принимают при обосновании структуры ЭТС и оно должно находиться в пределах от N до N_{Γ} .

Должности руководителей ЭТС определяют согласно данным, приведенным в приложении 10 [4]. Для того, чтобы учесть разъездной характер труда и ненормированный рабочий день ИТР и

руководителя ЭТС необходимо количество УЕЭ в хозяйстве увеличить на 15%.

Количество ИТР определяют на основании нормативов, приведенных в приложении 11 [4].

Правильность выбора штата ИТР ЭТС можно проверить по данным, приведенным в приложении 12.

4 Выбор формы и структуры ЭТС

В предприятиях АПК применяют хозяйственную, специализированную и комплексную форму технической эксплуатации электрооборудования.

Методы обоснования формы ЭТС различают по числу учитываемых факторов.

По первому методу учитывают только объем производственной программы. Он заключается в сопоставлении ранее рассчитанного объема работ ЭТС с данными, приведенными в приложении 13 и выбора по ней рекомендуемой формы ЭТС.

По второму методу учитывается не только объем работ, но и обеспеченность службы электромонтерами N^* а также удаленность хозяйства от районного центра – L .

Для выбора формы ЭТС используют номограмму приведенную на рисунке 1 [1, 2, 3, 4].

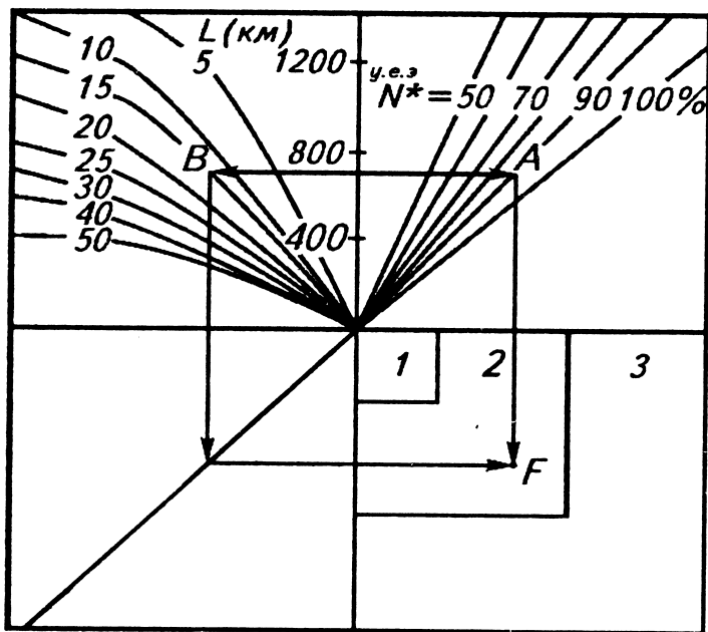


Рис. 1. Номограмма для определения формы ЭТС:
1-комплексная; 2-специализированная; 3-хозяйственная

На оси ординат откладывают объем работ ЭТС и проводят линию до пересечения с лучом N^* соответствующим обеспеченности хозяйства электромонтерами и с кривой, соответствующей расстоянию от хозяйства до районного центра. Из полученных точек А и В проводим линии, параллельные оси ординат. Линия проходящая через точку В переносится, как показано на рисунке 1, и находится точка F, которая определяет зону искомой формы ЭТС.

При хозяйственной форме обслуживания весь комплекс работ по ТО и ТР электротехнического оборудования выполняется энергетической службой хозяйства. Для выполнения КР, проведение контрольных измерительных испытаний и пусконаладочных работ сложных установок привлекаются другие организации [2, 4].

При специализированной форме обслуживания хозяйство передает привлекаемой организации на полное техническое обслу-

живание и ремонт отдельные объекты или виды работ (текущий, капитальный ремонт или пусконаладочные работы).

При комплексном обслуживании все работы по ТО, ТР, КР электрооборудования в хозяйстве выполняются привлекаемой организацией.

Правильный выбор формы ЭТС проверяют по следующим признакам рационального построения ЭТС.

1. *Хозяйственная форма ЭТС* оправдана при достаточно большом объеме работ по эксплуатации электрооборудования в хозяйстве и хорошей его обеспеченностью трудовыми и материальными ресурсами, а также при значительном удалении хозяйства от районного центра [2, 4].

2. *Специализированная и комплексная формы ЭТС* облегчают концентрацию усилий на наиболее важных в данный момент участках, оправданы при дефиците тех или иных ресурсов. Кроме того они позволяют более полно и интенсивно использовать ремонтно-обслуживающую базу. Но эти достоинства реализуются лишь при хорошей диспетчерской службе и надежной транспортной связи с хозяйствами [2, 4].

Постоянный рост объемов работ по технической эксплуатации электрооборудования и развитию ремонтно-обслуживающей базы ЭТС, непрерывное увеличение уровня электрификации и автоматизации АПК в условиях кооперации и специализации производства усложняет функции управления ЭТС.

Поэтому важно выбрать наиболее рациональную структуру ЭТС, Организационная структура характеризует состав и взаимодействие подразделений службы при выполнении производственной программы. ЭТС может иметь: функциональную, территориальную или комбинированную (гибкую) структуры.

Функциональная структура ЭТС приведена на рисунке 2. В ее основе лежит распределение исполнителей и материально-технических ресурсов по видам выполняемых работ. Для этого создаются специализированные бригады, группы, которые выполняют только свои виды работ на всех объектах [2, 4].



Рис. 2. Функциональная структура ЭЭС

Территориальная структура ЭЭС приведена на рисунке 3. В ее основе лежит распределение исполнителей по объемам хозяйства (отделениям, бригадам, фермам). При этом выделенные группы исполнителей осуществляют все эксплуатационные работы, но только на своих участках [2, 4].

Гибкая структура ЭЭС предполагает возможность ее перестройки в течении года в зависимости от номенклатуры и объекта работ, приходящихся на тот или иной сезон [2, 4].

Правильное обоснование структуры ЭЭС заключается в том, что результаты обследования и расчетов сравнивают с известными преимуществами и недостатками той или иной структуры. Достоинства и недостатки функциональной структуры ЭЭС заключаются в следующем:

- а) наиболее полно используется индивидуальное мастерство исполнителей;
- б) снижается потребность в кадрах высокой квалификации;
- в) уменьшается использование дорогостоящих технических средств и зданий;
- г) возрастает потребность в транспортных и передвижных средствах;
- д) увеличиваются потери времени на переезды, от 10% при радиусе обслуживания 5 км, до 25% при радиусе обслуживания 15 км.

е) снижается ответственность исполнителей за состояние и использование электрооборудования.

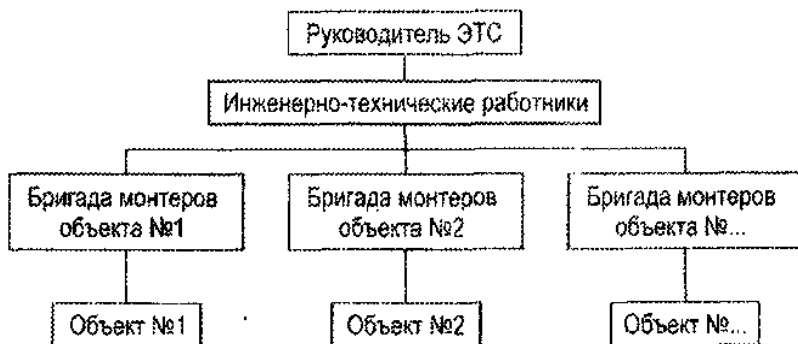


Рис. 3. Территориальная структура ЭТС

Достоинства и недостатки территориальной структуры заключаются в следующем:

- а) повышается оперативность обслуживания и устранения отказов;
- б) не всегда удается добиться равномерной загрузки исполнителей и технических средств;
- в) каждый электромонтер должен иметь высокую квалификацию.

Нужды хозяйства наиболее полно удовлетворяет гибкая структура ЭТС. Это объясняется тем, что состав и роль факторов, влияющих на выбор рациональной структуры, существенно зависят от сезона сельскохозяйственных работ.

Например, в период подготовки ферм к зимовке скота ЭТС имеет функциональную структуру, а в период зимовки территориальную структуру. Возможны и другие перестройки службы в зависимости от годовой программы и графика ТР. Обоснование структуры ЭТС выполняется графическим методом по номограмме, приведенной на рисунке 4 [1].

На оси ординат откладываем число электромонтеров N и через эту точку проводим линию АВ. Из точки В проводят линию до пересечения с лучом среднего коэффициента занятости, а затем перпендикулярно CD к ординате. Точка пересечения линий AD и CD определяет рациональную структуру ЭТС.

Средний коэффициент занятости можно рассчитать при помощи следующего выражения [2, 4]:

$$k_{зан} = \frac{\sum m_i h_i}{12 \sum h_i}, \quad (10)$$

- где h_i – число электрифицированных объектов (коровников, зернотоков и т.д.), шт.;
- m_i – число месяцев в году;
- $\sum h_i$ – всего электрифицированных объектов, шт., в хозяйстве.

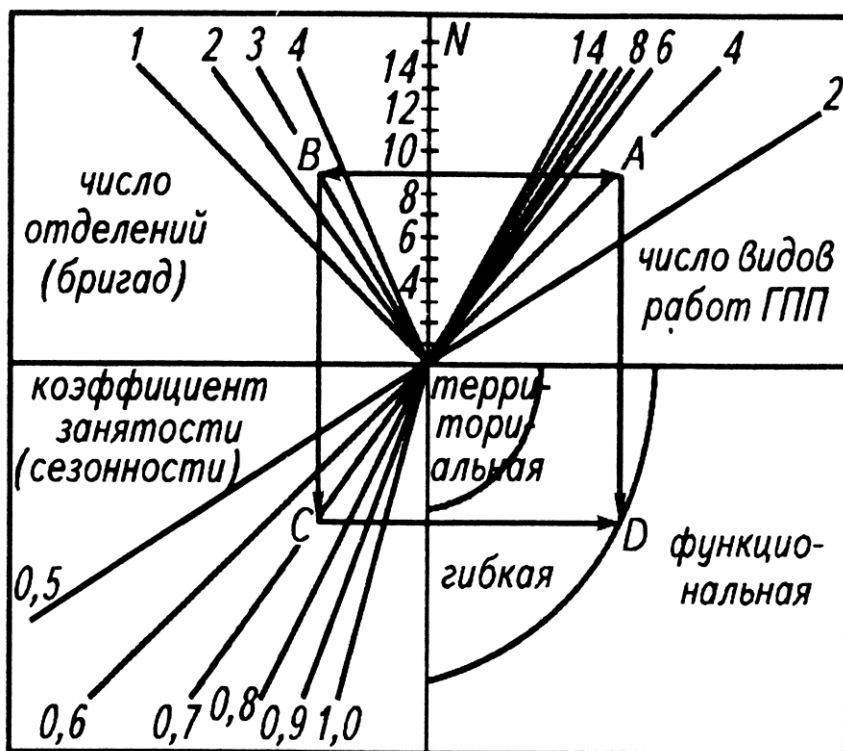


Рис. 4. Номограмма для выбора структуры ЭЭС

5 Планирование работ ЭТС

Планирование работ ЭТС заключается в разработке годового графика ТР и квартальных графиков ТО.

