

621.3  
345

3558



Министерство образования  
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Электрические станции»

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

*Лабораторный практикум*

**Часть 1**

Минск 2009

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Электрические станции»

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Лабораторный практикум  
для студентов энергетических специальностей

В 3 частях

Часть I

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

М и н с к 2 0 0 9

УДК 621.311.2.002.5-83+621.311.4.002.5-83(076.5)

~~ББК 31.277 я 7~~

Э 50 Э45

Составители:

*В.Н. Мазуркевич, Ю.Г. Румянцев, Л.Н. Свита*

Рецензенты:

*И.В. Новаш, М.М. Олешкевич*

Э 50 Электрическая часть электрических станций и подстанций: лабораторный практикум для студентов энергетических специальностей: в 3 ч. / сост.: В.Н. Мазуркевич, Ю.Г. Румянцев, Л.Н.Свита. – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 1. – 131 с.

ISBN 978-985-525-105-8 (Ч.1).

Издание содержит руководства по выполнению девяти лабораторных работ.

Каждая работа включает в себя цель, краткие теоретические сведения, содержание работы, описание лабораторной установки, методические указания и порядок выполнения работы, требования к отчету, контрольные вопросы и перечень литературы.

УДК 621.311.2.002.5-83+621.311.4.002.5-83(076.5)  
ББК 31.277 я 7

ISBN 978-985-525-105-8 (Ч.1)  
ISBN 978-985-525-106-5

© БНТУ, 2009

## ОБОРУДОВАНИЕ И СХЕМЫ ПЕРВИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

**Цель работы:** ознакомление с назначением электрических аппаратов первичных цепей электростанций и подстанций и изучение принципов построения схем их соединений.

### Краткие теоретические сведения

Электростанция (ЭС) – это энергетические предприятия, на которых энергия природных ресурсов преобразуется в электрическую энергию. Непосредственным источником электрической энергии на ЭС являются трехфазные синхронные генераторы. От них энергия передается к потребителям по воздушным или кабельным линиям электропередачи (ЛЭП). Если потребители находятся на расстоянии 5–10 км, то электроэнергия может передаваться по ЛЭП на генераторном напряжении. С увеличением дальности передачи напряжение ЛЭП необходимо увеличить. Для этого на электростанциях устанавливаются силовые повышающие трансформаторы. Чтобы присоединить несколько ЛЭП к генератору (трансформатору), на ЭС сооружаются распределительные устройства (РУ) со сборными шинами. Сборные шины представляют собой систему токоведущих проводников, к которым подключаются (присоединяются) генераторы, трансформаторы и ЛЭП (рис. 1.1).

В цепи каждого присоединения к шинам для его включения и отключения, для возможности выполнения ремонта оборудования устанавливаются различные электрические аппараты. Между собой они соединяются токоведущими частями, по ним протекают токи нагрузок, и они находятся под рабочим напряжением цепи. В этой связи они называются аппаратами первичных цепей.

К аппаратам первичных цепей относятся: выключатели, разъединители, выключатели нагрузок, отделители, короткозамыкатели, измерительные трансформаторы тока и напряжения, разрядники, токоограничивающие реакторы и др.

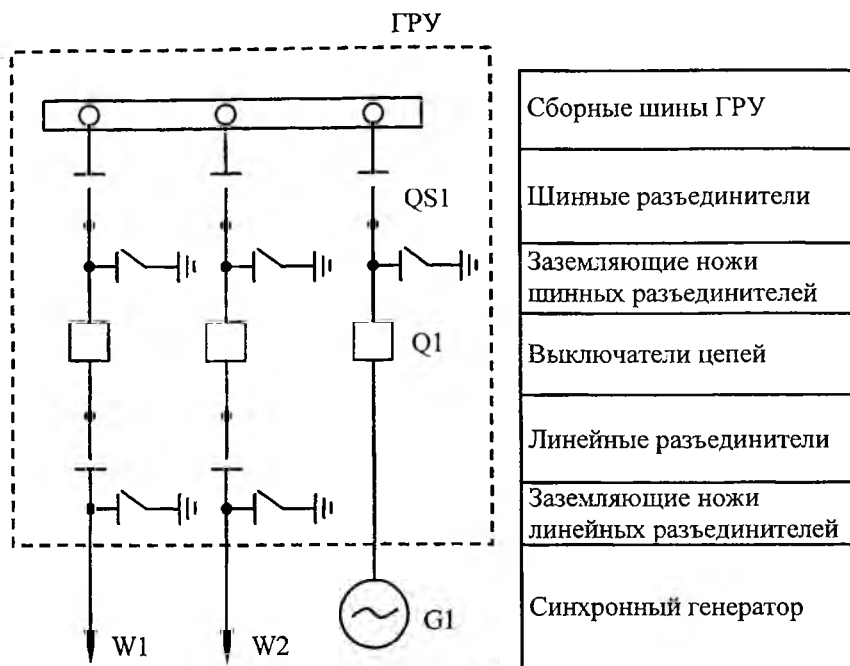


Рис. 1.1

Выключатели – это аппараты, имеющие размыкаемые контакты и предназначенные для включения и отключения рабочих токов и токов аварийных режимов цепей. При этом на контактах выключателей возникает электрическая дуга, и, чтобы прекратить протекание тока, необходимо ее погасить. Для этого в конструкции выключателей предусматриваются специальные дугогасительные устройства.

Разъединители при отключенном состоянии имеют видимый воздушный промежуток (разрыв) между контактами. Они устанавливаются в цепях для того, чтобы иметь возможность создать видимый разрыв в цепи между ее оборудованием и оборудованием других цепей, которые могут находиться под напряжением и продолжать работать. Тем самым обеспечивается условие безопасного выполнения ремонта оборудования отключенной цепи. Но для безопасности людей, ремонтирующих оборудование, нужно не только отделить его от цепей, оставшихся под напряжением, но и

заземлить. С этой целью разъединители снабжаются заземляющими ножами, при включении которых все три фазы цепи соединяются между собой и заземляются.

В общем случае в цепях требуется установка нескольких разъединителей. Их число и размещение определяются из необходимости отделить ремонтируемое оборудование цепи от продолжающего работать со всех сторон, откуда на него может поступать напряжение.

Разъединители не имеют дугогасительных устройств и не могут отключать токи нагрузок. Поэтому их включение и отключение может производиться только при отключенном выключателе цепи.

Включение и выключение выключателей и разъединителей осуществляется с помощью специального приводного механизма, приводимого в действие силовым органом-приводом. Привод получает энергию от внешнего источника (источника тока, предварительно напряженной пружины, сжатого воздуха, мускульной силы рук оператора и др.) и создает необходимые усилия для перемещения звеньев приводного механизма и связанных с ними подвижных контактов аппарата.

Измерительные трансформаторы тока устанавливаются в каждой цепи и обеспечивают питание токовых обмоток измерительных приборов, устройств защиты, автоматики. Обычно в каждой фазе устанавливаются несколько комплектов трансформаторов тока, каждый из которых питает отдельные приборы и устройства.

Измерительные трансформаторы напряжения присоединяются к сборным шинам РУ и к выводам генераторов. Они необходимы для питания обмоток напряжения измерительных приборов и устройств защиты. Названные аппараты первичных цепей подробно будут изучаться в последующих лабораторных работах.

На электростанциях и подстанциях обычно имеются несколько РУ разных напряжений, связанных между собой трансформаторами связи. Совокупность всего первичного оборудования, сборных шин, электрических аппаратов со всеми выполненными между ними соединениями образуют главную схему электрических соединений электростанции (подстанции).

Чертежи главных схем выполняются однолинейными (т.е. показывается одна фаза) с использованием стандартных условных обозначений оборудования и аппаратов.

На рис. 1.1 приведен чертеж упрощенной принципиальной схемы электрических соединений (без измерительных трансформаторов) ЭС с РУ генераторного напряжения (ГРУ).

Генератор ЭС подключен к сборным шинам ГРУ через выключатель Q1 и шинный разъединитель QS1, имеющий заземляющие ножи.

В цепях отходящих ЛЭП W1 – W2 установлено по два разъединителя – шинный (ШР) и линейный (ЛР). Это необходимо для того, чтобы при ремонте выключателей отделить их от сборных шин (отключив ШР) и от линии (отключив ЛР). Ведь линия при ремонте выключателя может быть под напряжением с противоположного конца!

В настоящее время отдельными фирмами мира изготавливаются выключатели, не требующие ремонта весь срок службы. Это позволяет отказаться от шинных разъединителей в цепях, оснащенных такими выключателями. Тем самым снизить затраты на электроустановку.

Приведенная на рис. 1.1 схема соединений имеет малую надежность электроснабжения потребителей. При ремонте и повреждении генератора или самих сборных шин все потребители отключаются. Поэтому на реальных электростанциях устанавливают не менее 2 генераторов, а в РУ применяются более сложные схемы.

На рис. 1.2 приведена упрощенная принципиальная схема электрических соединений ЭС. При этом все аппараты показаны согласно ГОСТ в отключенном состоянии.

На этой ЭС установлены 3 генератора. Два из них G1 и G2 подключены к сборным шинам ГРУ, а генератор G3 соединен с повышающим трансформатором ТЗ по схеме блока Г – Т и выдает энергию на сборные шины РУ высшего напряжения (РУ ВН).

Сборные шины ГРУ разделены на 2 секции с помощью секционного выключателя QB и секционного токоограничивающего реактора LRB. Потребители энергии получают питание по ЛЭП, подключенным к групповым линейным реакторам LR1 и LR2. Выдача избыточной мощности с шин ГРУ осуществляется через повышающие трансформаторы связи Т1 и Т2 на шины РУ ВН.

В РУ ВН сооружены две рабочие (A1, A2) и одна обходная (АО) системы сборных шин. При этом каждое присоединение к рабочим

системам шин подключено через развилку шинных разъединителей, а к обходной – через обходной разъединитель.

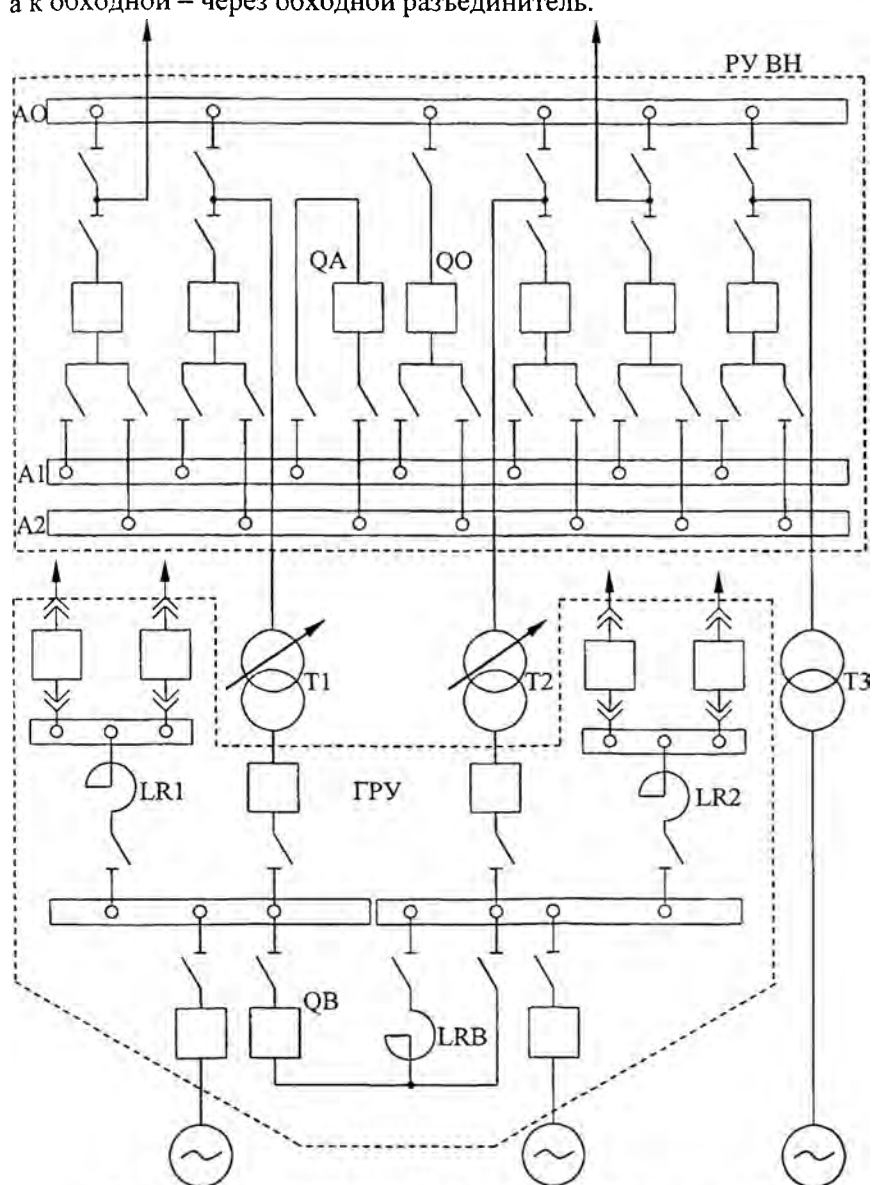


Рис. 1.2. Упрощенная главная схема электрических соединений ТЭЦ

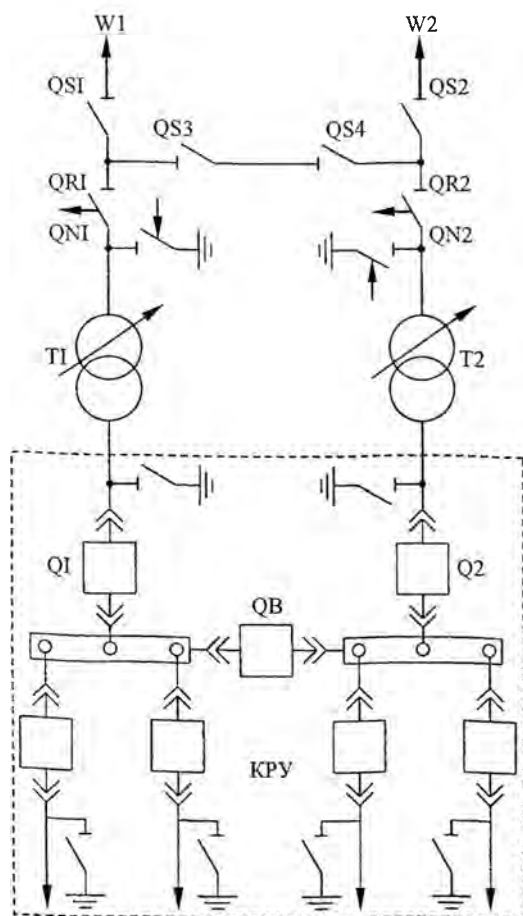


Такая схема РУ позволяет поочередно ремонтировать рабочие системы шин и сами выключатели, не прерывая электроснабжения потребителей. Чтобы обеспечить возможность этого в РУ ВН установлены дополнительно отдельные шиносоединительный (QA) и обходной (QO) выключатели.

Подстанциями называют электроустановки, обеспечивающие преобразование и распределение электрической энергии. Схема электрических соединений простейшей подстанции приведена на рис. 1.3.

В этой схеме вместо выключателей на питающих линиях W1 и W2 установлены отделители и короткозамыкатели, которые позволяют уменьшить затраты на сооружение подстанций.

Кроме аппаратов первичных цепей в электроустановках имеются многочисленные аппараты, обеспечивающие контроль параметров, управление и защиту оборудования первичных цепей. Эти аппараты образуют вторичные цепи, электрически не связанные с первичными цепями. В настоящей работе они не рассматриваются.



Линейные разъединители
Разъединители ремонтной перемычки
Отделители
Короткозамыкатели
Силовые понижающие трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой
Заземляющие ножи и вытчные разъединители шкафа КРУ
Выключатели питания комплектного РУ
Сборные шины комплектного РУ
Шкафы потребителей КРУ с выключателями, установленными на выкатных тележках

Рис. 1.3. Упрощенная схема электрических соединений понижающей подстанции без выключателей на стороне высшего напряжения

## Содержание работы

1. Ознакомиться с назначением аппаратов первичных цепей электростанций и конструктивным исполнением отдельных из них, установленных в лаборатории.
2. Изучить принципы построения первичных схем соединений электростанций.

3. По заданию преподавателя составить схему отдельной цепи главной схемы соединений ТЭЦ, представленной в лаборатории, для конкретного режима ее работы. Записать последовательность операций с выключателями и разъединителями, необходимых для перевода этой цепи в заданный режим.

### **Описание лабораторной установки**

Лабораторная установка включает в себя стенд, на котором показаны главные схемы соединений ТЭЦ, ГРЭС; отдельные аппараты и элементы первичных цепей: выключатели разных типов, разъединители, трансформаторы, токоведущие части, шкафы комплектных РУ и др.

Схемы на стенде выполнены цветными. Генераторы, трансформаторы, выключатели, реакторы и сборные шины РУ изображены пластмассовыми элементами, форма которых соответствует требованиям ГОСТ ЕСКД. Исключения составляют разъединители, обозначенные кружком. Втычные разъединители шкафов КРУ показываются разрывами линий. Измерительные трансформаторы и заземляющие ножи разъединителей не показаны. Принятые цвета соответствуют следующим уровням напряжения: желтый – 750 кВ; коричневый – 330 кВ; красный – 110 кВ; зеленый – генераторное напряжение 6–20 кВ; голубой – 6 кВ сети собственных нужд; черный – 0,4 кВ.