Разработку графиков следует начинать с годового графика ТР, а затем на его основании построить квартальные графики технического обслуживания и ремонта. Годовой график ТР рекомендуется для отдельных, объединенных общим технологическим процессом объектов (МТФ, СТФ, мехток и др).

При разработке графиков должны учитываться периодичность (количество) ремонтов, особенности технологии сельскохозяйственного производства, трудоемкость работ по техническому обслуживанию электрооборудования, а также действительный фонд рабочего времени персонала в соответствии с разработанной структурой электротехнической службы.

Сам график ТО и ТР имеет специальную форму (приложение 4, 5), он составляется с помощью определенных рекомендаций.

В качестве интервала времени при построении графика следует принять неделю (в году будет 52 недели, их целесообразно разбить на 4 квартала по 13 недель каждый).

Планируются отпуска электромонтеров, и отмечаются недели, когда электромонтеры находятся в отпусках.

Определяется еженедельная нагрузка бригады электромонтеров из расчета 40 часовой рабочей недели и принятой удаленности объектов от пункта текущего ремонта.

Составление графика ТО и ТР следует начинать с объектов сезонного использования.

Время проведения первого ТО и ТР в планируемом году устанавливается в зависимости от даты проведения таких мероприятий в предыдущем году и нормативных значений периодичности. Если даты проведения предшествующих мероприятий отсутствуют, то время проведения ТО и ТР выбирается произвольно с учетом общего количества их в год и периодичности проведения при условии выполнения всего комплекса мероприятий в планируемом году.

Необходимо стремиться к равномерной загрузке электромонтеров по неделям. Помимо этого следует добиваться, чтобы электромонтеры выполняли возможно больший объем работ на одном объекте. Производство трудоемких работ целесообразно преду-

смагивать на период наименьшей загрузки электрооборудования (пребывание скота на летних пастбищах, перерыв в работе электронагревательных установок и т.д.).

Допускается смещение проводимых мероприятий в пределах $\pm 35\%$ нормативной периодичности.

Мероприятия на графике отмечаются числами, соответствующими трудозатратам на проведение работ, например, для ТО с трудозатратами 14,7 чел.-ч на одно обслуживание проставляется число 14,7. При проведении для части электрооборудования ТР, а для остального ТО трудозатраты проставляются в виде дроби - в числителе трудозатраты на ТР, а в знаменателе трудозатраты на ТО, например, 39,6/1,8.

Чтобы не превышать недельную загрузку бригады электромонтеров по мере составления графика ведется понедельный учет трудоемкости выполненных работ путем суммирования трудозатрат после рассмотрения очередного объекта.

Для работ, имеющих трудозатраты на одно профилактическое мероприятие, превышающее недельную загрузку бригады, следует предусматривать выполнение в течение двух или нескольких недель.

6 Выбор ремонтно-обслуживающей базы ЭТС

Материально-техническая база для ремонта и обслуживания должна включать как стационарные пункты, так и передвижные мобильные средства. К стационарным пунктам относятся посты электрика (ПЭ) и пункты технического обслуживания и ремонта электрооборудования (ПТОРЭ). Пост электрика предназначен для проведения работ по профилактике, техническому обслуживанию, мелкому ремонту электрооборудования отдельных объектов (животноводческих комплексов, крупных ферм, тепличных комбинатов и тому подобных). Пост электрика размещается в одном из помещений обслуживаемого объекта [4, 5].

Пункты технического обслуживания и ремонта электрооборудования предназначены для проведения ремонтных работ силового электрооборудования, пускозащитной аппаратуры (ПЗА) и аппаратуры автоматики, проведения подготовительно-монтажных работ, работ по испытанию, настройке и регулировке электрооборудования, хранению инструмента, проводов, материалов, запасных

частей, обменного фонда и защитных средств. ПТОРЭ, как правило, размещают в центральном отделении хозяйства, в отдельном здании.

Общая площадь ремонтной базы может быть определена ориентировочно по объему электрооборудования в хозяйстве в УЕЭ.

В курсовом проекте необходимо показать компоновку поста электрика, состав оборудования и привести его план. Расчет площади пункта технического обслуживания и ремонта. Площадь пункта технического обслуживания можно определить исходя из числа УЕЭ в хозяйстве и числа электромонтеров в группе технического обслуживания по формулам

$$F = f_y \cdot Q, F = f_p \cdot N_{\text{ТО}}, \quad (11)$$

где $f_y = 0,1$ при $Q < 1000$ у.е.э.;

$f_y = 0,08$ при $Q \geq 1000$ у.е.э.;

$f_p = 25$ при $N_{\text{ТО}} \leq 3$ чел.;

$f_p = 17$ при $N_{\text{ТО}} > 3$ чел.

При этом следует помнить, что главные размеры здания должны соответствовать строительным нормам (ширина кратна 3 или 6; отношение длины к ширине не более 3:1).

Рассмотрим структуру ремонтно-обслуживающей базы (РОБ) ЭТС района, она содержит три уровня:

- технические средства первого уровня предназначены для оснащения подразделений энергетической службы специализирующихся на проведении технического обслуживания энергооборудования на участках хозяйства (отделении, ферме, зернотоке, и т.п.);
- технические средства второго уровня предназначены для оснащения подразделений энергетической службы, специализированных на проведении планового и оперативного текущего ремонта, подготовительно-монтажных и мелко-монтажных работ, несложных контрольно-измерительных и пусконаладочных работ электрооборудования, эксплуатируемого на территории всего хозяйства (или эксплуатационного участка, если хозяйство состоит на комплексном обслуживании районного предприятия "Агропромэнерго");
- технические средства третьего уровня предназначены для оснащения подразделений районных энергетических спе-

циализированных предприятий, например, "Агропромэнерго" или соответствующего участка РТП.

РОБ энергетических служб хозяйств формируется из технических средств и объектов первого и второго уровней. Состав объектов и средств на каждом уровне определяется не только сложностью работ, но и их собственными технико-экономическими характеристиками. Это значит, что для выполнения работ следует подобрать наиболее подходящие по специализации и производительности средства.

РОБ для первого уровня разработаны и приведен в таблице 5. Их целесообразно размещать в одном из помещений обслуживаемых ферм или комплексов. Оборудование РОБ первого уровня позволяет выполнять все операции технического обслуживания основных видов электроустановок, мелкий ремонт и несложные слесарные работы.

Таблица 5

Технические средства первого уровня РОБ

Обслуживаемый участок и виды выполняемых работ	Объем выполняемых работ в тыс. чел.-ч.	Средства РОБ при форме организации работ (Структуре ЭТС)	
		Территориальная структура ЭТС, обслуживание выполняется постоянно закрепленным персоналом	Функциональная структура ЭТС, обслуживание выполняется персоналом выездной бригады
1	2	3	4
Участок с парком обслуживания до 200 УЕЭ, техническое обслуживание энергооборудования	3,7	Пост электрика ВНИПТИМЭСХ, 1 вариант	Передвижная мастерская "Электрослужба" или ЛПИ-1, ЭДЛ-1, ММТО-ЭЖ-53
Участок с парком обслуживания до 400 УЕЭ, техническое обслуживание энергооборудования	7,4	Пост электрика ВНИПТИМЭСХ, 2 вариант	

1	2	3	4
Участок с парком обслуживания до 600 УЕЭ, техническое обслуживание энергооборудования	11,2	Пост электрика ВНИПТИМЭСХ, 3 вариант	
Молочный комплекс на 400 голов, техническое обслуживание энергооборудования	0,5	Электроучасток ПТО, типовой проект №816-224	
Молочный комплекс на 800 или 1200 голов, техническое обслуживание энергооборудования	0,7	Электроучасток ПТО, типовой проект №816-225	
Молочный комплекс на 1600 или 2000 голов, техническое обслуживание энергооборудования	1,1	Электроучасток ПТО, типовой проект №816-226	
Откормочная площадка КРС на: 5 10 20 тыс. голов, техническое обслуживание энергооборудования	2,3 3,5 5,3	Электроучасток ПТО, типовой проект №816-228	Передвижная мастерская “Электрослужба” или ЛПИ-1, ЭДЛ-1, ММТО-ЭЖ-53
Комплекс по откорму свиней на: 12 24 54 128 тыс. голов техническое обслуживание энергооборудования	1,8 2,8 9 14	Электроучасток ПТО, типовой проект №816-227, №816-227, №816-192, №816-193 соответственно	

Технические средства второго уровня РОБ энергетической службы включают стационарные ПТО [4], мастерские, цехи и передвижные мастерские (таблица 6).

Выбор технических средств для второго уровня РОБ, в зависимости от размеров парка обслуживаемого энергооборудования

или специфики обслуживаемого производственного подразделения следует производить в соответствии с данными приведенными в таблице 7. В таблице 8 приведены данные о автопередвижных средствах ПТО.

Таблица 6

Технические средства второго уровня РТБ

Наименование	Номер типового проекта	Объём работ, чел.-ч.	Основные виды выполняемых работ	
Пункт технического обслуживания и ремонта энергооборудования (ПТОРЭ) условных ремонтов в год: 2500 5000	816-1-148.88	10,0	Текущий ремонт, пусконаладочные и контрольно-измерительные работы, подготовка мелкомонтажных работ	
	816-1-150.88 816-1-151.88	20,1		
Центральная ремонтная мастерская с электроучастком для хозяйств с парком тракторов:			То же	
	25	816-127		4,6
	50	816-128		5,0
	75	816-129		8,3
	100	816-130		9,5
	150	816-131		12,8
	200	816-132		14,1

Проекты разработаны в Гипросельхозпроме г. Владимира [4].

Таблица 7

Рекомендации по выбору объектов и технических средств второго уровня РОБ

Размер парка электроустановок обслуживаемого производственного участка, УЕЭ	Постоянно закрепляемые ремонтно-обслуживающие средства второго уровня	Временно используемые средства, место их постоянного закрепления
до 600	нет	см. табл. 8
от 601 до 800	1. электроцех ЦРМ, типовой проект №816-1-49.83 2. электроцех ПТО свинокомплекса, типовой проект №816-192(193) 3. если на участке нет указанных ЦРМ, ПТО, то за одним из постов электрика закрепляется автомастерская ЭДЛ-1, ММТОЭЖ-53	
от 801 до 1200	электроцех ЦРМ, типовой проект №816-1-45(47).83, автомастерская ЭДЛ-1 или ММТОЭЖ-53	
от 1201 до 2000	ПТОРЭ на 2500 условных ремонтов в год, типовой проект №816-1-148(149).88, автомастерская ЭДЛ-1 или ММТОЭЖ-53	
более 2000	ПТОРЭ на 5000 условных ремонтов в год, типовой проект №816-1-150(151).88, автомастерская ЭДЛ-1 или ММТОЭЖ-53	

Таблица 8

Передвижные средства РОБ

Наименование	Объем выполняемых работ, чел.-ч.	Основные виды выполняемых работ
Автопередвижная ремонтная мастерская ЭДЛ-1; У-9П0;ММТОЭЖ-53	9,0	Текущий ремонт, мелкомонтажные работы
Автопередвижная мастерская для монтажа и пусконаладочных работ: ЭПЛ-2; МТП 817МЭ		Мои та ясные и пусконаладочные работы
Автопередвижная электроизмерительная лаборатория ЛПИ-1, "Электрослужба"		Электроизмерительные работы
Автопередвижная радиомастерская МПР-9934		Текущий ремонт радиоаппаратуры
Электротехническая лаборатория ЭТЛ-10-02		Электрические измерения и ремонт линий электропередач и трансформаторных подстанций
Автопередвижная мастерская для ремонта и обслуживания теплоэнергетического оборудования ТЭ- 1- 08		Текущий ремонт теплотехнического оборудования
Теплодиагностическая лаборатория ТДЛ 1	9,0	Техническое обслуживание и диагностика тепло технических устройств
Передвижная установка для химической очистки котлов и отопительных систем ВХП-1		Очистка котлов и отопительных систем

Ниже приведена краткая характеристика некоторых из перечисленных мобильных технических средств ремонтно-обслуживающей базы ЭТС хозяйства.

Автопередвижная мастерская ММТОЖ-53 предназначена для монтажа, пуско-наладки, текущего ремонта и технического обслуживания животноводческих ферм. Для расширения мастерской и

обеспечения выполнения операций технического обслуживания и текущего ремонта электрооборудования на местах установки ее рекомендуется доукомплектовать стендом УН-13, предназначенным для настройки защитных устройств и сушки электрических машин, прибором контроля сопротивления петли фаза-нуль - М-417, измерительным комплектом К-505 и индикатором напряжения ИН-91.

Передвижная электродиагностическая лаборатория ЭДЛ-1 предназначена для проведения технического обслуживания, технической диагностики и текущего ремонта электрооборудования напряжением до 1000 В. На базе электродиагностической лаборатории можно выполнять электромонтажные, слесарные, покрасочные, сварочные и грузоподъемные работы.

Пост электрика (рисунок 5 конструкции «ВНИПТИМЭСХ» [5]) предназначен для проведения работ по профилактике, техническому обслуживанию и мелкому ремонту электрооборудования, находящегося на участке (ферме, комплексе) хозяйства. Пост размещают в одном из помещений обслуживаемого участка, объекта.

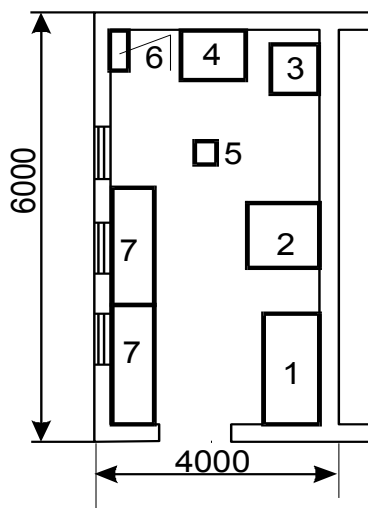


Рис. 5. Компоновка поста электрика по типовому проекту
1 – верстаки; 2 – заточный станок; 3 – шкафы для приборов; 4 – столы; 5 – стулья; 6 – шкафы для документации; 7 – стеллажи

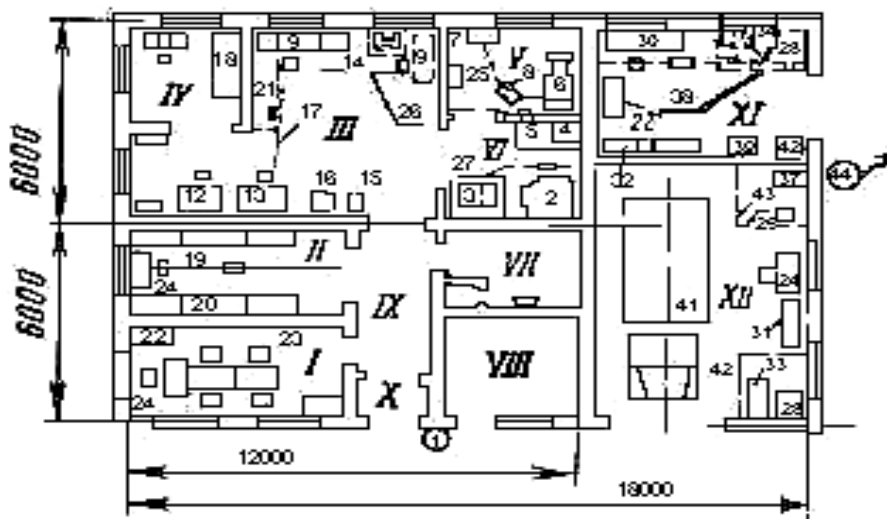


Рис. 6. Компоновка пункта технического обслуживания и ремонта электрооборудования по типовому проекту [3]

I – помещение для персонала; II – склад; III – участок ремонта электрооборудования; IV – участок ремонта средств связи; V, VI – участки пропитки, сушки, окраски; VII, VIII – вспомогательные помещения; IX, X – тамбуры; XI – монтажный цех; XII – заготовительный участок;

1, 44 – консольные краны; 2, 4 – сушильные шкафы; 3 – пропиточный бак; 5, 24, 30, 34 – столы; 6 – камеры для окраски; 7 – стол-верстак; 8 – передвижной компрессор; 9 – рабочее место двигателей; 10 – щит силовой; 11 – стенд измерительный; 12 – рабочее место для ремонта электроосветительных установок; 13 – рабочее место для ремонта пускозащитной аппаратуры; 14, 36 – сварочные трансформаторы; 15, 40 – электроточила; 16, 39 – настольно-сверлильный станок; 17 – таль; 18, 19, 20, 31, 32, 33 – стеллажи; 21 – тележка; 22, 25 – шкафы; 23 – стул; 28, 29, 37 – испытательные установки; 28, 42, 43 – ограждения; 41 – передвижная лаборатория

Таблица 9

Перечень оборудования, приборов и инструментов поста электрика

Оборудование, приборы и инструмент	Количество оборудования по вариантам		
	1	2	3
1 Мегаомметр М4100/3	1	1	1
2 Прибор типа Ц-434	1	2	3
3 Указатель напряжения УНН-90	1	2	3
4 Тахометр Т4-ЮР	1	1	2
5 Люксметр Ю-16	1	1	1
6 Пылесос	1	1	1
7 Комплект монтерского инструмента	1	2	3
8 Плоскогубцы с изолированными ручками	1	2	3
9 Предохранительный пояс *	1	2	3
10 Монтерские когти (пары) *	1	2	3
11 Электропаяльник ПСН-65	1	1	2
12 Электрическая дрель Э 1013	1	1	2
13 Тисы слесарные	1	1	2
14 Электроточило	1	1	1
15 Слесарный верстак	1	1	2
16 Стеллаж	1	2	2
17 Шкаф для технической литературы	1	1	1
18 Канцелярский стол	1	1	1
19 Стул	1	2	3

Примечание: * – необязательно.

Пункты технического обслуживания электрооборудования (ПТОРЭ) рекомендуется использовать для обслуживания и текущего ремонта электрооборудования. ПТОРЭ конструкции ВНИП-ТИМЭСХ (рисунок 6) [3, 5] предназначены для проведения профилактики, диагностики, текущего ремонта, наладки и настройки электрического оборудования, эксплуатируемого в сельском хозяйстве, проведения подготовительно-монтажных работ и испытания защитных средств.

Электроремонтная измерительная лаборатория (ЭРИЛ-СХ) конструкции ВНИПТИМЭСХ [2] предназначена для проведения профилактики, диагностики, текущего ремонта, наладки и настройки, а также монтажных и пусконаладочных работ энергетического оборудования в местах его установки.

Лаборатория может быть смонтирована на базе мастерской ГОСНИТИ-2, линейно-монтажной машины Л-1 и других автомобилей, имеющих шасси автомобилей ГАЗ-52, ГАЗ-53. В состав лаборатории входят: вводно-распределительное устройство, комплект измерительных приборов электрика, универсальный блок приборов, универсальный стенд МИИСП, генератор, два слесарных верстака с набором монтерского и слесарного инструмента, электроточило, сварочный генератор или трансформатор.

Электроизмерительная автолаборатория «Электрослужба» конструкции ВНИПТИМЭСХ предназначена для проведения профилактических, диагностических, пусконаладочных, электроизмерительных и мелкоремонтных работ, выполняемых при монтаже, эксплуатации, техническом обслуживании и ремонте электрооборудования в хозяйстве. Автолаборатория может быть смонтирована на базе автомобиля «Москвич-2715». В состав лаборатории входят: выдвижной слесарный верстак, комплект измерительных приборов электрика, универсальный стенд МИИСП, набор монтерского и слесарного инструмента.

7 Обоснование технологической схемы ремонта электрооборудования и выбор технологического оборудования

Компоновка оборудования, размеры отдельных помещений ПТОРЭ зависят от применяемой технологической схемы ремонта и вида ремонтируемого оборудования. Студентам предлагается самостоятельно разработать на основании имеющегося электрооборудования технологическую схему текущего ремонта, а также подобрать технологическое оборудование, используя специальную литературу по технологии ремонта (технологические карты ремонта и так далее).

Распределение площадей между участками и отдельными помещениями ориентировочно может быть принято по таблице 10 [5].

Таблица 10

Распределение площадей между участками и отдельными помещениями проектируемого ПТОРЭ

Наименование участка, помещения	Площадь в % от всего объема помещения
Участок очистки, дефектации и разборки	10
Участок ремонта силового электрооборудования	30
Участок ремонта пуско-наладочной аппаратуры	15
Участок ремонта, пропитки и сушки обмоток	10
Склад	20
Помещения для персонала	15

Каждый участок должен быть оснащен своим технологическим оборудованием, приспособлениями, приборами и инструментами. Примерный перечень приборов и оборудования для ПТОРЭ дан в таблицах 11 и 12.