### **Методические указания и порядок выполнения работы**

Принципы построения первичных схем соединений электростанций и подстанций выясняются при усвоении текста настоящей работы и анализе приведенных схем. Анализируя схему, следует рассмотреть разные режимы работы отдельных цепей: нормальный, когда по оборудованию цепи протекают рабочие токи; ремонтный, когда оборудование цепи выведено из работы и ремонтируется; аварийный, при котором по цепи протекают токи короткого замыкания или других аномальных режимов. При этом надо выяснить назначение каждого аппарата в цепи.

Для выполнения задания преподавателя изучается часть схемы, где находится указанная цепь, и составляется ее схема для заданно-

го режима. Затем устанавливается очередность выполнения операций с выключателями и разъединителями, необходимых для перевода цепи в другой режим. Здесь руководствуются следующими правилами. При отключении цепи выключатель отключается первым, а при включении включается последним. Операции с разъединителями можно выполнять только при отключенном положении выключателя. Заземляющие ножи разъединителей включаются только после проверки в натуре отсутствия напряжения на заземляемом участке цепи.

Для примера приведем последовательность операций при выводе в ремонт выключателя линии W1 (см. рис. 1.1).

1. Отключается выключатель линии W1.
2. Отключается линейный разъединитель **QS** линии W1.
3. Отключается шинный разъединитель **QS** линии W1.
4. Включаются заземляющие ножи шинного разъединителя линии W1.
5. Включается выключатель, и с его привода снимается питающее напряжение (и перекрывается подача сжатого воздуха в воздушном выключателе).

## **Техника безопасности при выполнении работы**

Лабораторная работа выполняется без подачи напряжения на установку. Поэтому при ее выполнении следует соблюдать общие требования инструкции по технике безопасности при работе в лаборатории электрических станций.

## **Содержание отчета**

1. Наименование и цель работы.
2. Схема заданной цепи в указанном преподавателем режиме работы.
3. Задание по переводу цепи в другой режим.
4. Последовательность действий с выключателями и разъединителями, необходимых для перевода цепи в другой режим работы.

## Контрольные вопросы

1. Для какой цели в первичных цепях устанавливаются выключатели и разъединители и как они соединяются между собой?
2. В чем сходство и различие выключателей и разъединителей? В какой последовательности осуществляется их включение и отключение?
3. В чем состоит назначение сборных шин РУ?
4. Поясните назначение секционного, шиносоединительного и обходного выключателей в РУ со сборными шинами.
5. Как обеспечивается безопасность людей, выполняющих ремонты оборудования отдельных цепей в действующих электроустановках?
6. Поясните намеченную последовательность действий с аппаратами при выполнении задания преподавателя.

**Литература:** [2] (с. 12–29, 351–354, 359–365).

Работу подготовил В.Н. Мазуркевич

## Лабораторная работа № 2

### РАЗЪЕДИНИТЕЛИ, ОТДЕЛИТЕЛИ И КРОТКОЗАМЫКАТЕЛИ

**Цель работы:** ознакомление с назначением, конструктивным исполнением и принципом действия разъединителей, отделителей и короткозамыкателей.

### Краткие теоретические сведения

Разъединитель — это коммутационный аппарат, предназначенный для отключения и включения цепей высокого напряжения при отсутствии в них тока, а также для обеспечения безопасности производства ремонтных работ (создание видимого разрыва).

Разъединители не имеют дугогасительных устройств, поэтому ими нельзя отключать токи нагрузки. В связи с этим разъединители нормально используют для включения и отключения цепей, предварительно отключенных выключателем.

Однако разъединителями допускается включать и отключать дугогасящие катушки при отсутствии в сети замыканий на землю; нейтрали силовых трансформаторов, измерительные трансформаторы напряжения, токи намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов, зарядные токи кабельных и воздушных линий электропередач (величины этих токов установлены правилами технической эксплуатации (ПТЭ)).

Разъединителем, кроме того, разрешается производить операции включения и отключения, если он надежно зашунтирован низкоомной параллельной цепью (шиносоединительным или обходным выключателем).

Разъединители имеют относительно простую конструкцию и снабжаются ручными или электродвигательными приводами. По числу полюсов они могут быть одно- и трехполюсные, по роду установки — для внутренних и наружных установок, по конструкции — рубящего, поворотного, катящегося, пантографического и подвесного типа с заземляющими и без заземляющих ножей.

По способу установки различают разъединители с вертикальным и горизонтальным расположением ножей.

К разъединителям предъявляются следующие требования:

- а) контактная схема должна обладать необходимой термической и динамической стойкостью;
- б) переходное сопротивление контактов должно быть мало и стабильно;
- в) отключенное положение должно надежно фиксироваться механическим запором, а электрическая прочность воздушного промежутка между контактами должна соответствовать максимально-му импульсному напряжению;
- г) изоляция разъединителей должна обеспечивать надежную работу при дожде, гололеде, запыленности воздуха;
- д) разъединители должны иметь простую конструкцию, удобную для монтажа и эксплуатации.

### *Разъединители для внутренней установки*

Для внутренней установки изготавливаются разъединители рубящего типа на напряжение 6–35 кВ: однополюсные серии РВО и

трехполюсные серии РВ, РЛВ, РВФ, РВК, РВУ, РВРЗ (Р – разъединитель, В – внутренней установки, Л – с линейными контактами, Ф – фигурные изоляторы, К – коробчатое сечение контактов, У – усиленное исполнение, Р – рубящего типа, З – с заземляющими ножами).

Однополюсные разъединители (РВУ, РВК, РВРЗ) монтируются на опорных изоляторах, установленных на раме. На одном изоляторе шарнирно закреплен нож разъединителя, на втором – неподвижный контакт. Для включения и отключения ножа используются рычажные приводы.

Трехполюсный разъединитель состоит из трех однополюсных разъединителей, смонтированных на общей раме из профильной стали, и имеет один общий привод. Разъединители для внутренней установки (РВ, РВО, РЛВ) на номинальный ток до 1000А изготавливаются с ножом, состоящим из двух параллельных полос, что увеличивает их динамическую стойкость.

Дело в том, что разъединитель с подводящими шинами образует П-образный контур, в котором при протекании токов КЗ возникают электродинамические усилия, стремящиеся выбросить нож из контактов.

Для предотвращения самопроизвольного отключения разъединителя в этом режиме используются силы притяжения между двумя параллельными полосами, вызывающие увеличение давления в контакте и повышение сил трения в нем. Кроме того, применяется магнитный замок, состоящий из двух стальных пластин, которые, намагничиваясь при прохождении больших токов по ножу разъединителя, также притягиваются друг к другу.

Разъединители (РВРЗ и РВК) изготавливаются на токи от 3000 до 8000 А и выполняются в виде отдельных полюсов. Каждый полюс снабжен валом и изолирующей тягой. Валы отдельных полюсов соединяются в один общий вал при помощи соединительных муфт. Нож разъединителя РВК на 3000 А состоит из двух медных швеллеров, расположенных полками наружу; у разъединителей на токи 4000–8000 А имеется четыре швеллера, расположенных в два этажа.

Для установки в комплектных экранированных токопроводах применяются разъединители катящегося типа с поступательным движением ножа.

В комплектных распределительных устройствах (КРУ, КРУН, КРУЭ) вместо разъединителей применяются разъединяющие (втычные) контакты (розеточного, щеточного и других типов). Они состоят из неподвижных и подвижных частей. Неподвижные части разъединяющих контактов размещаются на изоляторах в шкафах КРУ. Подвижные части монтируются на выкатной тележке с выключателем. При вкатывании тележки в шкаф подвижные разъединяющие контакты замыкаются с неподвижными контактами, обеспечивая присоединение выключателя к электрической цепи. При выкатывании тележки из шкафа с предварительно отключенным выключателем разъединяющие контакты размыкаются, и выключатель отсоединяется от оборудования цепи.

### *Разъединители для наружной установки*

Разъединители наружной установки имеют изоляторы с хорошо развитой ребристой поверхностью. Наибольшее распространение получили разъединители наружной установки рубящего и поворотного типа, с заземляющими ножами и без них.

Разъединители рубящего типа серии РЛН (РЛНЗ) и РОН (РОНЗ) (Р – разъединитель, Л – линейные контакты, О – однополюсный, Н – наружной установки, З – с заземляющими ножами) имеют три колонки изоляторов: две неподвижные, на которых закреплены шарнирно-подвижный и жестко неподвижный контакты главного ножа и одна подвижная, выполняющая роль тяги. При включении и отключении подвижный нож разъединителя движется в вертикальной плоскости. Контактные системы таких разъединителей на напряжение 35 кВ и выше имеют приспособления для ломки льда.

Недостатком этих разъединителей являются большие габариты и необходимость ледокольных приспособлений.

Разъединители горизонтально-поворотного типа выпускаются на напряжения 10–750 кВ серии РЛНД, РЛНДА (Д – двухколонковый, А – с алюминиевыми ножами). В этих разъединителях главный нож состоит из двух подвижных частей, каждая из которых жестко закреплена на опорном изоляторе.

Изоляторы установлены в подшипниках и связаны между собой у основания системой рычагов. Привод приводит во вращение один из изоляторов среднего полюса, а от него движение передается всем



остальным изоляторам. Вместе с изоляторами проворачиваются и ножи разъединителя ( $\sim 90^\circ$ ).

Разъединители поворотного типа по сравнению с разъединителями рубящего типа проще в изготовлении, требуют меньшего числа изоляторов. Вес и стоимость их также ниже. Однако они требуют несколько большего расстояния между полюсами, поскольку в отключенном положении ножи приближаются к соседним фазам.

В установках 500–750 кВ находят применение пантографические одноколонковые и подвесные разъединители.

Пантографические разъединители со складывающимися ножами имеют сложную конструкцию.

Подвесной разъединитель (рис. 2.1) имеет подвижную контактную систему, состоящую из груза 5, снабженного пружинящими лапами 4 и контактными наконечниками 3, к которым приварены токоведущие провода.

Вся система подвешена на гирлянде изоляторов к portalу. Неподвижная контактная система состоит из кольца 6, укрепленного на опорных изоляторах или на трансформаторе тока 8. При включении освобождается трос 1, идущий к приводу, груз опускается вниз и наконечники 3 приходят в соприкосновение с кольцом 6 – цепь включена. Для заземления отключенного разъединителя используется телескопический заземлитель 7. Подвесной разъединитель надежно включается и отключается при гололеде, обеспечивает значительную экономию металлоконструкций, изоляторов, ошиновки.

### *Короткозамыкатели и отделители*

В настоящее время для электроснабжения потребителей, получающих электроэнергию от системы, применяются понижающие подстанции без выключателей на стороне питания (рис. 2.2). Применение таких схем значительно сокращает стоимость и сроки сооружения понижающих подстанций. На таких подстанциях вместо выключателей применяется комплект, состоящий из короткозамыкателя (QN) и отделителя (QR).

Короткозамыкатель – это аппарат, предназначенный для автоматического замыкания одной фазы установки на землю.

Отделитель – это трехфазный аппарат, обеспечивающий автоматическое отключение цепи при отсутствии тока в ней.

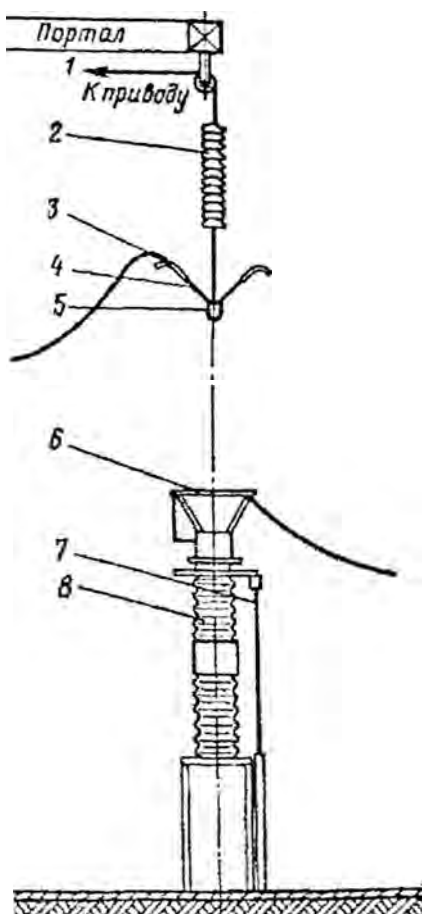


Рис. 2.1

В приведенной на рис. 2.2 схеме при повреждении трансформатора Т1 на подстанции П1 срабатывает релейная защита и подает команду на включение короткозамыкателя QN1. Он включается, и возникает однофазное КЗ. На питающем конце ЛЭП W2 срабатывает защита, отключает выключатель Q2. При этом запускается устройство автоматического повторного включения (АПВ) выключателя Q2.

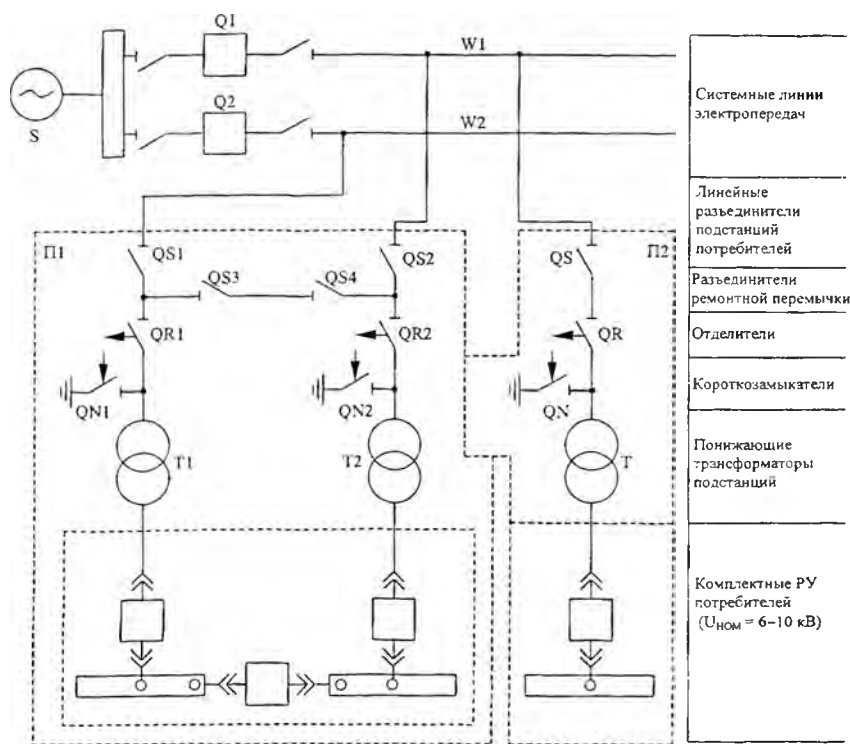


Рис. 2.2

После отключения линии по факту исчезновения тока КЗ на подстанции П1 автоматически отключается отделитель QR1. С выдержкой времени  $t_{АПВ}$  включается выключатель Q2, и нормальная работа линии восстанавливается, поскольку участок с повреждением отделен отключившимся к этому времени отделителем.

Короткозамыкатели выполняются как однополюсные разъединители. Они снабжаются включающим пружинным приводом, имеющим время включения 0,12–0,3 с. Отключение их производится вручную.

Отделители по конструкции не отличаются от разъединителей горизонтально-поворотного типа и имеют пружинный привод на отключение. Время отключения отделителя с пружинным приводом составляет 0,4–0,5 с.

Короткозамыкатели и отделители открытой конструкции ненадежно работают при морозе и гололеде. Поэтому взамен открытой конструкции QN и QR могут применяться аппараты с контактной системой, расположенной в закрытой камере, заполненной элегазом ( $\text{SF}_6$ ).

Элегазовые короткозамыкатели и отделители выполняются однополюсными. Их контактные камеры состоят из фарфорового корпуса, заполненного элегазом под давлением 0,3 МПа, и двух контактов – неподвижного и подвижного. Специальных устройств для гашения дуги не предусмотрено.

Неподвижный контакт – розеточного типа. Ламели контакта от обгорания защищены экраном. Подвижный контакт в короткозамыкателях выполняется стержневым с цилиндрическим экраном. В отделителях подвижный контакт выполнен полым с экраном. Разрыв между контактами – 90 мм.

Контактная камера элегазового отделителя 110 кВ является модулем для аппаратов более высокого напряжения.

Достоинством элегазовых QN и QR является четкая работа при любых внешних условиях. Кроме того, время их включения и отключения меньше, чем у аппаратов открытого типа.

### **Содержание работы**

1. Изучить конструкции разъединителей, представленных в лаборатории.
2. Составить кинематическую схему разъединителя РЛНДУ-1-10.
3. На модели подстанции без выключателя на стороне высшего напряжения изучить последовательность действия аппаратов при повреждении трансформатора.
4. Составить отчет о лабораторной работе.

### **Описание лабораторной установки**

Для изучения конструкции разъединителей рубящего типа изготовлен лабораторный стенд, на котором представлены по одному полюсу разъединители РВ и РЛН. Кроме того, отдельно смонтирован трехполюсный разъединитель для наружной установки гори-

зонтально-поворотного типа РЛНДУ-1-10 с ручным приводом ПРНЗ-10.

Для изучения принципа работы понизительной подстанции без выключателя на стороне высшего напряжения трансформатора смонтирована лабораторная схема. В ней тумблеры Т1 и Т2 служат для имитации повреждения внутри трансформаторов. Положение коммутационных аппаратов определяется горением или погасанием ламп. Если лампа горит, то соответствующий аппарат включен, а если не горит – отключен.