Таблица 11

Примерный перечень приборов для ПТОРЭ

Наименование	Тип, марка, ГОСТ или номер рабочих чертежей	Краткая техническая характеристика, основные размеры или пределы измерения	Кол-во
1	2	3	4
Аппарат	ВЧФ-5-3		1
Комплект измерительных приборов	К-51		2
Измеритель заземления	ВС-0.8		2
Мост постоянного тока	Р-35		2
Комбинированный прибор	Ц-4326		2
Амперметр	Э-59	0-5-10 А	2
Вольтметр	Э-59	0-150-300-600 В	2
Трансформатор тока	И-59		3
Токоизмерительные клещи	Ц-91		2

Окончание таблицы 11

1	2	3	4
Мегаомметр	М 4100/5	2500 В	2
Динамометр пружинный	ГОСТ 9409-60	0...800 г.	1
Термометр	ГОСТ 2823-73	0...150 °С	1
Люксметр	Ю-26		1

Таблица 12

Примерный перечень оборудования ПТОРЭ

Наименование оборудования	Тип, марка, ГОСТ
1	2
Стеллаж для поступающего в ремонт оборудования	
Камера для очистки силового электрооборудования	ОРГ-6363
Ванна моечная передвижная	ОМ-1316
Компрессор диафрагменный	СО-45 А
Трансформатор сварочный	ТС-300
Трансформатор понижающий	ТВС-2-2.5
Верстак слесарный	ОРГ-1468-060 А
Генератор ацетиленовый	ГВН-1.25
Пресс гидравлический	ОКС-1529
Ванна для пропитки обмоток электрических машин	ОРГ-6364
Шкаф сушильный	СНОЛ-3.5
Стенд для разборки электродвигателей	ОПР-3314
Верстак для сборки электродвигателей	
Стенд для правки валов	ОКС-3273
Установка для испытания электрооборудования при текущем ремонте	КИ-6380
Намоточный станок	СРН-0.5

Окончание таблицы 12

1	2
Стенд для сборки и настройки пускозащитной аппаратуры	70-7980-2203.00.00
Точильный аппарат	ТА-255
Кран поворотный консольный	ЭТ-0.5
Стеллаж для отремонтированного электрооборудования	
Камера окрасочная	УКП-М-0000
Станок сверлильный	РС-12 А
Стенд-тележка	ОР-6360

8 Расчет резервного фонда электрооборудования

Резервный фонд электрооборудования сельскохозяйственного предприятия рассчитывается нормативным методом. Число резервных единиц всех видов электрооборудования определяют по нормативам резервного запаса, регламентированного системой ППРЭСх (таблица 13) [3, 4]. Необходимую при этом категоричность сельскохозяйственных потребителей следует принимать согласно данным таблицы 14. При расчете резервного фонда пускозащитных аппаратов необходимо учитывать оборудование установленное в силовых сборках и осветительных щитках.

Таблица 13

Нормы резервного запаса электрооборудования сельскохозяйственных предприятий

Тип электрооборудования	Количество ЭО, находящегося в эксплуатации, шт	Нормы запаса	
		в % от эксплуатируемого ЭО	минимальное число
1	2	3	4
Трехфазные асинхронные электродвигатели*	До 20	14	1
	21...50	10	1
	51...100	6	2
	свыше 100	4	3

Окончание таблицы 13

Трехфазные асинхронные электродвигатели* *	До 20	10	0
	21...50	8	1
	51...100	4	2
	свыше 100	2,5	2
Магнитные пускатели	До 20	10	0
	21...200	6	1
	Свыше 200	4	3
Автоматические выключатели	До 20	10	0
	21...200	3	1
	Свыше 200	5	2
Рубильники и пакетные выключатели	До 20	10	0
	21...100	4	1
	Свыше 100	3	2
Кнопки управления, универсальные ключи и переключатели	До 100	5	1
	Свыше 100	3	2
Реле	До 20	10	1
	Свыше 20	5	1
Электротермическое оборудование	До 20	10	1
	Свыше 20	5	1
Электроизмерительные приборы	До 20	5	0
	Свыше 20	4	1
Счетчики электроэнергии	До 20	5	0
Трансформаторы тока и напряжения	Свыше 20	3	1

* - категория надежности электроснабжения 1,

** - категория надежности электроснабжения 2-3,

Для остального электрооборудования категория надежности электроснабжения 1-3

Таблица 14

Категории сельскохозяйственных потребителей по надежности электроснабжения

Категория	Объекты
1	2
1	<p>1. Животноводческие комплексы и фермы: по производству молока на 400 и более коров; по выращиванию и откорму молодняка КРС на 5 тыс. и более голов в год; по выращиванию нетелей на 3 тыс. и более скотомест; площадки по откорму КРС на 5 тыс. голов и более; комплексы по выращиванию и откорму 12 тыс. и более свиней в год.</p> <p>2. Птицефабрики. по производству яиц с содержанием 100 тыс. и более кур-несушек; мясного направления по выращиванию 1 млн. и более бройлеров в год; хозяйства по выращиванию племенного стада кур на 25 тыс. голов и более, а также гусей, уток, индеек 10 тыс. голов в год и более.</p>
2	<p>1. Животноводческие и птицеводческие фермы с меньшей производственной мощностью, чем указано ранее для потребителей первой категории.</p> <p>2. Тепличные комбинаты и рассадные комплексы.</p> <p>3. Кормоприготовительные заводы и отдельные цехи примеханизированном приготовлении и раздаче кормов.</p> <p>4. Картофелехранилища емкостью более 500 т с холодоснабжением и активной вентиляцией.</p> <p>5. Холодильники для хранения фруктов, емкостью более 600 т.</p> <p>6. Инкубационные цехи рыбоводческих хозяйств и ферм.</p>

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

В данной работе был произведен расчет годовой производственной программы ЭТС для хозяйства, состоящего из следующих объектов: овчарня на 1000 маток, кормоцех на 50 тон в смену, свиноводник откормочник на 1200 мест, кормоцех для молодняка КРС.

Произведен расчет объема работ по обслуживанию электрооборудования, который составил 274,3- УЕЭ.

Общий годовой объем работ для хозяйства в физических ремонтах составил ТО-470; ТР-45; ЗС-34 и КР-4,4. А количество условных ремонтов в год составит: ТО-21,9; по ТР-303 и КР-25,1.

Проведен расчет труда на техническое обслуживание. Затраты труда на проведение оперативного обслуживания составили: ТО-9955,46; ТР-1453,5чел.-ч; КР-305,66.

Численность персонала ЭТС хозяйства составляет 8 человек. Специализированная форма ЭТС облегчают концентрацию усилий на наиболее важных в данный момент участках, оправданы при дефиците тех или иных ресурсов. Кроме того они позволяют более полно и интенсивно использовать ремонтно - обслуживающую базу.

Исходя из удаленности и количества электрооборудования на объекте была определена комплексная форма обслуживания и функциональная структура ЭТС.

В ходе выполнения курсового проекта были определены её форма и структура. Расчёты показали, что наиболее эффективной в данных условиях является функциональная структура электротехнической службы с специализированной формой организации.

Составлен квартальный график ТО и годовой график ТР электрооборудования хозяйства.

Обоснована технологическая схема ремонта электрооборудования и выбрано технологическое оборудование.

Выбран тип ремонтно-обслуживающей базы.

Произведен расчет резервного фонда электрооборудования.

Рекомендуемая литература

1. Ерошенко, Г.П. Эксплуатация электрооборудования [Текст] / Г.П. Ерошенко, А.П. Коломиец, Н.П. Кондратьева и др. - М.: КолосС, 2008. - 344с.: ил.
2. Ерошенко, Г.П. Курсовое и дипломное проектирование по эксплуатации электрооборудования [Текст] / Г.П. Ерошенко, А.А. Пястолов. - М.: Агропромиздат, 1988. - 160с.: ил.
3. Система планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования сельскохозяйственных предприятий (ППРЭсх) [Текст]. – М.: Агропромиздат, 1987. – 191 с.
4. Таранов, М.А. Курсовое проектирование по эксплуатации электрооборудования: учебное пособие [Текст] / М.А. Таранов, В.Я. Хорольский, В.Г. Жданов, Ю.А. Медведько. - Волгоград, АЧГАА 2004. - 61с.
5. Шмигель, В.В. Методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Эксплуатация электрооборудования» [Текст] / В.В. Шмигель. – Ярославль: ФГБОУ ВПО «Ярославская ГСХА», 2013. – 126 с.

Пример оформления титульного листа

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования**

«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»

кафедра «Электрификация и автоматизация АПК»

Курсовой проект

по дисциплине: «Эксплуатация электрооборудования»

Тема: Расчет годовой производственной программы ЭТС для хозяйства, состоящего из следующих объектов: свиноводник откормочник на 1500 мест, овчарня на 300 баранов, мастерская РТБ на 40 тракторов, теплица площадью 1000м².

Выполнил:

Студент __ курса

Группы __

направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия»

профиль «Электрооборудование и электротехнологии»

личный номер _____

(номер зачетной книжки)

(фамилия, имя, отчество студента полностью)

К защите допущен _____ / _____ /
(подпись) (инициалы, фамилия)

_____ / _____ /
(подпись) (инициалы, фамилия)

_____ / _____ /
(подпись) (инициалы, фамилия)

Оценка _____ / _____ /
(цифрой и прописью) (подпись) (инициалы, фамилия)

Самара 20__

Пример оформления задания

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Самарская государственная сельскохозяйственная академия»**

Кафедра «Электрификация и автоматизация АПК»

**ЗАДАНИЕ
на курсовой проект по дисциплине
«Эксплуатация электрооборудования»**

Студенту _____
(Фамилия, Имя, Отчество, полностью)

Тема: _____

Исходные данные на курсовой проект

Задание выдано «__» _____ 20__ г.

Руководитель _____
(подпись) (расшифровка подписи)

Пример оформления реферата

РЕФЕРАТ

Работа представлена пояснительной запиской и графической частью на одном листе формата А1. Пояснительная записка содержит 40 страниц машинописного текста, включает в себя 3 таблицы, 5 наименований использованного источника.

Ключевые слова: ЭКСПЛУАТАЦИЯ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ, ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКАЯ СЛУЖБА.

Сокращения, используемые в тексте:

ЭТС – электротехническая служба;

УЕЭ – условные единицы электрооборудования;

ТО – техническое обслуживание;

ТР – текущий ремонт;

ЗС – замена смазки;

КР – капитальный ремонт;

РОБ – ремонтно-обслуживающая база.

В работе представлен расчет объема работ по техническому обслуживанию электрооборудования, расчет затрат труда при эксплуатации электрооборудования, выбор формы обслуживания, структуры электротехнической службы, ремонтно-обслуживающей базы ЭТС, обоснование технологической схемы ремонта электрооборудования и выбор технологического оборудования, расчет резервного фонда электрооборудования.