### **Методические указания и порядок выполнения работы**

1. Изучить конструкции разъединителей рубящего типа на лабораторном стенде, обратив внимание на устройство магнитного замка и меры предотвращения самопроизвольного отключения разъединителя.

2. Изучить конструкцию разъединителя РЛНДУ-1-10 и выяснить, как отрегулировать одновременность замыкания контактов и силу нажатия в них.

3. Изучить конструкции короткозамыкателей и отделителей.

4. Включить лабораторную модель и ознакомиться с принципом работы понизительной подстанции без выключателя на стороне высшего напряжения трансформатора.

### **Техника безопасности**

При выполнении работы соблюдать инструкцию по технике безопасности в лабораториях кафедры «Электрические станции».

### **Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- технические данные разъединителей РВ, РНД, короткозамыкателей и отделителей из справочных материалов [1, 2];
- кинематическую схему разъединителя РЛНДУ-1-10;
- схему понижающей подстанции без выключателя на стороне высшего напряжения трансформатора.

## Контрольные вопросы

1. Назначение разъединителей.
2. Операции, разрешаемые производить разъединителями.
3. Требования, предъявляемые к разъединителям.
4. Конструктивное устройство разъединителей внутренней установки.
5. Меры предотвращения самопроизвольного отключения разъединителей.
6. Конструктивное устройство разъединителей наружной установки.
7. Назначение заземляющих ножей.
8. Какие разъединители применяются на токи 3000–7000 А, какова их конструктивная особенность?
9. Какие блокировки имеют разъединители и каково их назначение?
10. Конструктивное устройство подвесных разъединителей.
11. Приводы разъединителей и их особенности.
12. Назначение отделителей и короткозамыкателей и их конструктивное устройство.
13. Принцип работы схемы подстанции без выключателей с высокой стороны.

**Литература:** [1] (с. 224–233); [2] (с. 175–182); [3].

Работу подготовил Л.Н. Свита

## Лабораторная работа № 3

### ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛООБЪЕМНОГО МАСЛЯНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ

**Цель работы:** изучение конструкций масляных выключателей, определение временных характеристик и исследование хода подвижных контактов выключателя ВМП-10.

## Краткие теоретические сведения

Высоковольтный выключатель — это коммутационный аппарат, предназначенный для включения и отключения тока электрической цепи высокого напряжения.

Выключатели являются основными аппаратами в электрических установках. Они должны быстро и надежно производить включения и отключения электрических цепей в нормальных и аварийных режимах и длительно выдерживать номинальный ток и номинальное напряжение. В этой связи они характеризуются следующими параметрами.

1. Номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ .
2. Номинальный ток  $I_{\text{ном}}$ .
3. Номинальный ток отключения  $I_{\text{откл. ном.}}$  — наибольший ток КЗ (действующее значение), который выключатель способен отключить при напряжении, равном наибольшему рабочему напряжению. Номинальный ток отключения определяется действующим значением периодической составляющей в момент расхождения контактов выключателя.

4. Допустимое относительное содержание аperiodической составляющей в токе отключения

$$\beta = \frac{i_{\text{а ном}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{откл. ном}}} \cdot 100.$$

5. Номинальный ток включения — наибольший ток КЗ, который выключатель способен включить без приваривания контактов и других повреждений при  $U_{\text{ном}}$  и заданном цикле операций.

6. Собственное время отключения  $t_{\text{соб}}$  — промежуток времени с момента подачи команды на отключение до размыкания дугогасительных контактов.

7. Полное время отключения  $t_{\text{пол}}$  — промежуток времени от подачи команды на отключение до окончательного погашения дуги на всех фазах выключателя.

8. Время включения  $t_{\text{в}}$  — промежуток времени от подачи команды на включение до завершения операции включения.

9. Стойкость при сквозных токах КЗ, определяющаяся:

- током и временем термической стойкости  $I_{\text{тер}}, t_{\text{тер}}$ ;
- током электродинамической стойкости  $I_{\text{дин}}$ .

#### 10. Параметры восстанавливающего напряжения.

По конструктивным особенностям и способу гашения возникающей при размыкании контактов электрической дуги различают следующие типы выключателей: масляные, воздушные, вакуумные, элегазовые, электромагнитные, синхронизированные и др.

В данной работе изучаются только масляные выключатели, которые в зависимости от конструктивных особенностей делятся на выключатели с большим объемом масла и выключатели с малым объемом масла (малообъемные).

Основными конструктивными частями выключателей любого типа являются: контактная система с дугогасительным устройством, токоведущие части, корпус, изоляционная конструкция и приводной механизм.

У масляных выключателей контакты размыкаются в трансформаторном масле. Возникающая при этом дуга имеет высокую температуру (3000–5000 °С). Прилегающие к дуге слои масла испаряются и разлагаются, и дуговой разряд происходит в газовой среде.

Приблизительно половину этого газа по объему составляют пары масла.

Остальная часть состоит из водорода (около 70 %) и углеводородов разного состава. Количество масла, разлагаемого дугой, невелико, но образующиеся газы имеют большой объем (1 грамм масла даст приблизительно 1500 см<sup>3</sup> газа при атмосферном давлении и температуре 10 °С). В результате в газовом объеме возникает большое давление (0,5–5 МПа и выше).

Высокое давление образовавшихся газов используют для интенсивной деионизации дугового промежутка. С этой целью в зоне горения дуги размещают специальные жесткие дугогасительные камеры, имеющие рабочие каналы. По этим каналам за счет высокого давления в зоне горения дуги создается направленное движение образовавшейся газомасляной смеси относительно горячей дуги.

В зависимости от расположения рабочих каналов различают камеры с поперечным, продольным и встречно-поперечным движением (дутьем) газомасляной смеси.

Чем больший отключается ток, тем интенсивнее дутье и гашение дуги. Поэтому масляные выключатели называют еще автогазовыми.

Конструктивная схема масляного бакового выключателя на напряжение 110 кВ приведена на рис. 3.1.



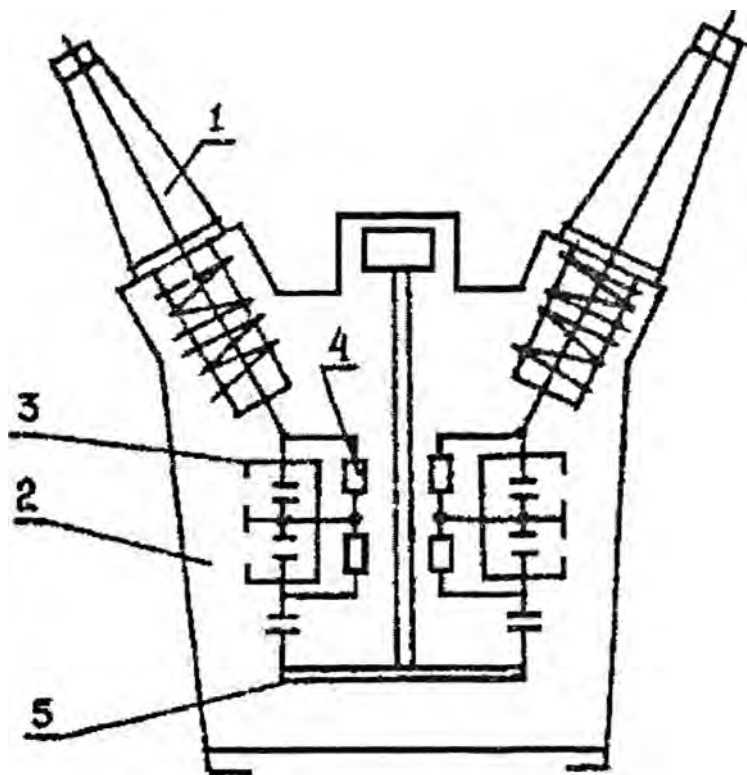


Рис. 3.1. Конструктивная схема масляного бакового выключателя:  
 1 – ввод с встроенными трансформаторами тока; 2 – корпус выключателя;  
 3 – дугогасительная камера; 4 – шунтирующее сопротивление; 5 – траверса

Каждый полюс выключателя представляет собой отдельный бак специальной формы. На крышке бака смонтированы маслonaполненные вводы, коробки со встроенными трансформаторами тока, коробка приводного механизма. В каждом полюсе имеются два дугогасительных устройства, представляющие собой камеры многократного разрыва. Для равномерного распределения напряжения по разрывам используются шунтирующие сопротивления (750 Ом).

Бак выключателя залит маслом. Под крышкой остается некоторый объем воздуха. Слой масла над гасительными камерами должен быть достаточным для надежного охлаждения газов, образующихся в процессе отключения.

При отключении выключателя сначала размыкаются контакты дугогасительных камер, в которых поперечным дутьем гасятся дуги. Ток в цепи при погашении дуг ограничивается шунтирующими сопротивлениями. Затем разрываются контакты траверсы, и возникающие на них дуги гасятся в открытом разрыве в масле.

Аналогично выполнен и выключатель У220. Конструктивно У220 отличается размерами и числом разрывов — у него в дугогасительных камерах имеются по 3 разрыва.

Пожаро- и взрывоопасность, большой объем масла являются существенными недостатками баковых выключателей. Достоинствами их являются простота конструкции, высокая надежность и наличие встроенных трансформаторов тока.

В настоящее время область их применения ограничена, и выпуск их прекращен. В основном они применяются в открытых РУ 35–220 кВ.

### *Малообъемные масляные выключатели*

В малообъемных выключателях трансформаторное масло используется как дугогасительная среда и только частично служит изоляцией между разомкнутыми контактами. Изоляция токоведущих частей друг от друга и от заземленных конструкций выполняется фарфором или другими твердыми изолирующими материалами (пластмассой и др.).

Малообъемные масляные выключатели изготавливаются на напряжения до 500 кВ включительно и особенно широко применяются при напряжениях 6–35 кВ.

Их достоинствами являются малое количество масла, небольшие габариты и масса, меньшая взрыво- и пожароопасность, относительно низкая стоимость.

В закрытых и комплектных распределительных устройствах 6–10–35 кВ наиболее широко применяется выключатель типа ВМП (выключатель масляный подвесной).

Выключатель ВМП–10 имеет три полюса, укрепленных с помощью изоляторов ОМБ–11Т на общей раме. Каждый полюс связан изоляционной тягой с валом выключателя. Между полюсами установлены изоляционные перегородки.

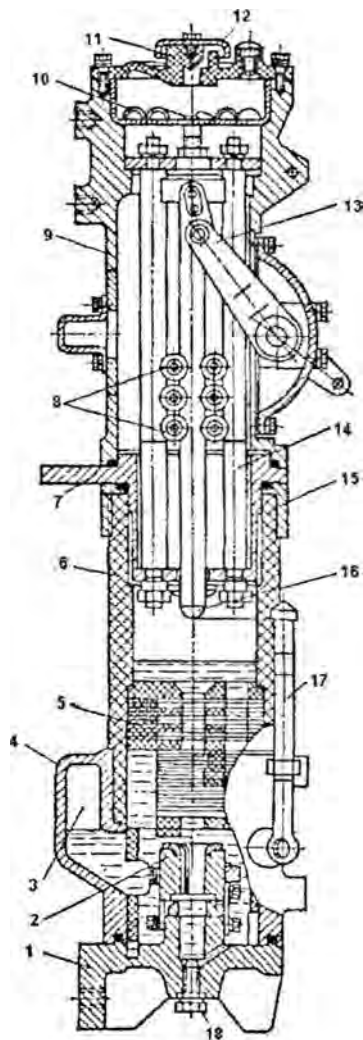


Рис. 3.2

Полус выключателя (рис. 3.2) состоит из прочного влагостойкого изоляционного цилиндра 6, на концах которого армируются металлические фланцы 4 и 15. На верхнем фланце укреплен корпус 9 из алюминиевого сплава, внутри которого расположены подвижный контакт 16 с приводным механизмом 13, роликовое токосъемное

устройство 8 с направляющими стержнями 14 и маслоотделитель 10. Сверху корпус 9 закрыт крышкой 11 с отверстием 12 для выпуска газов. Корпус связан с наружным токоведущим выводом 7. В нижнем фланце 4 размещены гасительная камера 5 поперечного масляного дутья, буферная камера 3 и маслоуказатель 17. Снизу фланец закрыт крышкой 1, внутри которой закреплен неподвижный розеточный контакт 2. Крышка одновременно служит вторым контактным выводом.

Гасительная камера собрана из пластин изоляционного материала с фигурными отверстиями. При наборе пластин создаются три поперечных канала, открытых сверху, а в верхней части камеры — масляные карманы. Во включенном положении стержень находится в розеточном контакте, плотно перекрывая каналы камеры гашения.

При отключении выключателя привод освобождает отключающую пружину, и под действием ее силы вал выключателя поворачивается. Через изоляционную тягу движение передается приводному механизму 13 и контактному стержню 16, который поднимается вверх. При размыкании контактов между ними возникает дуга, испаряющая и разлагающая трансформаторное масло. В начале процесса отключения поперечные каналы гасительной камеры перекрыты подвижными контактными стержнями, и давление в нижней части камеры резко возрастает до 0,4–0,5 МПа, при этом часть масла заполняет буферную камеру, сжимая в ней воздух. По мере дальнейшего движения подвижного контакта вверх поочередно открываются поперечные каналы, в которые устремляется газопаровая смесь, создавая интенсивное поперечное дутье. При переходе тока через нуль давление в парогазовом пузыре снижается, и сжатый воздух буферного объема подобно поршню нагнетает свежее масло в область горения дуги.

При отключении больших токов образуется энергичное поперечное дутье, и дуга гаснет в нижней части камеры. При отключении малых токов дуга тянется за стержнем и в верхней части камеры разлагает масло в карманах, создавая встречно-радиальное дутье, а при выходе стержня из камеры — продольное дутье.

После гашения дуги пары масла и газы проходят через маслоотделитель, где пары масла конденсируются, а газ через газоотводное отверстие выходит наружу.

Для смягчения удара при включении и отключении выключателя на его раме располагаются пружинный и масляный буферы.

Выключатели ВМП-10 выпускаются на номинальное напряжение 10 кВ и номинальный ток: 630, 1000, 1600 А. Выключатель ВМП-10 с номинальным током 3200 А имеет дополнительные рабочие контакты, расположенные снаружи выключателя (ВМПЭ-10).

В закрытых распределительных устройствах 6–10 кВ применяется также выключатель ВМГ-10 (выключатель масляный горшковый) на номинальный ток 630 и 1000 А (выпускается взамен выключателя ВМГ-133). Выключатель имеет на каждую фазу металлический бачок цилиндрической формы, на днище которого закреплен неподвижный розеточный контакт. Подвижный контакт, в виде круглого медного стержня, проходит через проходной изолятор, заармированный в крышке бачка выключателя. Внутри бака, над неподвижным контактом, размещена камера поперечного масляного дутья. Полюса выключателя с помощью опорных изоляторов монтируются на общей стальной раме.

Кроме выключателей ВМП-10 и ВМГ-10 в комплектных распределительных устройствах применяются выключатели колонкового типа – ВК-10 и ВКЭ-10. Дуга в этих выключателях гасится подобно рассмотренному выше. В результате использования ряда усовершенствований в конструкции масса и габариты их меньше, чем у выключателей ВМП.

На большие номинальные токи (2000–9500 А) изготавливаются выключатели МГГ (масляный генераторный горшковый) и МГ (масляный генераторный). Выключатели этих серий имеют на фазу по два стальных бачка и по две пары рабочих и дугогасительных контактов. Рабочие контакты размещены снаружи выключателя, а дугогасительные – внутри баков. Эти выключатели имеют два контура тока: главный и дугогасительный. Ток главного контура протекает от контактных выводов по крышке баков, рабочим контактам и траверсе. Ток дугогасительного контура проходит от контактного вывода по стенкам первого бака через дугогасительные контакты, траверсу, дугогасительные контакты второго бака, по стенкам этого бака по второму контактному выводу. Когда выключатель включен, большая часть тока проходит по главному контуру. При отключении первыми размыкаются рабочие контакты, но дуги на них не образуется, так как ток продолжает протекать по дугогасительному

контуру. При размыкании дугогасительных контактов между ними возникает дуга, которая гасится в камере встречно-поперечного дутья. Давление в гасительной камере при гашении дуги достигает 0,8 МПа. Для уменьшения давления при отключении больших токов камера имеет буферные объемы.

Дальнейшим развитием выключателей этой серии является выключатель ВГМ-20-90/11200, предназначенный для установки в цепях мощных генераторов. Большой номинальный ток обеспечивается за счет коробчатых выводов и малого переходного сопротивления на пути прохождения тока.

В распределительных устройствах потребителей при напряжении 110 и 220 кВ применяются маломасляные выключатели серии ВМТ. Три полюса выключателя ВМТ устанавливаются на общем сварном основании и управляются пружинным приводом. Каждый полюс представляет собой фарфоровую колонку, внутри которой находится дугогасительное устройство, подвижный и неподвижный контакты. Подвижный контакт связан с механизмом управления изоляционными тягами. В качестве дугогасительного устройства используются камеры встречно-поперечного дутья.

Маслонаполненные колонны имеют в верхней части незаполненный маслом объем, герметизированы и находятся под избыточным давлением воздуха или азота. Это обеспечивает высокую электрическую прочность межконтактного промежутка и позволяет надежно отключать как токи КЗ, так и емкостные токи ненагруженных линий.

Для выключателей ВМТ-110 и ВМТ-220 используются одинаковые модули – для 110 кВ – один на фазу, для 220 кВ – два на фазу. Такая унификация позволяет иметь резервные модули и при ремонтах выключателей заменять их исправными.