Пример оформления оглавления

ОГЛАВЛЕНИЕ

	стр.
Задание на курсовой проект	2
Реферат	3
Оглавление	4
Введение	5
1 Расчет объема работ по техническому обслуживанию электрооборудования	6
2 Расчет затрат труда на техническое обслуживание	
3 Расчет численности персонала ЭТС и распределение его подразделениями	
4 Выбор формы и структуры ЭТС	
5 Планирование работ ЭТС	
6 Выбор ремонтно-обслуживающей базы ЭТС	
7 Обоснование технологической схемы ремонта электро- оборудования и выбор технологического оборудования	
8 Расчет резервного фонда электрооборудования	
Выводы и предложения	
Список использованной литературы и источников	
Приложения	

Условное обозначение среды в зависимости от места установки
электрооборудования

Место установки электрооборудования	Условное обозначение среды	Примерный перечень помещений
Чистые сухие помещения с нормальной средой: относительная влажность помещения не превышает 60%; температура помещения не превышает	1	Канторы, клубы, подсобные помещения, отопляемые склады, механические мастерские и др.
Пыльные помещения: по условиям производства в воздухе содержится технологическая пыль	2	Цеха по приготовлению дробленых кормов, деревообрабатывающие цеха, зерноочистительные пункты и др.
Влажные помещения: относительная влажность выше 60%, но не превышает 75%. Сырые помещения и открытый воздух: относительная влажность превышает 78%	3	Залы столовых, отопляемые подвалы и овощехранилища, доильные и молочные залы, кормокухни, водокачки, неотапливаемые склады и др.
Особо сырые помещения с химически активной средой: относительная влажность близка к 100%, длительное присутствие паров аммиака и др. газов в невзрывоопасных, но разъедающих изоляцию и токоведущие части ЭО. кон-	4	Коровники, телятники, свинарники и другие животноводческие помещения при отсутствии в них установок по созданию микроклимата

Приложение 6

Часовая и месячная загрузка электрооборудования

№ п/п	Тип электрооборудования	Число часов работы в сутки	Количество месяцев работы эл. оборудования в году
1	Шкаф силовой	24	12
2	Щит осветительный на 6 групп	24	12
3	Пускатель магнитный до 25 А	6	12
4	Автоматический выключатель до 50 А	6	12
5	Пакетный переключатель	6	12
6	Водонагреватель ВЭТ-400	12	12
7	Сварочный трансформатор, 300 А	4	12
8	Конден.установка, 50 кВАр	4	12
9	Электрические печи	6	12
10	Электрокалорифер, 40 кВт	6	6
11	Светильники с лампами накаливания	8	12
12	Светильники с люминисцентными лампами	24	12
13	Облучатели	6	12
14	Провод АПВ 2,5 мм ² , м	24	12
15	Кабель АВРГ 4×2,5мм ² , м	24	12
16	Кабель АКВРГ 4÷20×2,5 мм ² , м	24	12
17	Погружной эл.дв.	6	12
18	Регулятор температуры	12	12
19	Дифманометр	12	12
20	Реле электромагнитное	12	12

Приложение 7

Коэффициент сезонности работы электрооборудования

Количество месяцев работы эл. оборудования в году	1	2	3	4	5	6
Коэффициент сезонности	0,08	0,17	0,25	0,33	0,42	0,50
Количество месяцев работы эл. оборудования в году	7	8	9	10	11	12
Коэффициент сезонности	0,58	0,66	0,75	0,83	0,92	1,00

Расчетная таблица с картой учета электрооборудования

Наименование и характеристика оборудования	Единица измерения	Количество	Среды	Число часов работы в сутки	Коэффициент сезонности	Объем работ в условных единицах электрооборудования (УЕЭ)		Годовое количество физ. ремонтов на единицу измерения по нормам, шт.				Коэффициент перевода физических ремонтов в условные				Количество условных ремонтов в год			
						Един.	Общ.	ТО	ТР	ЗС	КР	ТО	ТР	ЗС	КР	ТО	ТР	ЗС	КР
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Бригада 1																			
Свинарник откормочник на 1500 мест																			
Шкаф силовой	Шт.	5		24	1	0	0	37	3	2	0,33	2,00	2,08	0	0	370	31,2	0	0
Щит осветительный на 6 групп	Шт.	5		24	1	0	0	4	0	0	0	1,20	0	0	0	24	0	0	0
Пускатель магнитный до 25 А	Шт.	4		6	1	0	0	16	2	1	0,14	0,50	0,29	0,5	0,37	32	2,32	2	0
Автоматический выкл. до 50 А	Шт.	39		6	1	0	0	16	2	1	0,14	0,5	0,42	0,5	0	312	32,7	19,5	0
Пакетный переключатель	Шт.	28		6	1	0	0	5	1	1	0,11	0,30	0,31	0,3	0	42	8,68	8,4	0
Светильники, лампы накаливания	Шт.	31		8	1	0,14	4,34	4	0	0	0	0,052	0	0	0	6,45	0	0	0
Провод АПВ 2,5	М.	2907		24	1	0	0	4	0	0	0	1,2	0	0	0	139,53	0	0	0
И т.д.																			
Всего																			

Расчет затрат труда

Наименование и характеристика оборудования	Количество условных ремонтов в год				Затраты труда на проведение видов работ, чел.-ч.			
	ТО	ТР	ЗС	КР	ТО	ТР	ЗС	КР
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Свинарник откормочник на 1500 мест								
Шкаф силовой	370	31,2	0	0	185	149,76	0	0
Щит осветительный на 6 групп	24	0	0	0	12	0	0	0
Пускатель магнитный до 25 А	32	2,32	2	0	16	11,1	0,5	0
Автоматический выкл. до 50 А	312	32,76	19,5	0	156	157,2	4,87	0
Пакетный переключатель	42	8,68	8,4	0	21	41,6	2,1	0
Светильники, лампы накаливания	64,48	0	0	0	32,24	0	0	0
Светильники, с люминисцентными лампами	212,48	0	0	0	106,24	0	0	0
Провод АПВ 2,5мм ²	139,53	0	0	0	69,76	0	0	0
Кабель АВРГ 4х2,5мм ²	39,63	0	0	0	19,81	0	0	0
Кабель АКВРГ 4х20х2,5мм ²	19,44	0	0	0	9,72	0	0	0
Регулятор температуры	211,2	19,2	0	0	105,6	92,16	0	0
Реле электромагнитное	205,92	19,44	0	0	102,96	93,3	0	0
..... и т.д.								
Всего								

Приложение 10

Должности руководителей ЭТС

Должность руководителя ЭТС	Нормативы для введения должности
1. Главный энергетик	1 на хозяйство, имеющее электроустановок не более чем 1500 УЕЭ и потребляющее более 1,5 млн. кВт-ч эл. энергии на производственные цели
2. Старший инженер-энергетик на правах главного	1 на хозяйство, имеющее электроустановок от 1001 до 1500 УЕЭ и потребляющее более 1,0 млн. кВт-ч эл. энергии на производственные цели
3. Старший инженер-энергетик	1 на хозяйство, имеющее электроустановок от 500 до 1000 УЕЭ и потребляющее менее 1,0 млн. кВт-ч эл. энергии на производственные цели
4. Инженер-электрик	1 на хозяйство, имеющее электроустановок от 251 до 500 УЕЭ и потребляющее менее 0,5 млн. кВт-ч эл. энергии на производственные цели
5. Старший техник-электрик	1 на хозяйство, имеющее электроустановок от 101 до 250 УЕЭ и потребляющее менее 0,5 млн. кВт-ч эл. энергии на производственные цели

Приложение 11

Нормативы для определения количества ИТР

Должность ИТР	Нормативы для введения должности
1. Инженер-электрик	1 должность на каждые 1100 УЕЭ
2. Старший техник-электрик	1 должность на каждые 650 УЕЭ

Приложение 12

Рекомендуемая численность ИТР ЭТС

Трудоемкость обслуживания в УЕЭ	Инженерно-технические работники, чел.			
	Всего	Ведущие инженеры	Инженеры	Техники
До 750	1	-	-	1
751...1250	1	-	1	-
1251...1750	2	-	1	1
1751...2500	2	1	1	-
2501...3250	3	1	1	1
3251...3500	3	1	2	-
3501... 4500	4	1	2	1
4501...5000	4	2	2	-
5001... 6000	5	2	2	1

Приложение 13

Рекомендуемая форма ЭТС

№	Объем работ в УЕЭ	Форма обслуживания
1	менее 300	Комплексная
2	от 300 до 800	Специализированная
3	свыше 800	Хозяйственная

Приложение 14

Таблица условных единиц определения объема работ выполняемых электромонтерами в хозяйствах

Наименование электрооборудования	Переводной коэффициент
1	2
1. Линии электропередачи воздушные (на 1 км): до 1 кВ свыше 1 кВ	3,93 3,0
2. Кабельные линии (на 1 км) до 1 кВ свыше 1 кВ	1,29 1,9
3. Электростанции дизельные (на 1 агрегат) менее 100 кВт 100...300 кВт свыше 300 кВт (для агрегатов в холодном резерве берется 0,15 от переводного коэффициента)	10,0 20,0 30,0
4. Трансформаторные подстанции (на 1 подстанцию) открытые закрытые с 1 трансформатором закрытые с 2 трансформаторами	4 2,2 2,5 3,5
5. Электропривод с асинхронным электродвигателем 5.1. В сухих и влажных помещениях до 1 кВт 1,1...10 кВт 10,1...40 кВт свыше 40 кВт	0,44 0,61 0,72 0,92
5.2. В сырых и пыльных помещениях до 1 кВт 1,1...10 кВт 10,1...40 кВт свыше 40 кВт	0,67 0,92 1,13 1,38
5.3. В особо сырых, с агрессивной средой до 1 кВт 1,1...10 кВт 10,1...40 кВт свыше 40 кВт	0,88 1,28 1,55 1,8
5.4. В открытых установках до 1 кВт 1,1...10 кВт 10,1...40 кВт свыше 40 кВт	1,07 1,52 1,84 2,24
Примечание. Указанные коэффициенты берутся, если двигатель работает 6...10 ч в сутки, если работает менее 6 ч, УЕЭ умножается на 0,85, если более 10 ч – на коэффициент 1,2. В УЕЭ включены – электропроводка, аппаратура управления и защиты	

Продолжение приложения 14

6. Электротермические установки (на 1 установку)	
6.1. Электроводонагреватели водогрейные: до 100 кВт	3,22
101...160 кВт	4,12
свыше 160 кВт	5,52
6.2. Электродные паровые котлы: до 160 кВт	5,54
свыше 160 кВт	6,23
6.3. Электронагреватели с ТЭН: до 200 л	1,09
201...400 л	1,66
401...800 л	2,64
свыше 800 л	3,49
6.4. Электронагреватели бытовые (6...100 л)	0,98
6.5. Электроплиты “Томь”, “Лысьва”, на плиту	0,25
6.6. Электроплиты стационарные других типов (на 1 кВт мощности)	0,05
6.7. Электрокалориферы (на 1 установку): до 40 кВт	3,16
41...60 кВт	3,38
свыше 60 кВт	3,78
6.8. Сушильные шкафы (на 1 установку)	0,53
6.9. Электрообогреваемые коврики (на 1 шт.)	0,15
6.10. Электрообогрев полов (на 100 м2 помещ.)	0,73
6.11. Электрообогрев почвы (на 100 м2 парника или теплицы)	0,8
7. Сварочные установки (на 1 установку)	
генераторы сварочные до 300 А	2,88
свыше 300 А	3,26
трансформаторы сварочные 300 А	0,99
свыше 300 А	1,24
преобразователи сварочные до 300 А	1,99
свыше 300 А	2,41
8. Выпрямители зарядные (на 1 установку)	
со стабилизацией режима	1,8
без стабилизации режима	0,53
9. Конденсаторные батареи для компенсации реактивной мощности (на 1 установку)	1,84
10. Электроосветительные установки (на 10 светильников)	
10.1. В сухих и влажных помещениях	
с 1...2 лампами накаливания	0,65
с 3...6 лампами накаливания	0,99
с 1...2 люминесцентными лампами	0,86
с 3...6 люминесцентными лампами	1,41
10.2. В сырых и пыльных помещениях	
с лампами накаливания	0,91
с люминесцентными лампами	1,74
с дуговыми лампами высокого давления	1,03

Продолжение приложения 14

10.3. В особо сырых, с химически активной средой с лампами накаливания с люминесцентными лампами с дуговыми лампами высокого давления	1,4 2,07 1,61
10.4. Наружное освещение с лампами накаливания с дуговыми лампами	1,35 1,56
Примечание. В УЕЭ включены – электропроводка, аппаратура управления и защиты.	
11. Облучатели (на 10 облучателей) инфракрасного излучения ультрафиолетового излучения комбинированные	0,97 1,65 2,43
12. Щиты автоматики, имеющие более 5 реле (контакторов) и более 10 транзисторов (тиристоров) на 1 щит реле, контакторы транзисторы, тиристоры микросхемы электронные лампы потенциометры, мосты	0,04 0,01 0,02 0,02 1,1
Примечание. Щиты управления, содержащие до 5 реле (контакторов) и до 10 транзисторов (тиристоров) учтены в условных единицах электроприемника, для которого они предназначены.	
13. Электроизгороди (на 1 установку)	0,5
14. Ящики учета электроэнергии (на 1 ящик)	0,3
15. Электропроводки жилых домов, на 1 квартиру на частный дом	0,1 0,15
Примечание. В число УЕЭ включены вводные щиты, общедомовая и квартирная электропроводка	

Приложение 15

Коэффициенты пересчета количества физических технических обслуживаний (ТО), текущих ремонтов (ТР) и капитальных ремонтов (КР) электрооборудования в условные ремонты

№	Наименование электротехнического оборудования	Коэффициент пересчета		
		для ТО	для ТР	для КР
1	2	3	4	5
1	Агрегаты зарядные с аппаратурой управления	1,62	1,64	2,08
2	Аппаратура сигнальная, на 10 единиц	0,4	-	-

Продолжение приложения 15

3	Арматура электросветильная, на 10 светильников			
	- с одной лампой накаливания	0,52	-	-
	- с ртутными лампами высокого давления	1,04	-	-
	- с люминесцентными лампами, до 2 штук	0,62	-	-
	- с люминесцентными лампами, до 4 штук и более	0,83	-	-
4	Выключатели конечные	0,44	0,27	-
5	Выключатели автоматические с током, А:			
	до 50	0,5	0,42	-
	200	0,5	0,42	-
	400	0,6	0,62	-
	600	0,8	0,83	0,96
6	Генераторы переменного тока мощностью, кВа			
	до 10	2,2	2,38	4,24
	15	2,4	2,83	4,24
	30	2,8	3,73	5,48
	60	3,2	4,25	7,16
	100	3,6	5,33	8,88
	150	4,0	6,71	9,54
7	Генераторы многоамперные низковольтные постоянного тока, с током, А:			
	до 300	3,0	1,46	3,2
	500	3,4	2,08	4,0
	1000	4,0	2,92	5,2
8	Заземляющие устройства	0,48	-	4,0
9	Котлы электродные паровые регулируемые мощностью, кВт			
	до 160	5,2	4,84	5,4
	250	6,8	6,06	6,4
10	Ключи универсальные и переключатели с числом секций:			
	до 4	0,08	0,08	-
	8	0,10	0,10	-
	12	0,16	0,17	-
	16	0,20	0,23	0,22
11	Кнопки управления (на 10 шт) с числом кнопок:			
	2	0,04	0,04	-
	3	0,06	0,06	-
	4	0,10	0,10	-
	9	0,20	0,21	-

Продолжение приложения 15

12	Контакты с током, А: до 160 400 630	0,50 0,70 0,90	0,52 0,73 0,94	- - 1,12
13	Конденсаторные установки, кВАр: до 80 100 250 330 400 500	2,00 2,80 4,00 4,80 5,60 7,00	2,08 2,92 4,17 5,00 5,83 7,29	2,40 3,20 - - - -
14	Контрольный кабель сечением 1,5 мм ² , проложенный в земле, на 1000м, с числом жил: 4...7 10...19 27...37	2,40 3,00 3,60	- - -	- - -
15	Контрольный кабель сечением 1,5 мм ² , проложенный в непроходных каналах и в трубах, на 1000м, с числом жил: 4...7 10...19 27...37	3,60 4,40 5,40	- - -	- - -
16	Контрольный кабель сечением 1,5 мм ² , проложенный по кирпичным и бетонным основанием, на 1000м, с числом жил: 4...7 10...19 27...37	3,00 3,60 4,20	- - -	4,00 4,00 5,60
17	Линии воздушные до 1000 В на деревян- ных опорах, на 1000 м однолинейного провода сечением, мм ² : до 35 50 70 95 и более	1,80 2,40 3,00 3,60	1,88 2,50 3,13 3,75	2,40 3,20 4,00 4,80
18	Линии воздушные до 1000 В на металли- ческих и железобетонных опорах, на 1000 м однолинейного провода сечением, мм ² : до 35 50 70 95 и более	1,20 1,80 2,40 3,00	1,25 1,88 2,50 3,13	1,60 2,40 3,20 4,00

Продолжение приложения 15

19	Линии кабельные до 10 кВ, проложенные в земле, на 1000 м линии, сечением, мм ² : до 35 70 95 и более	3,00	-	4,00
		4,60	-	6,00
		5,40	-	7,20
20	Линии кабельные до 10 кВ, проложенные по кирпичным и бетонным основаниям, на 1000 м линии, сечением, мм ² : до 35 70 95 и более	3,60	-	4,80
		6,00	-	7,60
		7,00	-	8,80
21	Линии кабельные до 10 кВ, расположенные в непроходных каналах и трубах, на 1000 м линии, сечением, мм ² : до 35 70 95 и более	4,80	-	6,40
		7,20	-	9,60
		9,00	-	11,60
22	Микропереключатели и тумблеры	0,08	-	-
23	Муфты электромагнитные с передаваемым моментом, кГс·м: 100 160	0,40	0,42	0,48
		0,60	0,62	0,64
24	Муфты электромагнитные для дистанционного управления с моментом сцепления, кГс·м: 1,6...6,3 10,0...25,0 40...160	0,40	0,42	0,48
		0,42	0,43	0,56
		0,54	0,56	0,72
25	Пакетные выключатели на ток, А: до 100 250 400	0,30	0,31	-
		0,40	0,42	-
		0,60	0,63	-
26	Предохранители	0,26	0,13	-
27	Проводки в сельских домах, включая обслуживание вводного устройства, на 1 дом (присоединение)	2,72	-	-
28	Приборы электроизмерительные (на один прибор): показывающие самопишущие	0,30	0,31	0,36
		0,66	0,69	0,96

29	Приборы для измерения и регулирования давления и разряжения:			
	- манометры, мановакуумметры, вакуумметры показывающие	0,20	0,21	0,28
	- манометры, мановакуумметры, выкуумметры с электрической дистанционной передачей	0,20	0,21	0,28
	- тягометры, напорометры и тягонапорометры	0,50	0,52	0,32
	- реле давления	0,32	0,33	-
	- регуляторы давления и сигнализаторы	0,50	0,52	0,29
- вакуумметры ионизационно-термопарные	0,30	0,31	0,34	
30	Приборы для измерения и регулирования температуры:			
	- термопары платино-платинородиевые, хромелькопелевые и хромель-алюминиевые	-	-	0,26
	- термометры менометрические показывающие ртутные, газовые и жидкостные	0,24	0,25	0,24
	- термометры менометрические самопишущие ртутные, газовые и жидкостные	0,60	0,63	0,43
	- термометры менометрические показывающие пневматические, газовые и жидкостные	0,40	0,42	0,38
	- термометры менометрические бесшкальные, пневматические, газовые и жидкостные	0,30	0,31	0,34
	- пирометры излучения	0,60	0,63	0,44
31	Приборы для измерения и регулирования расхода и количества:			
	- счетчики газовые ротационные	0,50	0,52	0,40
	- водомеры	0,30	0,31	0,32
32	Пускатели магнитные для электродвигателей мощностью, кВт:			
	до 17	0,40	0,25	-
	30	0,50	0,29	0,37
	40	0,60	0,33	0,47
	55	0,60	0,62	0,80
	75	0,80	0,83	0,96

33	Регуляторы автоматические прямого действия:			
	- регуляторы температуры РПД	0,40	0,42	0,32
	-регуляторы давления диаметром, мм:			
	до 50	0,36	0,38	0,36
	100...150	0,50	0,52	0,48
	200...300	0,60	0,63	0,60
	- регуляторы давления газа диаметром, мм: до 50	0,40	0,42	0,64
	70...100	0,60	0,63	0,96
	- регуляторы давления мазута	0,24	0,25	0,16
	- регуляторы уровня воды в баках	0,50	0,52	0,64
- регуляторы питания для поддержания уровня воды в баках	1,2	1,25	1,60	
34	Регуляторы электрические:			
	- реле температурное типа ТР-200	0,20	0,21	-
	- терморегуляторы дистанционные	0,20	0,21	0,20
	- регуляторы для регулирования подачи топлива, воздуха	0,60	0,63	0,64
- регуляторы температуры	0,80	0,80	0,76	
35	Электронные регулирующие устройства	0,80	0,83	1,12
36	Электронные следящие приборы	0,60	0,63	0,60
37	Следящие механизмы, работающие в комплексе с регулятором	0,90	0,94	0,68
38	Реле и датчики:			
	- реле давления сигнальное	0,60	0,63	-
	- реле давления дифференциальное	1,8	1,88	-
	- реле потока газа и жидкости	0,60	0,63	-
- реле импульсной сигнализации	1,6	1,67	-	
39	Электрозapальник	0,40	0,42	-
40	Датчик реле температур	0,40	0,42	-
41	Датчик реле давления	0,80	0,83	-
42	Датчик реле напора и тяги	0,80	0,83	-
43	Реле управления и защиты:			
	- промежуточное реле	0,20	0,21	-
	- реле электромагнитные, напряжения и тока	0,26	0,27	-
	- реле времени электромеханические	0,30	0,31	-
	- реле контроля скорости	0,30	0,31	0,36
	- реле времени программное	2,00	2,08	2,40
	- реле программные	0,30	0,31	-
	- реле торможения	0,40	0,41	-
- фотореле	0,30	0,31	-	