## Содержание работы

1. Изучить назначение высоковольтных выключателей, требования к ним и их характерные параметры.
2. Изучить конструктивное выполнение масляных выключателей ВМ-35, ВМГ-133, ВМП-10, МГГ-10, ВМП-35, ВК-10, установленных в лаборатории. Составить конструктивную схему одного из выключателей (по заданию преподавателя).

3. Определить собственное время включения и отключения выключателя ВМП-10.
4. Определить полный ход подвижного контакта, ход в контакте и одновременность замыкания и размыкания контактов выключателя ВМП-10.
5. Составить отчет о лабораторной работе.

### **Описание лабораторной установки**

Лабораторная установка включает образцы полюсов выключателей ВМ-35, ВМП-10, ВМГ-133, ВМП-35, фазу выключателя МГГ-10, выключатель ВК-10 и стенд для определения одновременности замыкания контактов и снятия временных характеристик выключателя ВМП-10. Стенд с приборами смонтирован на лабораторном столе. Объектом исследования является выключатель ВМП-10, установленный на выкатной тележке шкафа комплектного распределительного устройства (КРУ). Связь между выключателем и стендом выполнена двумя жгутами проводов через штыревые разъемы. На лицевой стороне стенда начерчены развернутая схема цепей управления выключателем и схема измерений. Для управления выключателем используется ключ управления типа ПМОФ, имеющий два положения (включено, отключено). Временные характеристики выключателя определяются с помощью двух электрических секундомеров. Секундомер (РТ1) подключается через тумблер SN2 и показывает время включения, секундомер (РТ2) при включенном тумблере SN3 показывает время отключения. Одновременность замыкания контактов выключателя определяется с помощью трех ламп, подключенных к схеме тумблером SN4.

Постоянный ток напряжением 220 В и переменное напряжение 220 В для питания схемы управления выключателем и схемы измерения подводится к стенду от щитка питания с помощью двух жгутов проводов, имеющих штыревые разъемы.

### **Методические указания и порядок выполнения работы**

1. При изучении конструкций масляных выключателей следует обратить особое внимание:

- на контактную систему, принцип работы гасительной камеры, размещение встроенных трансформаторов тока у выключателя ВМ-35;

- устройство и место расположения гасительной камеры, контактную систему, способ подвода тока к подвижному контакту, назначение буферного пространства у выключателя ВМГ-133;

- места подключения токопроводов, конструкцию подвижных и неподвижных контактов, роликовый токосъем, назначение и взаимодействие основных деталей приводного механизма выключателей ВМП-10;

- особенность конструкции выключателей МГГ-10 и ВК-10.

2. Включение и отключение высоковольтных выключателей производится с помощью приводов. Представленный в лаборатории выключатель ВМП-10 имеет электромагнитный привод ПЭ-11, электромагниты включения и отключения которого питаются постоянным током.

Временные характеристики выключателей (собственное время включения и отключения) включают в себя и время работы привода. По этим характеристикам, сравнивая их с заводскими, судят о качестве монтажа или ремонта выключателя.

Малое собственное время включения по сравнению с заводскими данными говорит о большой скорости движения подвижного контакта, что может вызвать чрезмерные ударные механические нагрузки на подвижные части выключателя. Большое собственное время отключения может приводить к вибрации и уменьшению отключающей способности выключателя (причиной может быть ослабление пружин, повышенное трение и т.д.).

Принципиальные схемы измерения времени включения и отключения выключателей приведены на рис.Б лабораторного стенда.

Поворотом рукоятки ключа SA по часовой стрелке до упора (в схеме рис. Б) подается команда (замыкается цепь) на включение выключателя и запускается секундомер РТ1. При замыкании контактов выключателя обмотка секундомера шунтируется, и секундомер останавливается, показывая собственное время включения выключателя.

При отключении ключа SA (поворотом рукоятки против часовой стрелки) подается команда на отключение выключателя, и запускается секундомер РТ2. Размыкаясь, контакты выключателя разрыва-



ют цепь тока через обмотку секундомера, он останавливается и показывает собственное время отключения.

Перед осуществлением измерений нужно детально изучить развернутые схемы, изображенные на стенде, обращая особое внимание на положение тумблеров. Стрелки секундомеров установить в нулевое положение.

### **Техника безопасности при выполнении работы**

При выполнении работы подавать напряжение на лабораторную установку можно только с разрешения преподавателя. Категорически запрещается касаться выводов или других частей выключателя, находящихся под напряжением. Особое внимание следует обращать на возможность «срывов» в кинематике, когда выключатель находится во включенном положении. Включение выключателя ключом управления производить только с разрешения преподавателя.

### **Ход работы**

1. При измерении собственного времени включения должны быть включены тумблеры SN1 и SN2, а тумблеры SN3 и SN4 отключены.

2. При измерении времени отключения тумблеры SN1 и SN4 включены, а SN2 и SN4 отключены.

3. Определение полного хода подвижного контакта, хода в контакте производится при включении выключателя вручную рычагом. Ход контакта контролируется по нижней шкале линейки и стрелке, укрепленной на валу привода.

4. Проверка одновременности замыкания и размыкания контактов выключателя производится с помощью трех ламп, включенных по схеме рис. Б стенда. Для этого вручную, с помощью специального рычага, ось которого укладывается на выступы корпуса, а второй конец заводится под стальную сердечник электромагнита включения привода, медленно поднимают сердечник, фиксируя очередность зажигания ламп.

Одновременно по стрелке, укрепленной на валу привода и нижней шкале линейки, определяется ход контакта в мм, при котором загорается каждая из трех ламп. Разновременность касания контак-

тов для выключателя ВМП-10 не должна превышать 5 мм. Для регулирования касания контактов изменяют длину изоляционной тяги.

Проверка одновременности замыкания контактов производится при включении тумблеров SN1 и SN4 и отключенных SN2 и SN3.

### Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1) паспортные данные выключателей У-110, У-220, ВМП, ВК напряжением 10 кВ с номинальным током 1000 А и выключателей МГГ-10 и МГ-20 с номинальным током 5000 и 6000 А соответственно;

2) конструктивную схему одного выключателя (по указанию преподавателя);

3) результаты измерений собственного времени включения и отключения выключателя с приводом (табл. 3.1);

Таблица 3.1

Выключатель ВМП-10	Собственное время, с	
	включения	отключения
Измеренное		
Каталожное		

4) результаты проверки хода подвижных контактов фаз и одновременности их включения и отключения (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Фазы	А	В	С
Полный ход подвижных контактов			
Ход в контактах			
Очередность включения фаз			
Разновременность касания контактов, мм			
Очередность отключения фаз			
Разновременность размыкания контактов			

## Контрольные вопросы

1. Назовите типы выключателей напряжением выше 1000 В.
2. Какие требования предъявляются к выключателям и какими параметрами они характеризуются?
3. Как конструктивно выполнены выключатели с большим объемом масла на напряжения 110 и 220 кВ?
4. Расскажите о конструктивном устройстве выключателей ВМ-35, ВМГ-10, ВМП-10, МГГ-10, МГ-20, ВК-10.
5. Чем отличается гашение дуги при отключении больших и малых токов в малообъемных масляных выключателях?
6. Зависит ли полное время отключения от величины отключаемого тока?
7. Почему на рабочих контактах выключателей МГ-10 и ВГМ-20 при их отключении не загорается дуга?
8. Расскажите о конструкции малообъемного выключателя для наружной установки типа ВМГ 110.
9. Чем опасна большая разновременность включения фаз выключателя и как можно отрегулировать одновременность замыкания контактов фаз выключателя ВМП-10?
10. Как конструктивно выполнены гасительные камеры баковых масляных выключателей У-110 и У-220?

**Литература:** [1] (с. 137–248); [2] (с. 137–142); [3] (с. 294–310).

Работу подготовил Ю.Г. Румянцев

## Лабораторная работа № 4

### ВЫКЛЮЧАТЕЛИ НАГРУЗКИ

**Цель работы:** изучение назначения, применения и конструктивного исполнения выключателей нагрузки.

### Краткие теоретические сведения

Выключатели нагрузки (ВН) – это трехполюсные коммутационные аппараты высокого напряжения, предназначенные для автома-

тического включения и отключения рабочих токов нагрузок электрических цепей. Они не могут отключать токи коротких замыканий (КЗ), но имеют большую включающую способность, соответствующую току электродинамической стойкости при сквозном КЗ.

Отключение цепи ВН при КЗ осуществляется силовым выключателем, установленным в начале питающей линии (рис. 4.1), либо предохранителями, расположенными ближе к источнику питания.

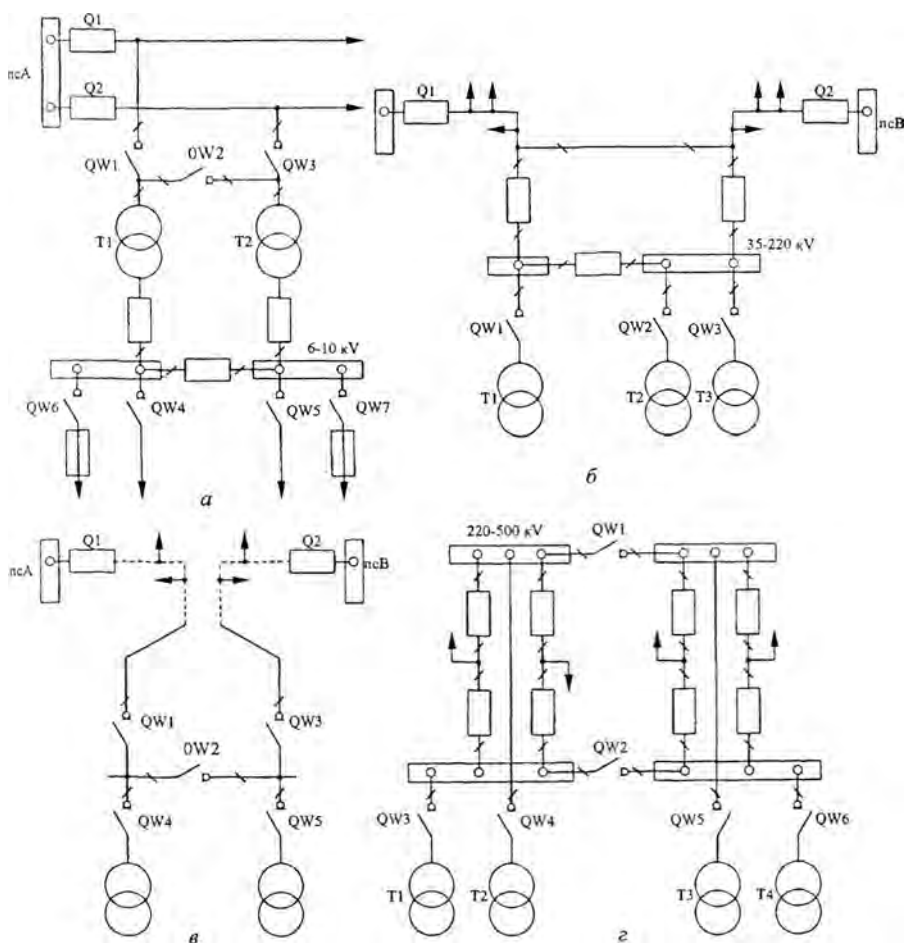


Рис. 4.1. Схемы соединений подстанций с выключателями нагрузки

ВН широко применяются взамен дорогостоящих силовых выключателей на подстанциях распределительных сетей напряжением до 750 кВ. Кроме того, они могут устанавливаться в сочетании с выключателями на системных подстанциях (рис. 4.1 а, 4.1 з) и в цепях мощных генераторов (рис. 4.2). Во всех случаях применение ВН позволяет значительно снизить затраты на сооружение электроустановки при обеспечении достаточной гибкости схемы и надежности электроснабжения потребителей.

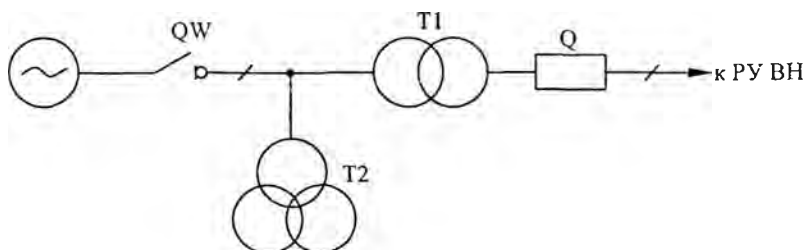


Рис. 4.2. Схема блока генератор-трансформатор с установкой выключателя нагрузки в цепи генератора

На рис. 4.1 приведены чаще всего применяемые в мировой практике схемы подстанций с ВН.

В каждой из этих схем ВН устанавливаются в разных цепях для разных целей.

Установка ВН в цепях высшего напряжения трансформаторов подстанций позволяет производить эксплуатационные включения и отключения их без отключения выключателей в начале питающих линий (Q1 и Q2 на рис. 4.1 а и 4.1 в). При КЗ в трансформаторе срабатывает короткозамыкатель или запускается устройство телеотключения (ТО) и отключение повреждения будет осуществляться выключателями Q1 и Q2 питающих линий. В период бестоковой паузы первого цикла трехфазного автоматического повторного включения (ТАПВ) этих выключателей произойдет отключение ВН. Тем самым будет отделен поврежденный трансформатор от цепи. При включении Q1 и Q2 от ТАПВ электроснабжение других потребителей, питающихся от этих линий, будет восстановлено.

Поскольку ВН имеют малое собственное время отключения ( $t_{\text{собст.}}$ ), то возможно сократить до минимума время первого цикла

ТАПВ ЛЭП. Это позволяет повысить устойчивость работы нагрузки и надежность электроснабжения потребителей в целом (по сравнению с использованием отделителей наружной конструкции).

В случае установки ВН в цепях отходящих линий они, кроме включения и отключения ЛЭП, могут использоваться для автоматического секционирования линий с двухсторонним питанием (рис. 4.1 в, рис. 4.3).

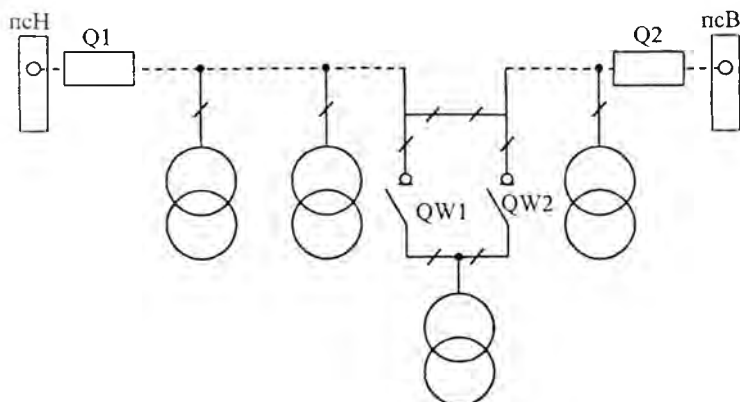


Рис. 4.3. Применение выключателей нагрузки в качестве устройства автоматического секционирования линии с двухсторонним питанием

Это позволяет автоматически отделять поврежденный участок линии во втором цикле ТАПВ выключателей Q1 и Q2. Продолжительность бестоковой паузы второго цикла ТАПВ также можно выполнить минимально возможной, что обеспечивает условия самозапуска электродвигателей потребителей и повышает устойчивость их работы.

Особенно эффективно применение ВН для автоматического секционирования линий с двухсторонним питанием, к которым ответительные подстанции (КТП) подключены через разъединитель (рис. 4.3). По данным специалистов США замена силовых выключателей ВН в схеме верхнего мостика на подстанциях сети 132 кВ позволяет снизить затраты на 76 % при увеличении расчетной повреждаемости схемы электроснабжения всего на 9 % [5].

При установке ВН в перемычке ответительной подстанции

(см. рис. 4.1 а) он используется для автоматического включения резервного питания (АВР) на высшем напряжении. В данном случае в нормальном режиме работы QW2 отключен и включается только после автоматического отключения устойчиво поврежденной линии. Тем самым обеспечивается нормальная работа потребителей.

Выключатели нагрузки успешно применяются в системах электроснабжения городов и промышленных предприятий при напряжениях 6–10 кВ (см. рис. 4.1 а, б).

На электрических станциях с мощными генераторами ( $P_{\text{ном}} = 1000$  МВт), работающими в блоке с повышающими трансформаторами, можно устанавливать ВН у генератора (см. рис. 4.2). Здесь ВН используется для эксплуатационных включений и отключений генератора при сохранении питания потребителей собственных нужд блока от своего рабочего трансформатора Т2. При КЗ в генераторе или трансформаторах Т1 и Т2 отключение повреждения производится выключателем Q и автоматическим гашением магнитного поля ротора генератора.

В схемах подстанций с ВН разъединители устанавливаются только в случае, когда ремонт нельзя совместить с полным отключением цепи. Кроме того, разъединители могут быть составной частью выключателя нагрузки (когда разъединитель совмещается с дугогасительной камерой). При этом на схемах отдельно разъединители не показываются.

## Содержание работы

1. Ознакомится с назначением выключателей нагрузки (ВН).
2. Рассмотреть применение ВН и схемы электрических соединений подстанций с использованием ВН.
3. Изучить конструкции ВН, имеющихся в лаборатории.
4. Составить отчет о работе.

### *Конструкции выключателей нагрузки*

В выключателях нагрузки гашение электрической дуги может осуществляться автогазовым дутьем, сжатым воздухом, в среде газа, в вакууме.

В России изготавливаются выключатели нагрузки с гасительными устройствами газогенерирующего типа для номинальных напряжений 6 и 10 кВ (рис. 4.4, лабораторный образец QW1). В конструкции этих ВН использованы элементы трехполюсного разъединителя для внутренней установки. На опорных изоляторах неподвижных контактов укреплены гасительные камеры 5. К подвижным ножам прикреплены вспомогательные ножи 4.

В положении «включено» вспомогательные ножи входят в гасительные камеры. Рабочие контакты 2 и скользящие контакты гасительных камер 7 замкнуты.

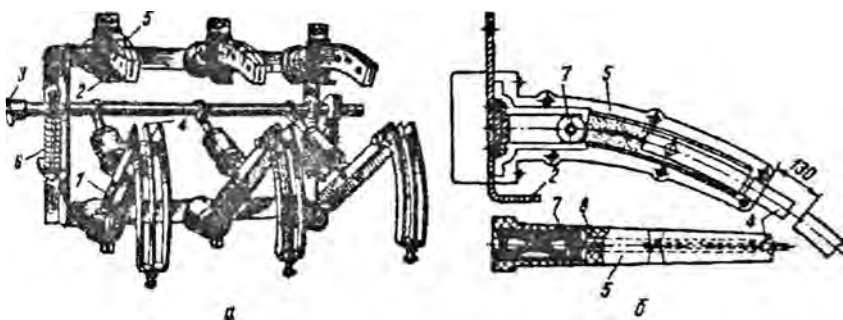


Рис. 4.4. Выключатель нагрузки ВН-16:

*а* — общий вид; *б* — дутогасительная камера;

1 — подвижный контакт; 2 — главный неподвижный контакт; 3 — вал;

4 — подвижный дутогасительный контакт; 5 — корпус дутогасительной камеры;

6 — отключающая пружина; 7 — неподвижный дутогасительный контакт;

8 — газогенерирующие вкладыши

При отключении сначала размыкаются рабочие контакты 2, а затем — дутогасительные. Возникающая дуга между контактами 7 и 4 горит в узкой щели, образованной вкладышами из органического стекла 8, и гасится в потоке газов — продуктов разложения вкладышей. В положении «отключено» вспомогательные ножи находятся вне гасительной камеры, чем обеспечиваются достаточные изоляционные разрывы. Выключатель такой конструкции может отключать активные или индуктивные токи до 800 А при напряжении



6 кВ и до 400 А при напряжении 10 кВ (ВН-16, ВНП-17). Номинальные же токи соответствуют рабочим токам разъединителей.

Для защиты цепи от КЗ последовательно с ВН этого типа включаются предохранители типа ПК. Обычно они устанавливаются на общей раме с выключателем.

Управление выключателем нагрузки производится с помощью привода, соединенного с валом 3. Отключение выключателя происходит под действием пружин 6, расположенных на раме и обеспечивающих необходимую скорость движения ножей при отключении.

### *Элегазовые выключатели нагрузки*

По литературным данным элегазовые выключатели нагрузки являются наиболее эффективными из всех известных типов. В России разработаны опытные образцы элегазовых ВН, которые получили марку ВНЭ и имеют три модификации: на одно, два и три направления. В настоящее время они не изготавливаются.

Выключатель на три направления ВНЭ-III-110 представляет собой конструкцию, объединяющую три ВН на одно направление (рис. 4.5).

Каждое из направлений является самостоятельным дугогасительным устройством с подвижными и неподвижными контактами, размещенными в фарфоровом изоляторе, заполненном элегазом при давлении 0,3 МПа. Изоляторы направлений крепятся на металлическом корпусе, к которому электрически присоединяются их подвижные контакты. В результате образуется общая точка выключателя (см. рис. 4.5 а). Таким образом, корпус находится под напряжением и поэтому устанавливается на фарфоровой опорной колонке соответствующего класса напряжения.

Подвижные контакты приводятся в движение независимыми изоляционными тягами, проходящими через внутреннюю полость опорной колонки и связанными посредством специальных уплотняющих устройств с рычажными механизмами приводов соответствующих направлений.

В подвижный и неподвижный контакты встроены постоянные магниты из феррита, которые создают встречно направленные магнитные поля. При размыкании контактов образуется дуга, перемещающаяся по кольцевым электродам под действием электродина-

мических сил. При вращении дуга быстро гасится и сами контакты не обгорают.

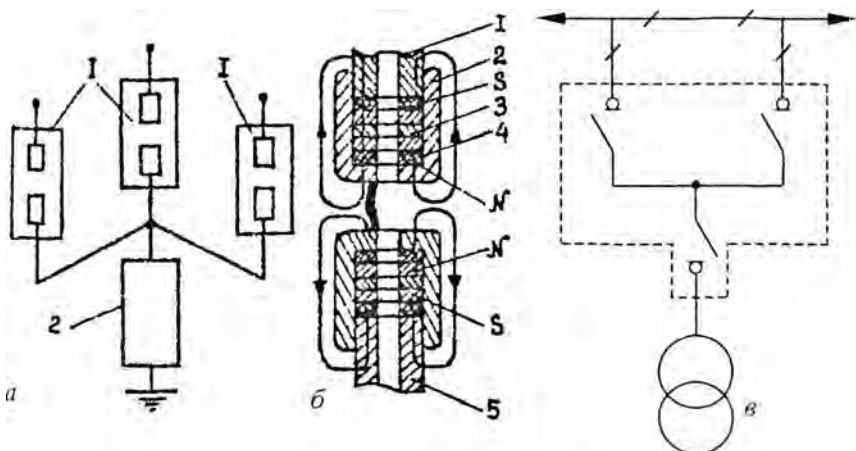


Рис. 4.5:

*а* – конструктивная схема элегазового выключателя нагрузки на три направления; 1 – дугогасительные камеры направлений; 2 – опорный изолятор;

*б* – конструктивная схема контактной системы дугогасительного устройства: 1 – трубчатый токопровод неподвижного контакта; 2 – корпус неподвижного контакта; 3 – постоянные магниты; 4 – дугостойкая дугогасительная шайба; 5 – трубчатый токопровод подвижного контакта;

*в* – схема установки выключателя нагрузки на три направления на проходной однотрансформаторной подстанции

Выключатели нагрузки на I, II и III направления образуют единую серию, состоящую из идентичных дугогасительных модулей. Это облегчает эксплуатацию, позволяет при ремонте направления заменить его резервным модулем. При этом самостоятельность кинематики привода каждого направления исключает необходимость регулировки приводов исправных модулей. Кроме того, унификация дугогасительных блоков позволяет использовать ВНЭ-П-110, т. е. ВН на два направления напряжения 110 кВ при замене опорного изолятора как ВН одного направления на напряжение 220 кВ.

По параметрам элегазовые ВН серии ВНЭ могут изготавливаться на номинальные токи до 2000 А, с динамической стойкостью до 70 кА и односекундной термической стойкостью до 40 кА.

Наиболее известными в мире элегазовыми выключателями нагрузки являются изготавливаемые фирмой Шнейдер Электрик для распределительных сетей 6, 10, 20 кВ малогабаритные моноблоки RM6 (см. приложение к работе). Эти моноблоки могут использоваться как высоковольтное вводное устройство трансформаторной подстанции с одним или двумя трансформаторами мощностью до 3 МВА или как пункт деления сети на несколько направлений.

В стальном герметичном корпусе RM6, заполненном элегазом под давлением 0,2 бар, размещаются от одного до четырех выключателей нагрузки, оснащенных заземляющим разъединителем. Выключатели нагрузки дополняются плавкими предохранителями или силовым (одним или двумя) выключателем. Корпус имеет отсеки кабелей, вторичных цепей, привода, предохранителей.

Гашение дуги в выключателях нагрузки осуществляется автодутьем элегаза, в выключателе силовом – дополнительно дуги вращается по контактам.

Моноблок может оснащаться релейной защитой, которая питается от встроенных в проходные изоляторы 3 тороидальных трансформаторов тока и не требует дополнительного источника оперативного тока. RM6 приспособлен для включения в систему телеуправления распределительной сетью.

Моноблок RM6 изготавливается для номинальных токов 200, 400, 630 А; токов отключения 12,5, 16, 25 А; токов включения 40 или 52 кА; для температур окружающей среды от  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ .

### *Вакуумные выключатели нагрузки*

Вакуумные выключатели нагрузки в мировой практике ранее применялись в установках до 500 кВ. Конструктивные схемы их различны. Они могут быть выполнены как комбинация автоматически управляемого разъединителя с дугогасительной вакуумной камерой или как отдельный электрический аппарат. По литературным данным [5] примерная стоимость ВН, совмещенного с разъединителем, составляет 200 % стоимости обычного разъединителя и около 30 % стоимости воздушного выключателя. Если ВН выполнен как отдельный электрический аппарат, то его стоимость в 2–3 раза меньше стоимости воздушного выключателя соответствующего

класса напряжения. В настоящее время вакуумные выключатели нагрузки не изготавливаются.

В России изготавливались до 2000 г. вакуумные выключатели нагрузки на 6–10 кВ. В конструкции этого выключателя (см. лабораторный образец № 2) используется вакуумная дугогасительная камера КДВ-21.

Эта камера имеет цилиндрический корпус из керамики 1. Внутрь камеры через верхний фланец входит неподвижный контакт из сплава Ag-Bi 2, а через нижний фланец и сильфонное уплотнение – подвижный контакт 3. Ход подвижного контакта составляет 6 мм. Давление в камере  $10^{-3}$  мм рт. ст. Контакты в камере охватываются металлическими экранами 4, служащими для защиты керамического корпуса от теплового излучения и напыления паров металла, образующихся при гашении дуги.

При расхождении контактов площадь их соприкосновения быстро уменьшается. Температура в последней точке соприкосновения контактов за счет проходящего тока резко повышается. За очень короткое время этот мостик нагревается и испаряется. Зажигается дуга. Вследствие глубокого вакуума происходит быстрая диффузия заряженных частиц в окружающее пространство и конденсация их на поверхности экрана. Когда ток подходит к нулевому значению, дуга угасает и парообразование прекращается. Если скорость восстанавливающейся электрической прочности промежутка превышает скорость переходного восстанавливающегося напряжения, дуга не возникает и цепь окажется разомкнутой. Полное время отключения цепи при этом не превышает 0,05 с.

Выключатель ВНВ-10/320 имеет номинальный ток 320 А и способен отключать ток до 2000 А. Он снабжен электромагнитным приводом переменного тока.

## Методические указания и порядок выполнения работы

При выполнении работы изучаются конструкции выключателей нагрузки и их применение в схемах подстанций. Для более глубокого освоения материала требуется проработка учебников [1–5].

В процессе изучения конструкции выключателей требуется составить кинематическую схему передачи движения от вала привода к подвижным контактам выключателя. Для этого, в меру необходи-

мости, нужно самостоятельно включать и отключать выключатели, рассматривая взаимодействие частей. Включение и отключение выключателя ВНП-16 осуществляется ручным приводом, а выключателя ВНВ – дистанционно, воздействием на ключ схемы дистанционного управления.

С целью изучения конкретных конструктивных решений по контактной системе выключателя ВНВ-10 необходимо:

а) проверить величину провала контактов во включенном положении, т. е. свободный ход контактов от момента соприкосновения до их упора (остановки). Провал характеризует износ контактов и для выключателя ВНВ-10 должен быть  $4 \pm 0,3$  мм.

Величина провала контактов замеряется между нижней металлической поверхностью изоляционного рычага передачи движения от вала привода к полюсу и головкой нижнего болта вертикальной тяги подвижного контакта при включенном положении выключателя;

б) установить, как регулируется одновременность замыкания контактов в дугогасительных камерах.

### **Содержание отчета**

В отчете должны быть приведены:

- основные сведения по конструкциям выключателей нагрузки;
- изученные схемы соединения подстанций с выключателями нагрузки.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем обусловлено изготовление и применение выключателей нагрузки в разных странах мира?
2. Какие требования и почему предъявляются к параметрам выключателей нагрузки?
3. Пояснить назначение ВН в схемах подстанций.
4. Расскажите о конструктивном исполнении ВН разных типов.
5. Какие преимущества имеют элегазовые выключатели нагрузки единой серии ВНЭ?
6. В чем состоят особенности вакуумных выключателей нагрузки?

7. Поясните, с какой целью определяются провал контактов и одновременность их замыкания в полюсах выключателя.

**Литература:** [1] (с. 233–234); [2] (с. 182–184, 359–365);  
[5] (с. 67–72, 255–264, 367–384).

Работу подготовил В.Н. Мазуркевич

## **Лабораторная работа № 5**

### **ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ**

**Цель работы:** ознакомление с перспективами применения выключателей, содержащих вакуумные дугогасительные камеры (ВДК); изучение конструкции и процессов, протекающих в дуге отключения в ВДК; изучение конструкции и исследование вакуумного выключателя ВБЧ-10-20.

#### **Краткие теоретические сведения**

С начала 70-х годов прошлого столетия во всех странах мира (США, Японии, Великобритании, Франции, Италии, ФРГ, Швейцарии, России) начали изготавливаться вакуумные выключатели переменного тока. Особенно широкое распространение они получили в электроустановках напряжением 3–35 кВ (до 110 кВ).

Вакуумные выключатели обладают малыми габаритами и массой, большим ресурсом, надежностью и сроком службы, взрывопожаробезопасностью, требуют малых эксплуатационных расходов.

Так, по данным [2], стоимость вакуумных выключателей переменного тока на 10–15 % выше, чем стоимость маломасляных, но стоимость их обслуживания за 25 лет в два раза меньше, чем у маломасляных, а суммарная длительность перерывов в электроснабжении при ремонтах в 20 раз меньше.

Эти качества привели к тому, что вакуумные выключатели (ВВ) стали вытеснять маломасляные, а их доля в общем количестве ежегодно изготавливаемых во всем мире выключателей на напряжение до 35 кВ в 1990 г. превысила 55 % (в Японии – 70 %).

Кроме ВВ в 70-е годы многие фирмы мира изготавливали вакуумные выключатели нагрузки (ВВН). ВВН были дешевле выключателей и широко применялись в комплектных РУ электрических сетей и в подземных установках. К середине 80-х годов в связи с прогрессом вакуумных выключателей резко снизились технико-экономические преимущества ВВН и вместо них стали применяться ВВ. В результате к 1990 г. большинство зарубежных фирм вообще прекратило выпуск вакуумных выключателей нагрузки.

Таким образом, в настоящее время основную долю изготавливаемых в мире выключателей 3–35 кВ составляют вакуумные выключатели. По всем технико-экономическим показателям этот тип выключателей имеет преимущества перед другими типами. В этой связи можно утверждать, что в ближайшем будущем такими выключателями будет комплектоваться большинство распределительных устройств напряжением 3–35 кВ.

### *Устройство и работа вакуумных дугогасительных камер*

Основной частью ВВ является вакуумная дугогасительная камера (ВДК). ВДК (см. разрез ВДК выключателя ВБЧ) состоит из изоляционной цилиндрической камеры 5, имеющей по концам металлические фланцы 1 и 8. Внутри камеры помещаются подвижный 6 и неподвижный 3 контакты и электростатические экраны 2, 4 и 7. Неподвижный контакт жестко крепится к одному фланцу камеры. Подвижный контакт соединяется с другим фланцем с помощью сильфона из нержавеющей стали, обеспечивающего возможность перемещения контакта при сохранении герметичности внутреннего объема ВДК. Экраны крепятся к оболочке или фланцам и служат для защиты внутренней поверхности оболочки от брызг и паров металла, образующихся при горении дуги, а также для выравнивания распределения напряжения по камере. Изоляционная оболочка 5 изготавливается из стекла или специальной газоплотной керамики. Внутри оболочки создается вакуум  $(10\text{--}15) \cdot 10^{-6}$  Па (около  $10^{-6}$  мм рт.ст.). При этом давление разрядное напряжение зависит от длины межконтактного промежутка (рис. 5.1).

В вакууме практически отсутствует окисление контактных поверхностей, но значительно возрастает склонность металлов к сва-

риванию и коэффициент трения. В этой связи в ВДК применяются контакты торцевого типа. Контактное нажатие создается пружинами, расположенными вне камеры (1000–4000 Н), и за счет разности давлений, действующих на сильфон с обеих сторон (200–500 Н).

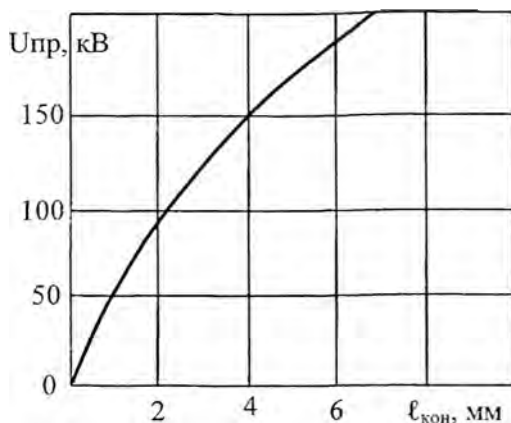


Рис. 5.1. Зависимость пробивного напряжения  $U_{пр}$  от расстояния между контактами в вакууме

Материал контактов должен иметь малое удельное сопротивление, незначительный износ при включении и отключении, плохую свариваемость, малые токи среза и др. Чтобы удовлетворить этим требованиям, для контактов применяют многокомпонентные или композиционные материалы, полученные путем спекания и пропитки. Чаще всего используются сплавы на медной основе: CuBi, Cu-BiB, FeCuBi и другие или хромсодержащие композиции CuCr, CrCuW и др.