44	Реостаты с током, А: до 40 100 200	1,20 1,60 2,00	1,25 1,67 2,08	1,44 1,76 2,40
45	Рубильники с центральной рукояткой, трехфазные, на ток, А: до 400 600 800 1000 1500	0,16 0,18 0,20 0,28 0,40	0,17 0,19 0,21 0,29 0,42	- 0,20 0,24 0,32 0,48
46	Распределительные устройства подстанций (без учета работ на обслуживание и ремонт силового трансформатора) для трансформаторов до 10 кВа: - внутренней установки мощностью, кВа: до 250 630 1000 - наружной установки мощностью, кВа: до 250-400 630-1000	6,00 6,00 11,00 9,00 11,00	8,34 10,40 18,80 11,45 25,00	8,80 12,00 16,00 11,20 24,00
47	Силовые трансформаторы, трехфазные двухобмоточные, масляные до 20 кВ, мощностью, кВа: до 63 100 160 250 400 630 1000	4,00 4,00 5,00 6,00 7,00 8,00 9,00	5,21 6,26 7,10 8,30 9,27 10,40 12,30	10,40 12,00 13,00 15,20 17,60 20,00 24,00
48	Сварочные трансформаторы мощностью до кВт: 10 24 34	0,40 0,60 0,80	1,25 1,85 2,50	1,60 2,40 3,20
49	Сварочные преобразователи с аппаратурой управления на номинальный сварочный ток, А: 120 300 500 1000	4,80 5,60 8,00 12,00	5,00 5,83 8,34 12,50	5,60 6,40 9,61 14,40

50	Трансформаторы для местного освещения, выпрямителей, цепей управления и пр., мощностью Вт:			
	до 250	0,30	0,31	0,40
	630	0,34	0,35	0,48
	1000	0,50	0,52	0,64
	1600	0,60	0,63	0,80
	2500	1,00	1,04	1,20
51	Трансформаторы тока однопредельные класса 0,2	0,32	0,33	0,40
52	Трансформаторы тока с несколькими пределами измерений класса 0,2	0,54	0,56	0,64
53	Трансформаторы напряжения однопредельные класса 0,2	0,40	0,42	0,48
54	Трансформаторы напряжения с несколькими пределами измерений класса 0,2	0,60	0,63	0,72
55	Устройство для электрообогрева полов в животноводческих, помещений, парниках и теплицах на 50 м ² площади обогреваемого пола (без аппаратуры управления)	0,9	-	-
56	Установки электрокалориферные мощностью, кВт:			
	до 25	1,03	1,06	1,60
	40	1,52	1,35	1,80
	60	1,52	1,68	2,00
	100	1,94	2,14	2,70
57	Щитки осветительные распределительные с числом автоматических выключателей, шт.:			
	до 2-3	0,70	-	-
	4	1,00	-	-
	8	1,20	-	-
	16	1,60	-	-

58	Сеть электросиловая на 100 м одного провода, проложенного: - в трубах при сечении провода, мм ² :				
	до 6	0,40	-	-	
	15	0,50	-	-	
	35	0,70	-	-	
	70	0,84	-	-	
	более 70	1,00	-	-	
	- по кирпичным и бетонным основаниям при сечении провода, мм ² :				
	до 6	1,00	-	-	
	15	1,60	-	-	
	35	2,00	-	-	
	70	2,40	-	-	
	более 70	3,00	-	-	
	59	Сеть осветительная из кабеля, провода, шнура, проложенного по кирпичным и бетонным основаниям на 100 м провода с количеством и сечением жил, мм ² :			
		2х1,5-4	1,20	-	-
3х1,5-4		1,20	-	-	
60	То же при скрытой проводке с количеством и сечением жил, мм ² :				
	2х1,5-4	0,50	-	-	
	3х1,5-4	1,20	-	-	
61	Сеть заземления (заземляющие магистрали) на 100 м.	3,00	-	-	
62	Стабилизаторы напряжения мощностью, Вт:				
	160	0,50	0,52	0,64	
	280	0,60	0,63	0,88	
	500	0,80	0,83	1,28	
	900	1,40	1,46	1,60	
63	Счетчики электрической энергии, однофазные	0,20	0,21	0,22	
64	Счетчики трехфазные для учета активной и реактивной энергии (не входящие в комплект подстанций, сборок и т.д.):				
	- для трехпроводной системы - для четырехпроводной системы	0,26 0,28	0,27 0,29	0,27 0,30	

65	Шкафы силовые, распределительные пункты, силовые сборки с количеством установочных трехфазных автоматических выключателей (групп), шт.: до 2-3 4 6 8 10	1,20 1,60 2,00 2,80 3,20	1,25 1,67 2,08 2,92 3,33	- - - - -
66	Шкафы сушильные мощностью, кВт: 2 5 10	0,60 1,00 1,40	0,62 1,04 1,45	0,80 1,20 1,60
67	Штепсельные розетки	0,20	0,21	-
68	Электродвигатели асинхронные с короткозамкнутым ротором 1500 об/мин, мощностью, кВт: до 1,0 1,1-3,0 3,1-5,5 5,6-10,0 10,1-22,0 22,1-40,0 40,1-55,0 55,1-75,0 75,1-100,0 100,1-125 126,0-160 160-200 201-250 251-320 321-400	0,80 0,80 1,00 1,20 1,40 1,40 2,40 3,0 3,60 4,40 5,40 6,0 6,60 7,20 8,00	0,81 0,90 1,00 1,14 1,25 1,55 2,50 3,11 3,75 4,58 5,62 6,25 6,88 7,50 8,34	0,78 0,80 1,00 1,43 2,29 3,75 4,40 5,51 6,78 8,80 10,40 11,20 12,40 14,00 15,60
69	Электромагниты тянущие и толкающие	0,60	0,63	0,64
70	Электромагниты грузоподъемные, тс: 6 16 20	8,40 10,0 15,0	8,75 10,42 15,62	9,6 15,20 20,0
71	Электромагниты тормозные переменного тока с тяговым усилием, кгс: 35 70 115 140	0,80 1,2 1,6 2,20	0,83 1,25 1,67 2,29	0,96 1,36 2,00 2,40

72	Электropечи сопротивления (камерные) мощностью, кВт:			
	до 15	1,4	1,46	1,60
	30	2,00	2,08	2,40
	45	2,80	2,92	3,20
	60	3,40	3,55	4,00
	75	4,00	4,18	4,80
	90	4,80	5,00	5,60
	100	5,60	5,83	6,40
110	6,40	6,67	7,20	
73	Электроводонагреватели – емкостные объемом, литров:			
	до 60	0,60	0,57	0,78
	100	0,64	0,66	0,82
	200	0,70	1,33	0,91
	400	0,82	1,64	1,00
	600	1,00	2,18	1,29
	800	1,14	2,60	1,47
1600	1,60	3,90	2,07	
74	Электроводонагреватели – проточные производительностью литров в час:			
	до 350	0,80	0,75	1,03
	600	1,34	1,56	1,73
75	Электроводонагреватели – электродные, мощностью, кВт: до 25	2,75	1,58	3,50
	60	2,80	2,00	3,62
	100	3,00	2,25	3,88
	175	3,40	3,23	4,39
	200	4,26	4,04	5,51
76	Электровулканизаторы с аппаратурой управления	1,02	1,02	1,32
77	Электрические автоклавы с аппаратурой управления	2,28	2,29	2,95
78	Электростанции, используемые в качестве аварийного резерва и передвижные, мощностью, кВт: до 100	14,95	16,43	19,35
	300	29,90	32,66	38,70
	500	44,85	49,29	58,05

Примечание:

1. Вводятся следующие поправочные коэффициенты:

- для светильников, расположенных выше 4 м, - 1,2;
- для аппаратуры во взрывобезопасном исполнении - 1,6;
- для рубильников с боковой рукояткой - 1,2;
- для реверсивных магнитных пускателей – 1,8;

- для двухполюсных рубильников, включателей автоматических и пускателей магнитных – 0,75;
 - для осветительных щитков с пробочными предохранителями – 0,75;
 - для сетей, проложенных по деревянным основаниям – 0,75;
 - для сетей и кабельных линий, проложенных на высоте более 2,5 м – 1,1;
 - для контрольных кабелей сечением 2,5 мм² – 1,2; а сечением 4,0 мм² – 1,4;
 - для электродвигателей при частоте вращения, об/мин: 3000-0,8; 1000-1,1; 750-1,2; 600 -1,4; 500 и ниже -1,5;
 - для электродвигателей с фазным ротором, взрывозащищенных, крановых, погружных и многоскоростных – 1,3.
2. Коэффициенты перевода учитывают ставочные работы в резерве до 10% и прочие
- до 10%.

Приложение 16

Фрагмент квартального графика технического обслуживания

Объект, электрооборудование	Годовое кол-во ТО	Затраты труда на ТО, чел.-ч.	ВЫПОЛНЯЕМЫЕ РАБОТЫ																							
			ЯНВАРЬ																							
			1 НЕДЕЛЯ					2 НЕДЕЛЯ							3 НЕДЕЛЯ											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
Кормоцех на 400 голов КРС																										
Шкаф силовой	57	205			3,6	в	в					3,6		в	в				3,6		в	в				
Щит осветительный на 6 групп	4	2,4			0,6	в	в							в	в						в	в				
Пускатель магнитный до 25А	24	162				в	в							в	в			6,7			в	в				
Электрические печи	24	16,8				в	в							в	в			0,7			в	в				
Водонагреватель ВЭТ-400	34	139				в	в				4			в	в						в	в	4			
и др.																										
ВСЕГО																										

ВЫПОЛНЯЕМЫЕ РАБОТЫ																														
ЯНВАРЬ												ФЕВРАЛЬ																		
4 НЕДЕЛЯ						5 НЕДЕЛЯ						1 НЕДЕЛЯ						2 НЕДЕЛЯ						3 НЕДЕЛЯ						
22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
		3,6		в	в			3,6		в	в			3,6		в	в		3,6				в	в		3,6				
				в	в					в	в					в	в						в	в						
				в	в			6,7		в	в					в	в			6,7			в	в						
				в	в			0,7		в	в					в	в			0,7			в	в						
				в	в			4		в	в			4			в	в					в	в			4			

Окончание приложения 16

ВЫПОЛНЯЕМЫЕ РАБОТЫ																														
ФЕВРАЛЬ								МАРТ																						
4 НЕДЕЛЯ								1 НЕДЕЛЯ							2 НЕДЕЛЯ						3 НЕДЕЛЯ									
22	23	24	25	26	27	28	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
в	в		3,6				в	в	3,6					в	в	3,6					в	в	3,6					в	в	3,6
в	в						в	в						в	в							в	в					в	в	
в	в					6,7	в	в						в	в					6,7	в	в						в	в	
в	в					0,7	в	в						в	в					0,7	в	в						в	в	
в	в					4	в	в						в	в	4						в	в					4	в	в

ВЫПОЛНЯЕМЫЕ РАБОТЫ							
МАРТ							
4 НЕДЕЛЯ							
25	26	27	28	29	30	31	
87	88	89	90	91	92	93	
				в	в	3,6	
				в	в		
				в	в	6,7	
				в	в	1,5	
				в	в	0,7	
				в	в	4	

Годовой график текущих ремонтов (пример оформления графической части проекта)

Наименование и характеристика		Габариты и-бо поперечной размерной шп	Запчасти на ПР, шт-н	ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ																					
				1 КВАРТАЛ											2 КВАРТАЛ										
				ЯНУАРИЙ			ФЕВРАЛЬ				МАРТ				АПРЕЛЬ			МАЙ							
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22				
Время на 1000 тонн	7	802,3								14,72															
Корпусы на 50 тонн в 1 смену	15	365,2								12															
Запчасти по времени на 1000 тонн	11	405,4	12									12					120	64,55							
Корпусы для поковки КРС	15	500,54		36									36								120	50,11			
Число рабочих часов		14,53	12	36	0	0	0	0	0	14,72	12	0	0	12	36	0	0	0	120	64,55	0	0	120	50,11	
Число рабочих дней			4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	3	5	5	5	3	4	5	5	5	