При отключаемых токах до 10 кА в ВДК применяют простые дисковые контакты. При больших токах для уменьшения оплавления контактов дуги заставляют вращаться под действием собственного поперечного магнитного поля. С этой целью по внешнему краю контактов делают косые или спиральные прорезы. Или контакты выполняют так, что образуется виток, создающий продольное магнитное поле. На рис. 5.2 приведено сравнение отключающей способности ВДК с продольным магнитным полем (кривая 1) и ВДК с контактами, имеющими спиральные прорезы (кривая 2) в за-



висимости от диаметра контактов. Как следует из рис. 5.2, камеры с продольным магнитным полем имеют существенные преимущества по сравнению с камерами со спиральными прорезями.

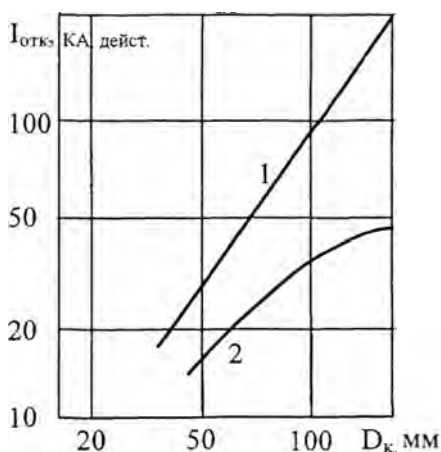


Рис. 5.2. Зависимость отключающей способности ВДК от диаметра контактов: 1 – контакты с продольным магнитным полем; 2 – контакты со спиральными прорезями

Дуговой разряд, образующийся при размыкании контактов, проводит ток в вакууме благодаря наличию в межконтактном промежутке паров металла, выделяемых сильно нагретыми зонами на поверхности контактов, служащих основаниями дуги. На катоде зоны имеют вид ярко светящихся пятен, в анодной области – размытого пятна.

Характер дуги зависит от величины тока. При токах менее 10 кА дуга имеет диффузную форму с множеством катодных пятен, рассеянных по поверхности катода. На аноде пятна отсутствуют. Напряжение на дуге при этом не превышает 30 В. При больших токах дуга имеет сжатую форму. Напряжение на ней увеличивается до 100–200 В, и в нем появляются всплески с большой амплитудой (рис. 5.3). Это связано с формированием анодных пятен. В их зоне происходит значительное оплавление контактов, которое ведет к увеличению количества металлических паров в промежутке и усиленному износу контактов.

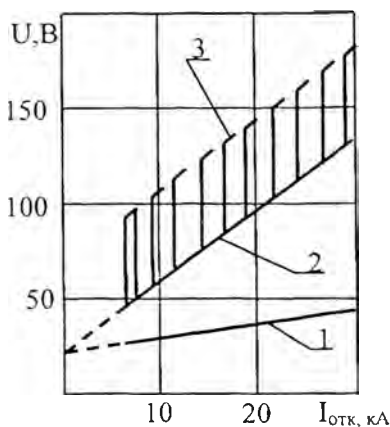


Рис. 5.3. Вольтамперные характеристики ВДК: 1 — контакты с продольным магнитным полем; 2 — контакты со спиральными прорезами; 3 — флуктуации напряжения

В случае создания продольного магнитного поля плазма концентрируется вокруг силовых линий магнитного поля, катодные пятна движутся к краю контактов, а анодные — не возникают. Напряжение на дуге значительно снижается, а всплески напряжения исчезают.

Особенностью вакуумной дуги является нестабильность при малых токах. Разряд прекращается, когда плотность тока, температура и количество паров контактного материала не в состоянии обеспечить существование хотя бы одного катодного пятна. При этом происходит срез (прерывание) тока до его естественного перехода через нуль и в цепи возникают перенапряжения.

Ток среза ВДК зависит от свойств применяемых контактных материалов, их теплоты парообразования и теплопроводности, давления паров, а также от параметров контура тока. Он характеризуется средним значением и областью разброса. Особо важное значение имеет верхняя граница области разброса, т.к. она определяет максимальные напряжения. Как следует из [2], наибольшие токи среза для контактов  $\text{CuVi}$  достигают значения 20 А, а  $\text{CrCu}$  — 5 А.

Ток среза ВДК зависит и от параметров сети. Эта зависимость прямо пропорциональна емкости сети в степени 0,03. Такое медленное нарастание токов среза ВДК при увеличении шунтирующей емкости не приводит к значительному росту перенапряжений с уве-

личением емкости нагрузки. Следовательно, с этим явлением можно не считаться.

Перенапряжения, создаваемые ВДК при отключении малых индуктивных токов, могут быть вызваны повторным зажиганием дуги в случае размыкания контактов ВДК непосредственно перед переходом тока через нуль или в нуль тока промышленной частоты. В этом случае восстанавливающееся напряжение растет быстрее, чем электрическая прочность контактного промежутка (рис. 5.4). При пробое промежутка в контуре емкость питания–индуктивность линии–емкость нагрузки появляется высокочастотный ток и возникают колебания напряжения. Благодаря высокой скорости восстановления электрической прочности вакуумных промежутков ВДК в состоянии отключить в первый нуль высокочастотный ток, текущий от емкости питания к емкости нагрузки. Но если электрическая прочность промежутка недостаточна, происходит повторное зажигание. При этом ток в отключаемой индуктивности будет увеличиваться от одного повторного зажигания к другому. Это приводит к постепенному повышению напряжения на нагрузке выше  $U_c$  (в 2,2–3,0 раза и больше). В результате может пробиться изоляция обмоток электродвигателей. Особенно тяжелые условия создаются для маломощных электродвигателей, присоединенных длинными кабелями.

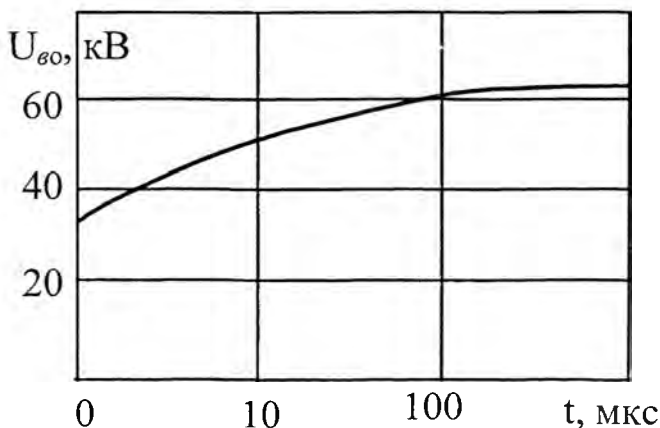


Рис. 5.4. Зависимость восстанавливающейся прочности вакуумного промежутка от времени

Третий вид перенапряжений, возникающих при отключении ВДК, связан с наличием коротких кабельных и воздушных линий между ВВ (несколько сот метров длиной). В случае многократных повторных зажигания дуги в первогасящем полюсе и в двух других полюсах появляются высокочастотные токи. Они протекают через паразитные емкости и полюса, в которых еще горит дуга, и имеют направление, обратное отключаемому току. В результате могут происходить срезы тока с мгновенными значениями до 300 А.

Как следует из [2], при коммутации ВВ высоковольтных двигателей и ненагруженных трансформаторов коэффициент перенапряжений находится в пределах 2,2–4  $U_{\phi}$ . В таком случае от перенапряжений нужно защищать только маломощные электродвигатели и сухие трансформаторы.

Для защиты от перенапряжений используются нелинейные ограничители перенапряжений с оксидноцинковыми дисками без искровых промежутков. Могут использоваться также цепочки RC (1,2 мкФ, 200 Ом), устанавливаемые на выключателе со стороны нагрузки.

Расстояние между контактами ВДК обычно составляет 8–12 мм при  $U_n = 10$  кВ и 18–30 мм при  $U_n = 20$ –35 кВ. Масса подвижного контакта зависит от номинального тока и напряжения и находится в пределах 1–7 кг. Средняя скорость движения подвижного контакта составляет при включении 0,6–1,2 м/с, при отключении – 1,2–2 м/с. Время горения дуги при отключении меньше 0,02 с.

### *Конструктивное исполнение вакуумных выключателей*

Малые габаритные размеры, массы и небольшие динамические нагрузки ВДК позволяют создавать конструкции ВВ со значительно меньшими массогабаритными размерами, чем у маломасляных выключателей.

Хотя в большинстве случаев контакты ВДК изготавливаются из материалов, плохо поддающихся сварке и образующих сравнительно слабые в механическом отношении сварные соединения, все же для надежной работы они выполняются таким образом, чтобы в случае сваривания контактов для отрыва их друг от друга использовалась энергия, запасенная при отключении в подвижных частях выключателя. При этом энергия, необходимая для отрыва друг от

друга приваривавшихся контактов, должна составлять незначительную часть общей кинетической энергии, необходимой для обеспечения требуемой скорости расхождения контактов.

С этой целью отключающий механизм ВВ выполняется так, что движение подвижных частей начинается раньше, чем движение подвижного контакта. Для этого сцепление подвижного контакта ВДК с механизмом ВВ происходит после того, как звено, соединяющееся с подвижным контактом, пройдет 3–4 мм (ход в контакте). Скорость звена при соединении превышает скорость подвижного контакта при отключении. За счет повышенной кинетической энергии в момент сцепления происходит отрыв подвижного контакта от неподвижного и разрушение сварного соединения, если оно имелось. Оставшаяся неизрасходованная кинетическая энергия подвижных частей обеспечивает перемещение подвижного контакта с требуемой скоростью.

В качестве привода ВВ используются электромагнитные или пружинные приводы.

Малые габаритные размеры, массы и небольшие динамические нагрузки на фундамент позволяют устанавливать вакуумные выключатели в стандартных шкафах КРУ в 2–4 яруса. Поэтому конструктивно вакуумные выключатели выполняются с малыми размерами по высоте (960–1160 мм и менее).

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя вакуумный выключатель Минусинского завода высоковольтных вакуумных выключателей типа ВВЧ-СП-10-20/630 УХЛ2 и схему управления им.

Выключатели этого типа предназначены для частых коммутационных операций в сетях трехфазного переменного тока с изолированной или компенсированной нейтралью. Они устанавливаются в шкафах КРУ выдвижного типа и имеют следующие технические данные:  $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$ ;  $I_{\text{ном}} = 630 \text{ А}$ ;  $I_{\text{ном.отк}} = 20 \text{ кА}$ ;  $I_{\text{вкл}} = 20 \text{ кА}$ ;  $i_{\text{скв}} = 52 \text{ кА}$ ;  $I_{\text{терм.стойк}} = 20 \text{ кА}$ ;  $t_{\text{терм.стойк}} = 3 \text{ с}$ ;  $t_{\text{отк.собст.}} = 0,02 \text{ с}$ ;  $t_{\text{откл.}} = 0,04 \text{ с}$ ;  $t_{\text{вкл.}} = 0,1 \text{ с}$ ; коммутационный ресурс при номинальном токе –  $3 \cdot 10^4$  циклов ВО; коммутационный ресурс при токе КЗ, равном 20 кА – 50; ход подвижного контакта – 8 мм; провал контактов – 4 мм; допустимый износ контактов – 3 мм; средняя скорость

подвижного контакта при включении – 0,5–0,9 м/с, при отключении – 1,5–1,9 м/с.

Выключатель состоит:

- из основания 1, которое снабжено катками и служит тележкой для выкатной части КРУ;
- рамы 2, прикрепленной болтами к основанию;
- трех полюсов, состоящих из ВДК типа КДВХ-10-20 и изоляционного крепящего каркаса;
- встроенного электромагнитного привода 4, передающего движение на вал выключателя 5 к подвижным контактам ВДК. Движение от вала выключателя передается с помощью изоляционных тяг 6.

Вакуумная дугогасительная камера типа КДВХ-10 имеет хромо-содержащие контакты (композиция хром-медь-вольфрам) со спиральными прорезями. Материал контактов имеет следующие характеристики: удельное электрическое сопротивление – 4,5 Ом·см; твердость по Бринеллю – 780 МПа; сила разрыва сварки – 900–2300 Н; ток среза – 3,5 А.

Корпус камеры состоит из двух секций специальной газоплотной керамики, наружная поверхность которых имеет ребра для увеличения электрической прочности в условиях выпадения росы. Диаметр корпуса 104 мм, длина 169 мм. Масса камеры 2,9 кг, длина с подвижным токовводом 240 мм, давление  $1 \cdot 10^{-2}$  Па.

Привод выключателя электромагнитный, работающий на выпрямленном переменном токе 220 В. Выпрямительные блоки, конденсаторы включения и отключения, блокконтакты смонтированы на раме выключателя под крышкой, замененной листом органического стекла.

Для управления выключателем на лабораторном столе смонтирован ключ управления типа ПМОВ. Для сигнализации о включенном и отключенном положении выключателя над ключом установлены две лампы с зеленым и красным стеклом. Если выключатель, отключен, горит зеленая лампа, включен, то горит красная лампа.

### Задание по работе

1. Ознакомиться с содержанием настоящей разработки, выяснить достоинства и недостатки вакуумных выключателей по сравнению с маломасляными выключателями, оценить перспективы их

применения.

2. Изучить процессы, протекающие при отключении ВДК. Выяснить физические причины возникновения перенапряжений при отключении ВДК и способы защиты от них.

3. Изучить конструкцию выключателя ВБЧ-10-20.

4. Составить эскиз выключателя ВБЧ-10-20.

5. Составить кинематическую схему передачи движения от вала выключателя к подвижному контакту ВДК. Для этого несколько раз включить и отключить выключатель вручную, наблюдая за работой элементов передачи движения. Затем собрать схему дистанционного управления выключателем и произвести несколько его включений и отключений ключом управления, наблюдая за работой механизмов выключателя.

6. Составить отчет о работе.

### **Техника безопасности при выполнении работы**

При выполнении работы необходимо соблюдать требования инструкции по технике безопасности в лаборатории «Электрические станции».

Дополнительно необходимо помнить, что привод выключателя ВБЧ развивает усилия, превышающие 400 кг. В этой связи при изучении и осмотре кинематической схемы передачи движения от вала выключателя к подвижному контакту прикасаться к деталям выключателя запрещается!

При ручном включении выключателя его схема дистанционного управления должна быть отключена. Рычаг ручного включения насаживается на гнездо вала выключателя и поворачивается вниз до фиксации механизма во включенном положении. После этого рычаг снимается.

*Отключение выключателя должно производиться при снятом рычаге!*

*Дистанционное включение и отключение может производиться только при снятом рычаге ручного включения.*

### **Содержание отчета**

В отчете должны быть приведены:

– наименование и цель работы;

- основные параметры выключателя ВБЧ-10-20;
- эскиз ВДК выключателя;
- кинематическая схема передачи движения от вала выключателя к подвижному контакту ВДК.

### **Контрольные вопросы**

1. В каких установках применяются вакуумные выключатели и какие они имеют преимущества перед другими типами выключателей?
2. Почему в ВДК не применяются контакты из монометалла?
3. Как влияет магнитное поле контактной системы ВДК на гашение электрической дуги?
4. Что такое срез тока при отключении ВВ и какими процессами он обуславливается?
5. Почему возникают перенапряжения при отключении малых токов и ТКЗ ВВ?
6. Как осуществляется защита потребителей от перенапряжений при работе ВВ?
7. В чем состоит отличие привода ВВ от приводов выключателей других типов?
8. Как конструктивно выполнена ВДК?
9. Почему ВВ в основном применяются на напряжения 3–35 кВ?
10. Как создается поперечное или продольное магнитное поле на контактах ВДК вакуумных выключателей?

**Литература:** [2] (с. 153–156), [4] (с. 327–331), [6] (с. 2–71).

Работу подготовил В.Н. Мазуркевич

### **Лабораторная работа № 6**

#### **ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ И ОГРАНИЧИТЕЛИ УДАРНОГО ТОКА**

**Цель работы:** изучение назначения, принципа действия, конструктивного исполнения, характеристик высоковольтных предохранителей и ограничителей ударного тока.



## Краткие теоретические сведения

Высоковольтный предохранитель – это защитный однополюсный аппарат, обеспечивающий автоматическое однократное отключение высоковольтной цепи при коротком замыкании. Автоматическое отключение цепи происходит за счет расплавления специально предусмотренной в предохранителе плавкой вставки под действием протекающего тока, превышающего определенное значение. Возникающая при этом электрическая дуга гасится специальным дугогасительным устройством.

Перед следующим включением цепи необходимо заменить перегоревшую плавкую вставку в предохранителе на исправную. Эта операция производится вручную.

Высоковольтные предохранители характеризуются:

- номинальным напряжением  $U_{\text{ном}}$ ;
- номинальным током  $I_{\text{ном. пред.}}$ ;
- номинальным током плавкой вставки  $I_{\text{ном. вст.}}$ ;
- номинальным током отключения  $I_{\text{ном. откл.}}$ .

Изготавливаются они на напряжение до 110 кВ, номинальные токи до 400 А и токи отключения до 40 кА. Плавкие вставки к предохранителям выпускаются на токи от 2 А до 400 А с шагом примерно равным 1,6.

В нормальном режиме работы цепи, когда по предохранителю протекает ток, не превышающий значения номинального тока плавкой вставки  $I_{\text{ном. вст}}$ , тепло, выделяемое в ней, передается в окружающую среду и температура всех частей предохранителя не превышает допустимую (100–105 °С). При увеличении тока в цепи выше  $I_{\text{ном. вст}}$  температура вставки возрастает. При некотором токе, называемом минимальным током плавления  $I_{\text{пл.}}$ , вставка расплавляется. Возникающая электрическая дуга гасится в дугогасительной среде, и цепь оказывается отключенной. Чем больше ток превышает  $I_{\text{пл.}}$ , тем быстрее расплавляется плавкая вставка.

Зависимость времени плавления плавкой вставки от тока цепи называют защитной характеристикой или время-токовой характеристикой плавкой вставки (рис. 6.1).

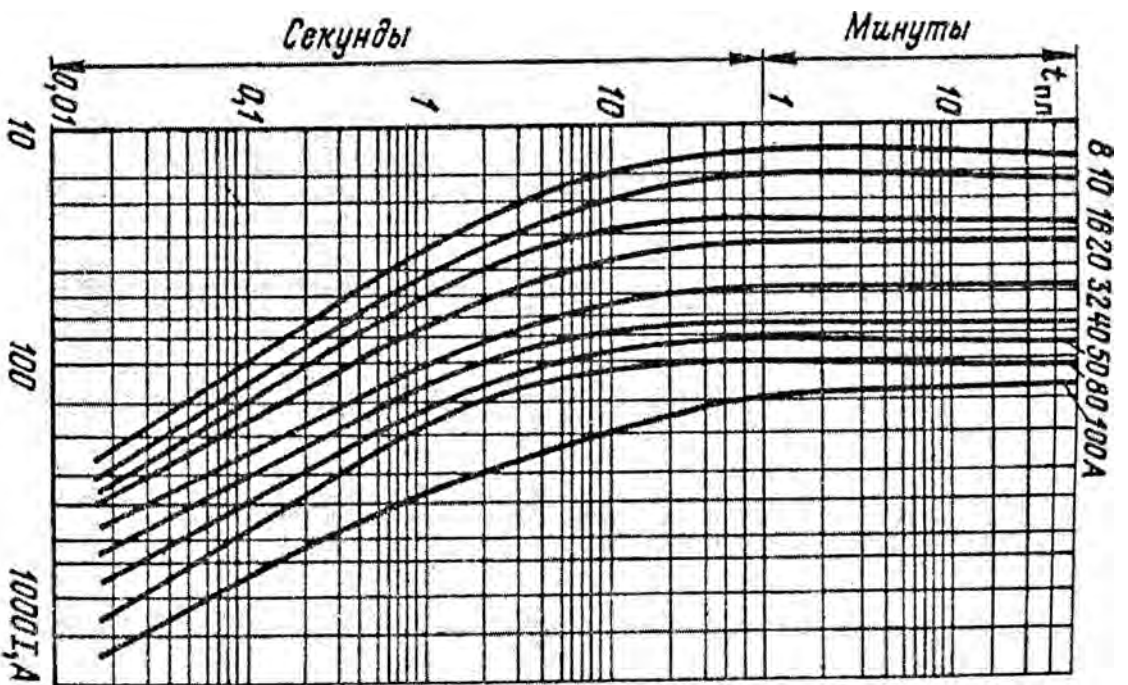
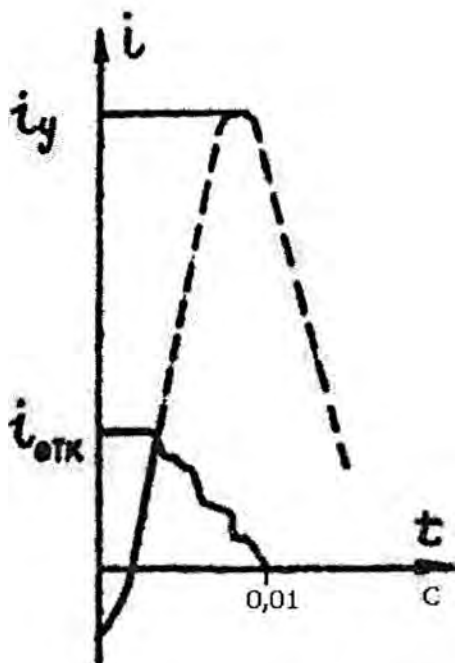


Рис. 6.1

У отдельных типов предохранителей возникающая при разрушении плавкой вставки электрическая дуга деионизируется настолько интенсивно, что гасится раньше, чем ток КЗ достигает своего максимального (ударного) значения (рис. 6.2).



Такое явление называется токоограничивающим действием предохранителя, а сами предохранители – токоограничивающими. При этом электродинамические силы в оборудовании цепи резко уменьшаются, условия их работы облегчаются. Но поскольку отключение цепи происходит со срезом тока (раньше середины полупериода), то в цепи возникают большие перенапряжения и прихо-

дится принимать специальные меры, снижающие перенапряжения до безопасной величины.

Токоограничивающая способность предохранителей может быть представлена зависимостью наибольшего значения пропускаемого тока КЗ от действующего значения периодической составляющей тока КЗ (рис. 6.3).

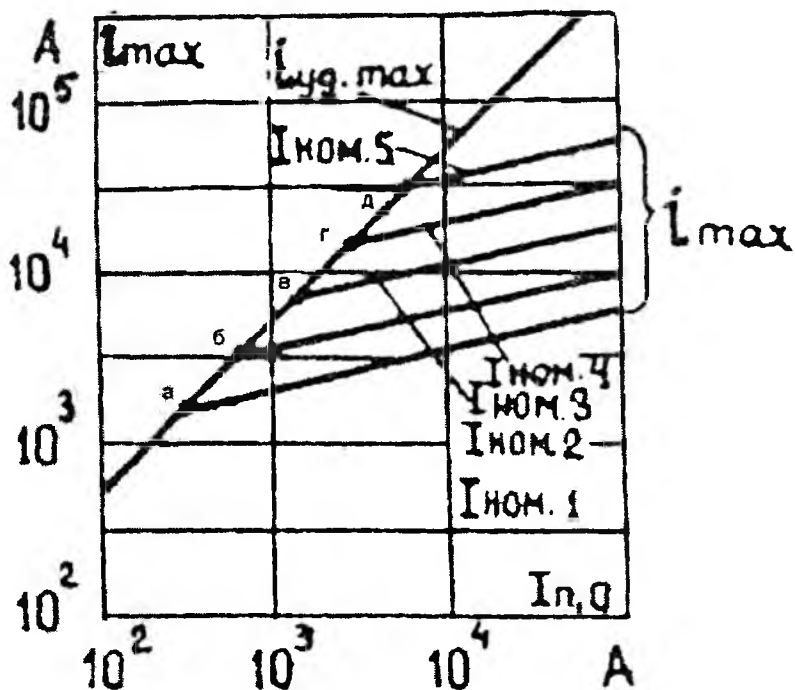


Рис.6.3

В зависимости от способа гашения дуги и конструктивных особенностей предохранители могут быть с наполнителем и автогазовым гашением.

#### *Предохранители с наполнителем*

В установках 3–110 кВ для защиты силовых и измерительных трансформаторов [1, 2], асинхронных короткозамкнутых двигате-

лей, косинусных конденсаторных батарей [3] широко применяются предохранители с мелкозернистым наполнителем (кварцевым песком).

Предохранители серии ПК (образец № 1 лабораторного стенда имеют металлическое основание с изоляторами, контактную систему с зажимами для присоединения токоведущих частей цепи, патрон с плавкой вставкой.

Патрон предохранителя ПК (образец № 2) представляет собой фарфоровую (стеклянную) трубку 1, армированную по концам латунными колпачками 2. Внутри трубки размещается плавкая вставка из меди или серебра. Для обеспечения нормальных условий гашения дуги плавкая вставка должна иметь значительную длину и малое сечение. Это достигается применением нескольких параллельных вставок, намотанных на ребристый керамический сердечник или выполненных спирально. Чтобы уменьшить температуру плавления вставок, на них в нескольких местах напаяны оловянные шарики. Патрон со вставкой засыпается кварцевым песком, закрывается торцевыми крышками и запаивается герметически.

На нижней крышке патрона имеется указатель срабатывания. Он состоит из втулки с пружиной, натянутой тонкой стальной проволокой-вставкой. При перегорании медных плавких вставок перегорает и стальная, пружина освобождается и выскакивает из втулки наружу, сигнализируя, что предохранитель сработал.

Возникающая при перегорании вставки дуга горит в узком извилистом канале и, соприкасаясь с сыпучим песком, хорошо охлаждается и гаснет за время 0,005–0,007 с. Возникающие при этом перенапряжения могут быть значительными. Чтобы ограничить их величиной 3–4  $U_{\phi}$ , плавкие вставки выполняют из проволок имеющих по длине 2–3 разных сечения. В отдельных конструкциях кварцевых предохранителей для этого могут устанавливаться вспомогательные вставки с искровыми промежутками.

Характеристика токоограничения предохранителей ПК приведена на рис. 6.3 [1]. Наклонная прямая  $i_{уд}$  дает значение ударного тока при  $T_a = 0,05$  с. Наклонные прямые, обозначенные  $i_{max}$ , определяют наибольшие мгновенные значения тока, пропускаемого предохранителями с разным номинальным током плавких вставок. Как видно из рис. 6.3, ограничение тока (точки а, б, в, г, д) имеет место при

отключаемом токе  $I_{\text{по}}$ , превышающем некоторое минимальное значение, зависящее от номинального тока вставки. Защитная характеристика предохранителей ПК приведена на рис. 6.1 [2].

Для защиты измерительных трансформаторов напряжения применяются предохранители типа ПКН и ПКТУ. Они отличаются тем, что плавкая вставка изготавливается из константовой проволоки с четырьмя разными сечениями по длине. Плавкая вставка наматывается на керамический сердечник и имеет значительное сопротивление. Эти предохранители являются также токоограничивающими.

В странах Западной Европы высоковольтные предохранители с наполнителем широко используются для высоковольтных пускателей и реверсоров. Обычно они встраиваются в комплектные выдвижные вакуумные пускатели [6].

### *Предохранители с автогазовым гашением*

Предохранители с автогазовым гашением дуги предназначены для наружной установки в РУ10, 35 и 110 кВ. Обычно они применяются для защиты трансформаторов комплектных трансформаторных подстанций.

Предохранители с автогазовым гашением дуги марки ПВТ (рис. 6.4 а) состоят из основания 1, двух изоляторов 2, верхней контактной головки 3, патрона 4, наружного коммутающего механизма 6 с контактным подпружиненным ножом 5.

Верхняя контактная головка смонтирована на верхнем опорном изоляторе и представляет собой стальную трубу с устройством для удержания патрона и линейным выводом.

Патрон предохранителя (рис. 6.4 б) состоит из соединенных между собой винипластовой трубки 7 и оголовника 3. Внутри патрона находится токопровод, состоящий из двух электродов (8 и 11), соединенных плавкой вставкой 10; отключающая пружина 6 с гибкой связью 5. Внутренний токопровод в рабочем состоянии закрепляется в оголовнике при помощи пробки 2, а с другого конца фиксируется штифтом 12. Плавкая вставка включает в себя два контакта, натяжной элемент из нихромовой проволоки, плавкий элемент, выполненный из медной спирали.

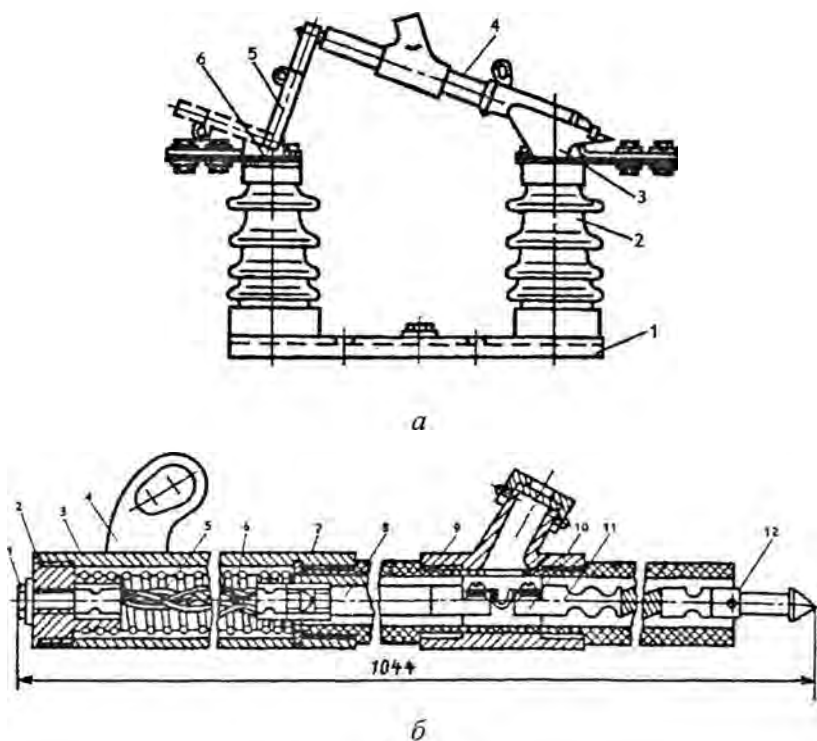


Рис. 6.4

При протекании тока КЗ или тока перегрузки плавкая вставка разрушается, между контактами возникает дуга. Возникающая дуга растягивается, поскольку отключающая пружина перемещает электрод 8, а пружина контактного механизма – электрод 11 в противоположные стороны. Под действием высокой температуры дуги материал дугогасительного канала разлагается с образованием большого количества газов. Внутри дугогасительного канала возникает давление (до 10–20 МПа), и создается поперечно-продольное дутье через канал патрубка 9 и нижнее отверстие патрона. Дуга быстро гасится.

Под действием контактной пружины контактный нож (см. рис. 6.4 а) поворачивается, вытягивая электрод 2 из патрона и обеспечивая тем самым видимый разрыв электрической цепи.

Гашение электрической дуги сопровождается выбросом раскаленных газов вниз под углом и резким звуком. В этой связи предохранители ПВТ еще называют стреляющими. Их устанавливают в ОРУ так, чтобы в зоне выхлопа не находились электрические аппараты.

Предохранители ПВТ не являются токоограничивающими. Их изготавливают на номинальный ток 100 А и номинальный ток отключения 15 кА.

На базе рассмотренной конструкции предохранителя разработаны управляемые автогазовые выключатели нагрузки (УПСН-35, УПСН-110). Они выполнены конструктивно так же, но имеют привод контактного ножа 5 (см. рис. 6.4 а). При воздействии привода на нож плавкая вставка разрывается, возникающая дуга гасится, и поэтому после отключения требуется последующая перезарядка патрона.

### *Ограничители ударного тока*

Ограничители ударного тока (ОУТ) – это сверхбыстродействующие коммутационные аппараты взрывного действия. Они изготавливаются для установок с большими номинальными токами (2000–4500 А) при напряжениях 6–30 кВ и позволяют ограничивать токи трехфазных КЗ в генераторных сетях электростанций, подстанций (рис. 6.5 в, г), токи однофазных замыканий в сетях с эффективно заземленной нейтралью (рис. 6.5 д) и др.

Ограничители ударного тока (рис. 6.5 а, б) имеют изоляционную конструкцию, коммутационное устройство 2, токоведущий проводник с пиропатроном 3, предохранитель 4, блок управления 5, разрядное устройство 6 и разделительный трансформатор.

При возникновении КЗ блок управления реагирует на скорость изменения тока  $\frac{di}{dt}$ , замыкает цепь разрядного устройства и через разделительный трансформатор подает импульс на капсюль-детонатор пиропатрона. Происходит взрыв пиропатрона, и основная цепь размыкается за 0,1 мс. После этого ток проходит по вспомогательной цепи через предохранитель 4. Предохранитель перегорает, и цепь оказывается окончательно отключенной за время не более



5 мс. (1/4 периода), т. е. когда ток в цепи не достигает ударного значения.

После срабатывания ОУТ необходима замена токоведущего проводника и предохранителя.

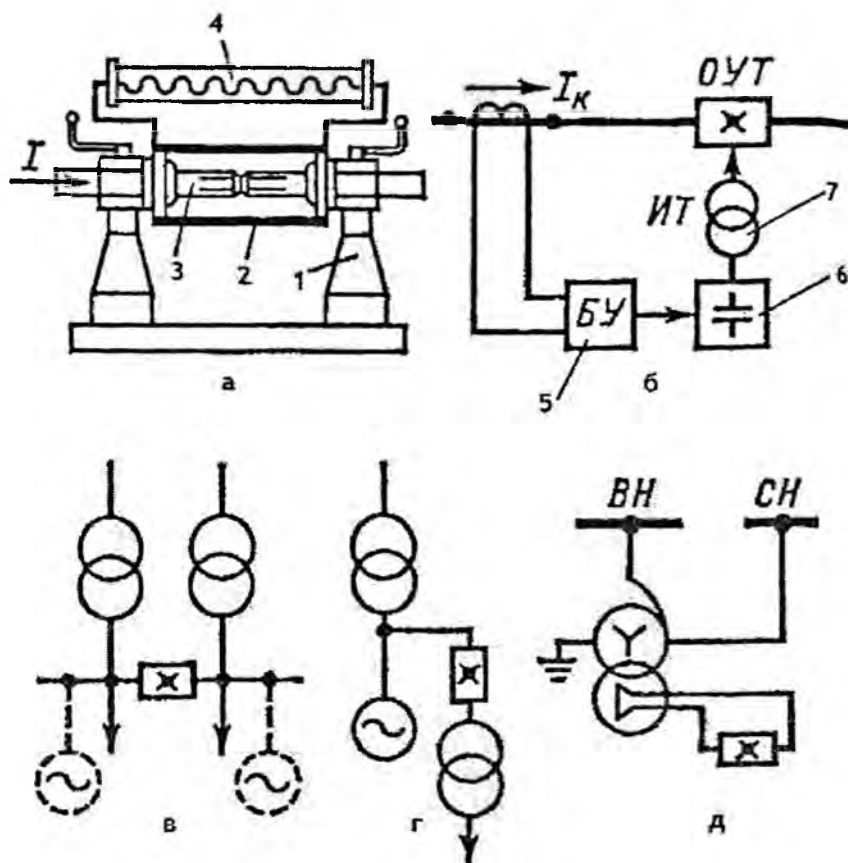


Рис. 6.5

### Задание по работе

1. Изучить теоретические сведения, приведенные в настоящей разработке.