Наименование и характеристика		Габариты и-бо поперечной размерной шп	Запчасти на ПР, шт-н	ВЫПОЛНЕНИЕ РАБОТ																									
				3 КВАРТАЛ											4 КВАРТАЛ														
				ИЮЛЬ			АВГУСТ				СЕНТЯБРЬ				ОКТЯБРЬ				НОЯБРЬ			ДЕКАБРЬ							
				23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52
0	44,6	120	69,1	0	52,31	0	0	0	0	0	14,72	12	12	36	0	0	0	0	50,11	120	120	64,55	14,72	12	0	120	44,6	0	69,1
5	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	5	5	5

Итого:		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000	
--------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--

Итого:		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000	
--------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--

Итого:		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000		10000	
--------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--	-------	--

КП.14.11-15

Годовой график текущих ремонтов

Составлен: / /

Проверен: / /

Исполнитель: / /

Объем работ по ТО и ТР электрооборудования

Электрические машины	Состав работ по техническому обслуживанию и текущему ремонту
1	2
<p>Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым и фазным ротором</p>	<p>Техническое обслуживание Очистить корпус электродвигателя от пыли и грязи, проверить исправность заземления, подтянуть болты крепления двигателя к фундаменту или рабочей машине, проверить степень нагрева и уровень вибрации корпуса, проверить соосность двигателя с рабочей машиной, надежность крепления шкива или звездочки на валу двигателя, проверить надежность контактных соединений, убедиться в отсутствии ненормальных шумов при работе двигателя, проверить состояние контактных колец и щеточного механизма у двигателей с фазным ротором, измерить сопротивление изоляции обмотки. При выявлении мелких дефектов необходимо их устранить.</p> <p>Текущий ремонт Очистить корпус электродвигателя от пыли и грязи, отделить двигатель от питающих проводов и заземления. У двигателей с фазным ротором отделить провода от пускового реостата. Снять двигатель с места установки и разобрать его. Прочистить обмотки, измерить сопротивление изоляции, при необходимости просушить обмотки. Проверить состояние контактных колец, при необходимости проточить и отшлифовать их. Отрегулировать щеточный механизм, при необходимости заменить щетки. Промыть подшипники, проверить их техническое состояние и при необходимости заменить. Отремонтировать или заменить поврежденные выводные провода обмотки и клеммную панель коробки выводов. Собрать электродвигатель, смазать подшипники, испытать двигатель на холостом ходу. При необходимости окрасить двигатель. Установить двигатель на рабочее место, отрегулировать его центровку с рабочей машиной и испытать его под нагрузкой.</p>
<p>Погружные электродвигатели</p>	<p>Техническое обслуживание Измерить сопротивление изоляции обмотки статора относительно заземленных частей электронасосной установки. Измерить ток электродвигателя амперметром или токоизмерительными клещами. Убедиться в отсутствии повышенной вибрации и посторонних звуков при работе электронасоса.</p>

	<p>Текущий ремонт Очистить корпус, разобрать электродвигатель; очистить и продефектовать детали и узлы, определить работоспособность изоляции обмотки статора; при необходимости заменить выводные провода; заменить поврежденную изоляцию мест соединений обмотки; заменить поврежденные или ослабленные пазовые клинья; установить или заменить датчик контроля технического состояния. Прошлифовать и отполировать втулки подшипников на роторе; заменить втулки подшипников в подшипниковых щитах; при необходимости шлифовать и отполировать рабочую поверхность пяты. Собрать электродвигатель. Провести послеремонтные испытания. Окрасить электродвигатель.</p>
<p>Автоматические выключатели, магнитные пускатели, контакторы, рубильники, универсальные переключатели, пакетные выключатели, предохранители</p>	<p>Техническое обслуживание Снять напряжение с обслуживаемого аппарата, очистить его от пыли, проверить надежность крепления, свободный ход подвижных частей, проверить степень затяжки винтовых присоединений и подтянуть ослабленные, осмотреть аппарат и убедиться в отсутствии повреждений в нем, снять дугогасительные камеры, осмотреть контакты, проверить плотность их прилегания, состояние пружин, одновременность включения, при необходимости отрегулировать одновременность включения контактов и очистить их от нагара, убедиться в отсутствии признаков перегрева контактов винтовых соединений и предохранителей. В щитах управления проверить исправность сигнальных ламп и их арматуры, запирающих приспособлений и уплотнений дверей. После выполнения этих работ подать напряжение и проверить действие аппаратуры.</p> <p>Текущий ремонт Демонтировать аппарат, проверить и подтянуть все крепления, частично разобрать аппарат и очистить от пыли и загрязнений, зачистить контакты от оплавлений и нагара, заменить неисправные детали, зачистить и окрасить оболочку, собрать аппарат, отрегулировать его узлы. Тепловые реле после ремонта настроить. Проверить аппарат в собранном виде на работоспособность, установить на свое место и опробовать в работе.</p>

Силовые электропроводки	<p>Техническое обслуживание Очистить электропроводку от пыли и грязи. Проверить состояние крепления электропроводки, устранить при необходимости провесы, проверить прочность крепления мест механической защиты проводки, проверить соответствие площади поперечного сечения проводки фактической токовой нагрузке, состояние маркировки. Проверить состояние заземления металлических защитных конструкций.</p> <p>Текущий ремонт Выполнить операции технического обслуживания. Заменить отдельные дефектные участки проводки, муфты, воронки и т.п. Проверить сопротивление изоляции мегаомметром, окрасить кронштейны и другие крепежные металлоконструкции.</p>
Осветительные электропроводки	<p>Техническое обслуживание Очистить электропроводку от пыли и грязи. Проверить состояние крепления проводки, закрепить при необходимости отдельные участки. Проверить состояние выключателей и розеток, осветительных коробок, замеченные дефекты устранить. Проверить состояние соединения проводов в ответвительных коробках. Места проводки с поврежденной изоляцией усилить наложением нескольких слоев изолянты. Проверить состояние заземления металлических защитных конструкций.</p> <p>Текущий ремонт Выполнить операции технического обслуживания. Заменить отдельные дефектные участки электропроводки, неисправные выключатели и розетки. Проверить сопротивление изоляции мегаомметром.</p>
Силовые сборки	<p>Техническое обслуживание Очистить силовую сборку от пыли и грязи. Проверить и при необходимости подтянуть контакты в местах соединения шин между собой, а также в местах присоединения кабелей и проводов. Проверить состояние контактов рубильников, предохранителей, контакторов и т. д. Проверить соответствие токов плавких вставок расчетным токам. Проверить состояние заземления корпуса сборки.</p> <p>Текущий ремонт. Выполнить операции технического обслуживания. Заменить отдельные дефектные шины, рубильники, контакторы и т. п. Проверить состояние изоляции токоведущих частей, заменить дефектные изоляторы или панели. Отремонтировать запирающие устройства и корпус сборки. Выполнить окрасочные работы, восстановить предупредительные надписи на сборках.</p>

Осветительные щитки	<p>Техническое обслуживание Очистить щиток от пыли и грязи. Проверить состояние контактов между шинами щитка, кабелями и проводами. Проверить состояние коммутационных аппаратов и предохранителей, соответствие токов их плавких вставок расчетным значениям, состояние заземления щитка.</p> <p>Текущий ремонт Выполнить операции технического обслуживания. Проверить состояние изоляционных деталей щитка, дефектные детали заменить. Заменить обгоревшие шины, коммутационные аппараты и предохранители. Окрасить кожух щитка, восстановить предупредительные надписи.</p>
Электроводонагреватели электрические	<p>Техническое обслуживание Очистить электроводонагреватель снаружи от пыли и грязи. Убедиться в отсутствии течи бака и трубопроводов. Демонтировать защитный кожух и проверить крепление контактов. Ослабленный крепеж подтянуть. Смонтировать защитный кожух. В электродных с изолированным от земли корпусом электродного проверить сопротивление изоляции между корпусом электроводонагревателя и контуром заземления в помещении. В электродных с заземленным корпусом электродного проверить исправность заземления. Включить электроводонагреватель в работу и проверить соответствие его параметров заданным значениям.</p> <p>Текущий ремонт. Очистить электроводонагреватель снаружи от пыли и грязи. Убедиться в отсутствии течи бака и трубопроводов. Разобрать электроводонагреватель. Очистить от накипи поверхность электродов, внутреннюю полость бака и трубопровода, промыть, очистить и протереть изоляторы и крепежные детали. Убедиться в отсутствии трещин и сколов на изоляторах. Дефектные элементы заменить. Измерить сопротивление изоляции их изоляционных деталей. Элементы с сопротивлением изоляции менее 0,6 МОм заменить. Проверить состояние прокладок. Изношенные прокладки заменить. Проверить работоспособность регуляторов температуры и предохранительного клапана. При обнаружении неисправности отрегулировать их или заменить. Смонтировать элементы электроводонагревателя. Проверить электрическое сопротивление изоляции сухого электроводонагревателя относительно корпуса. В электродных с изолированным от земли корпусом электродного проверить сопротивление изоляции между корпусом электроводонагревателя и контуром заземления в помещении.</p>

	<p>В электрокотельных с изолированным от земли корпусом электрокотла проверить сопротивление изоляции между корпусом электроводонагревателя и контуром заземления в помещении. В электрокотельных с заземленным корпусом электрокотла проверить исправность заземления. Заполнить электроводонагреватель водой, измерить удельное сопротивление воды и при необходимости провести водоподготовку. Включить водонагреватель в работу и проверить соответствие его параметров заданным значениям.</p>
Установки электрокалориферные	<p>Техническое обслуживание Очистить установку снаружи от грязи и пыли. Демонтировать боковые крышки и проверить надежность крепления контактов. Ослабленные контакты подтянуть. Смонтировать боковые крышки. Проверить исправность заземления. Включить установку и проверить соответствие ее параметров заданным значениям.</p> <p>Текущий ремонт Очистить установку от пыли и грязи. Разобрать ее. Очистить внутреннюю поверхность корпуса электрокалорифера от пыли и грязи, промыть и протереть крепежные детали, окрасить дефектные места. Проверить целостность нагревательных элементов. При обнаружении разрыва цепи заменить электронагреватель. Измерить сопротивление изоляции. При сопротивлении изоляции менее 1 МОм просушить электронагреватель, загерметизировать его выводные концы. Убедиться в отсутствии трещин и сколов на изоляторах, проверить состояние прокладок. Изношенные прокладки заменить. Проверить работоспособность регуляторов температуры. При обнаружении неисправности отрегулировать их или заменить. Смонтировать элементы установки. Проверить переходное сопротивление заземления. Включить установку в работу и проверить соответствие ее параметров заданным значениям.</p>