2. Изучить конструктивное исполнение высоковольтных предохранителей, представленных на лабораторном стенде.
3. Снять защитную характеристику открытого трубчатого предохранителя без кварцевой засыпки и определить номинальный ток используемой плавкой вставки.
4. Составить отчет о выполненной работе.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка включает в себя стенд с патронами высоковольтных предохранителей и экспериментальную установку для снятия защитной характеристики исследуемого трубчатого предохранителя со сменяемыми плавкими вставками из медной проволоки малого сечения.

Исследуемый предохранитель испытывается в однофазной цепи с активно-индуктивной нагрузкой. Непосредственно предохранитель размещается во взрывной камере. Электрическая схема установки приведена на рис. 6.6.

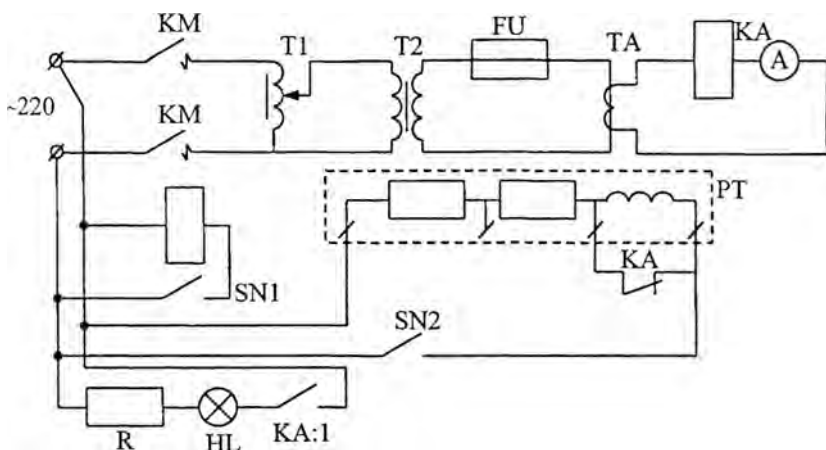


Рис. 6.6

Результаты испытания предохранителя на рассматриваемой установке не могут иметь высокую точность. Основными причинами погрешностей является то, что величина тока при экспериментах

меняется в определенных пределах из-за роста сопротивления нагреваемой плавкой вставки; испытываемые плавкие вставки не калиброваны по сечению; установка не позволяет в каждом эксперименте осуществлять включение цепи в один и тот же момент времени изменения напряжения источника; значение тока не фиксируется автоматически, а устанавливается визуально по показаниям амперметра.

Однако полученные результаты в учебной лаборатории позволяют наглядно представить физику процесса, уяснить принципы определения параметров предохранителей и причины разброса токов их срабатывания.

### **Методические указания и порядок выполнения работы**

Для выполнения лабораторной работы необходимо получить у преподавателя комплект плавких вставок. После изучения материала настоящей разработки и обдумывания задач работы подготовиться к снятию защитной характеристики плавкой вставки. С этой целью открывается крышка взрывной камеры, достается стеклянная трубка предохранителя с контактами. Отрезок медной проволоки, используемый в качестве плавкой вставки, закрепляется винтами к контактам стеклянного корпуса, и заряженный предохранитель вставляется в контактные ламели взрывной камеры. Закрывается крышка взрывной камеры, и собирается схема (рис. 6.6). Включением тумблера SN1 подается напряжение на установку. С помощью ЛАТРа плавно увеличивается напряжение до значения, при котором загорается сигнальная лампа. При этом тумблер SN1 отключается, и включается тумблер SN2.

После включения тумблера SN1 на установку подается напряжение, по амперметру фиксируется ток и время перегорания плавкой вставки по электрическому секундомеру.

После перегорания вставки отключается тумблер SN1. Через 5 минут открывается взрывная камера, предохранитель перезаряжается новой вставкой и закрепляется в камере. Закрыв камеру сдвигают рукоятку ЛАТРа 8–15 мм в сторону увеличения напряжения. Установив стрелку секундомера на «0», включают тумблер SN1. Записывают показатели амперметра и секундомера. После перегорания

вставки опыт повторяют многократно, сдвигая каждый раз рукоятку ДАТРа на новое деление.

Обработав результаты испытаний и построив защитную характеристику плавкой вставки, определяют ее номинальный ток.

### **Техника безопасности**

При выполнении работы следует соблюдать инструкцию по технике безопасности при работе в лаборатории электрических станций.

Во избежание ожогов замену плавких вставок производить только через 5–6 минут после опыта.

Опыт производить обязательно при закрытой взрывной камере.

### **Содержание отчета**

1. Наименование и цель работы.
2. Параметры предохранителей ПК и ПВТ.
3. Схемы включения ограничителей ударного тока.
4. Защитная характеристика испытанной плавкой вставки и значение ее номинального тока.

### **Контрольные вопросы**

1. Расскажите о принципе действия предохранителей и их параметрах.
2. Чем отличается номинальный ток предохранителя от номинального тока плавкой вставки?
3. С какой целью на плавкие вставки из тугоплавких материалов наплавляются оловянные шарики?
4. Чем объясняется токоограничивающий эффект кварцевых предохранителей и какие меры применяются в их конструкциях для ограничения возникающих при срабатывании перенапряжений?
5. Почему плавкие вставки предохранителей ПКН выполнены из константана?
6. Почему предохранители ПВТ называются стреляющими?
7. Что такое ограничитель ударного тока и как он работает?

8. Укажите примеры использования ограничителей ударного тока в схемах электроустановок.

9. Почему при срабатывании ОУТ в схемах (см. рис. 6.5 в, г, д) не возникает значительных перенапряжений?

10. Определите принцип выбора плавких предохранителей для защиты оборудования цепей от КЗ. Как определить номинальный ток вставки по ее защитной характеристике?

**Литература:** [1] (с. 234–237); [2] (с. 184–188); [3] (с. 214–219).

Работу подготовил В.Н. Мазуркевич

## **Лабораторная работа № 7**

### **ПРИВОДЫ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ**

**Цель работы:** освоение принципов устройства приводов выключателей и разъединителей, изучение конструктивного исполнения электромагнитных и пружинных приводов выключателей и ручных приводов разъединителей.

#### **Краткие теоретические сведения**

Включение и отключение коммутационных аппаратов высокого напряжения достигается за счет перемещения их подвижных контактов: при включении – до полного соприкосновения с неподвижными контактами; при отключении – до удаления на необходимое расстояние.

Для выполнения этих операций каждый коммутационный аппарат имеет приводной механизм. Этот механизм состоит из вала аппарата, плоских шарнирных многозвенников, рычагов, изоляционных тяг и так далее, преобразующих вращательное движение вала аппарата в линейное перемещение его подвижных контактов.

Приведение в действие приводного механизма коммутационного аппарата (поворот вала аппарата) осуществляется специальным силовым устройством, называемым приводом. Привод получает энергию от внешнего источника, преобразует ее в механическую энер-

гию и создает необходимые усилия для перемещения звеньев приводного механизма и соответственно контактов аппарата.

Приводы коммутационных аппаратов в большинстве случаев представляют собой отдельный силовой аппарат, использующий энергию, поступающую от энергосистемы, и позволяющий производить операции по включению и отключению аппаратов дистанционно. В связи со спецификой работы коммутационных аппаратов энергия от энергосистемы не поступает непосредственно в привод в процессе выполнения операции, а предварительно преобразуется и аккумулируется с тем, чтобы в аварийных условиях при отсутствии напряжения в энергосистеме обеспечить срабатывание аппарата. Аккумуляция энергии может осуществляться в аккумуляторных батареях, в ресиверах сжатого воздуха, в напряженных пружинах и др.

По виду энергии, используемой для приведения в действие, приводы разделяются:

- на ручные, приводимые в действие мускульной силой человека-оператора;
- двигательные, приводимые в действие энергией внешнего источника.

В свою очередь двигательные приводы могут быть:

- электромагнитными, приводимыми в действие электромагнитом;
- электродвигательными, приводимыми в действие электродвигателем;
- пневматическими, приводимыми в действие энергией сжатого воздуха;
- пневмогидравлическими, приводимыми в действие жидкостью, находящейся под большим давлением, создаваемым сжатым воздухом;
- пружинными, приводимыми в действие энергией, запасенной в предварительно напряженной пружине (спиральной или пластинчатой), и др.

Энергия может подводиться к приводу в процессе выполнения операции или запасаться предварительно. В первом случае привод называют зависимого действия, в другом — независимого действия. Мощность, потребляемая приводом зависимого действия, должна быть большой. Чем больше, тем короче длительность операции. В

приводах независимого действия мощность источника может быть небольшой, но для создания необходимого запаса энергии требуется сравнительно большой промежуток времени. В результате длительность выполнения операции независимым приводом, складываясь из времени включения и времени запаса энергии для следующей операции включения (после отключения), относительно велика.

К приводам коммутационных аппаратов предъявляются следующие требования:

- они должны быть исключительно надежными в эксплуатации;
- операции включения, отключения, многократного повторного включения должны протекать в течение минимального времени;
- должна обеспечиваться возможность отключения и включения при отсутствии энергии в питающей энергосистеме;
- должны иметь механические указатели положения аппарата;
- должны иметь вспомогательные контакты напряжением ниже 1000 В (для использования в цепях сигнализации положения, автоматики и блокировки аппарата).

Основными элементами привода являются: силовое устройство, операционный, запирающий и передаточный механизмы, отключающее устройство и устройство для ручного включения при ремонте.

Силовое устройство преобразует энергию, подводимую к приводу, в механическую энергию (рычаг, электромагнит, электродвигатель и др.).

Операционный механизм передает движение ведущего звена силового устройства к звену передаточного механизма. Он состоит из механизма, преобразующего вид движения (например, на рис. 7.1 поступательное движение штока 2 во вращательное вала привода 13), запирающего механизма и механизма управления вспомогательными контактами.

Запирающий механизм удерживает механизм привода и связанный с ним приводной механизм аппарата во включенном положении. Этот механизм соединяет одно из звеньев операционного механизма с временно неподвижным звеном. Сила, стремящаяся вывести подвижные части аппарата из заданного положения, воспринимается этим неподвижным звеном, и механизм оказывается запертым.

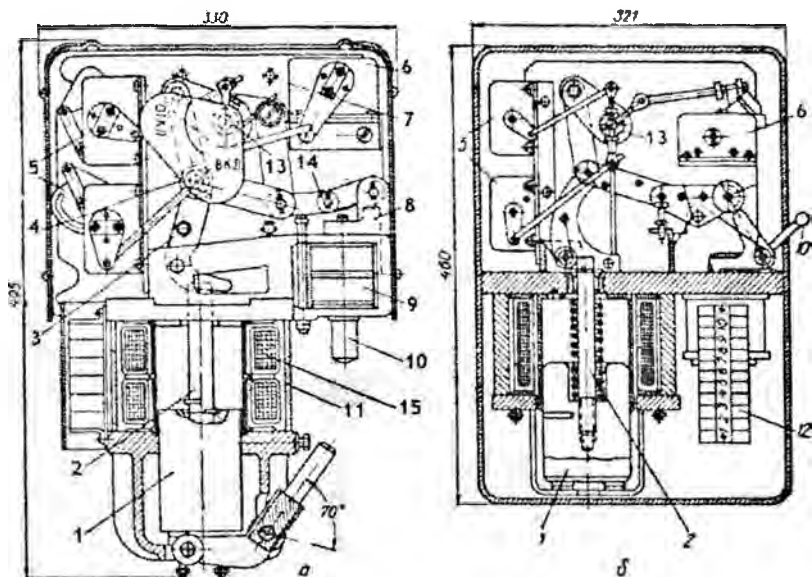


Рис. 7.1. Привод электромагнитный:

*a* – привод соленоидный ПС-10; *б* – привод электромагнитный ПЭ-11;  
 1 – стальной сердечник; 2 – шток сердечника; 3 – удерживающая защелка;  
 4 – ролик и его ось; 5 – блок-контакты сигнальные СКБ; 6 – блок-контакты управления КБВ и КВО; 7 – вал с приводным рычагом; 8 – механизм свободного расцепления; 9 – электромагнит отключения; 10 – рычаг (кнопка) ручного отключения;  
 11 – электромагнит включения; 12 – зажимная рейка (сборка); 13 – вал привода;  
 14 – ось «ломающегося» звена механизма свободного расцепления; 15 – обмотка включения

У большинства приводов выключателей в операционном механизме имеется механизм свободного расцепления. Он позволяет беспрепятственно отключить выключатель в ходе операции включения в любой момент. Это уменьшает продолжительность протекания токов короткого замыкания и обгорание контактов выключателя при включении его на короткое замыкание.

Механизм управления вспомогательными контактами обеспечивает передачу движения от одного из звеньев механизма привода к их подвижным контактам.



The diagram illustrates a mechanical linkage system with the following components:

- 1**: A pivot point on a vertical wall, with a curved arrow indicating rotation.
- 2**: A revolute joint connecting link 10 to link 11.
- 3**: A revolute joint connecting link 11 to link 12.
- 4**: A revolute joint connecting link 10 to link 13.
- 5**: A revolute joint connecting link 10 to link 14.
- 6**: A revolute joint connecting link 11 to link 15.
- 7**: A revolute joint connecting link 11 to link 16.
- 8**: A revolute joint connecting link 12 to link 17.
- 9**: A revolute joint connecting link 12 to link 18.
- 10**: A long vertical link.
- 11**: A link with a diagonal hatching pattern.
- 12**: A link with a diagonal hatching pattern.
- 13**: A link with a diagonal hatching pattern.
- 14**: A link with a diagonal hatching pattern.
- 15**: A link with a diagonal hatching pattern.
- 16**: A link with a diagonal hatching pattern.
- 17**: A link with a diagonal hatching pattern.
- 18**: A link with a diagonal hatching pattern.

1 – вал привода; 2 – вал выключателя; 3 – ось вращения двуплечего рычага верхней части полюса; 4 – 9 оси вращения звеньев механизмов; 10 – тяга передаточного механизма; 11 – изоляционная тяга полюса выключателя; 12 – подвижной контакт полюса выключателя; 13 – неподвижный розеточный контакт; 14 – отключающая пружина; 3–8–9–12 – звенья кулисно-ползунного механизма, преобразующего вращательное движение звена 3–8 в поступательное движение звена 9–12; 15 – изоляционный цилиндр полюса выключателя

Отключающее устройство привода освобождает запирающий механизм, под действием отключающих пружин аппарат отключается. Для освобождения запирающего механизма обычно используются электромагниты небольшой мощности.

В ручных приводах включение и отключение осуществляется мускульной силой оператора. Для этого поворачивается рычаг привода, через передаточный механизм движение передается к подвижным контактам. Кинематическая схема таких приводов проста и наглядна.

При ремонтах приводов необходимо иметь возможность их ручного включения. Это может осуществляться отдельным специальным рычагом или домкратом.

### *Электромагнитные приводы выключателей*

Принципы устройства и работы электромагнитных приводов (ЭП) основаны на электродинамическом взаимодействии между ферромагнитным сердечником и током, протекающим по обмотке электромагнита (катушке). В результате взаимодействия сердечник втягивается в катушку. Движение сердечника через операционный и передаточный механизмы передается на приводной механизм выключателя.

Электромагнитные приводы изготавливаются для работы на постоянном или выпрямленном токе.

Основными достоинствами ЭП являются:

- простота конструкции;
- компактность;
- высокая надежность;
- возможность осуществления многократного автоматического повторного включения выключателя (многократное АПВ).

Однако ЭП потребляют большие токи при включении (100–700 А) и требуют мощных источников питания. Большая же индуктивность катушек, замедляющая нарастание тока в них при включении, и невозможность регулирования скорости движения сердечника обуславливают относительно большое время включения этих приводов.

Заводы-изготовители оснащают ЭП выключатели разных типов напряжением до 220 кВ включительно. Наиболее часто для масля-

ных и электромагнитных выключателей применяются приводы типа ПС (привод соленоидный) и ПЭ (привод электромагнитный), предназначенные для внутренней установки. Для наружной установки их помещают в шкафы из листовой стали, в типовое обозначение вводят букву Ш – ШПС, ШПЭ. Обе серии приводов работают на постоянном оперативном токе 110 или 220 В и изготавливаются на разное тяговое усилие: ПС-10; ПС-20; ПС-30; ПС-31; ПЭ-11; ПЭ-12; ПЭ-21; ПЭ-31; ПЭ-44; ПЭ-46. Приводы серии ПЭ имеют улучшенные технико-экономические показатели и повышенную надежность.

Конструктивно ПЭ (см. рис. 7.1) состоит из корпуса с операционным механизмом, электромагнитной системы и основания. В корпусе операционного механизма закреплены электромагнит отключения 9, вспомогательные контакты цепей управления выключателем 5, 6, механизм ручного отключения и механический указатель положения выключателя.

Электромагнитная система включения расположена в нижней части привода и состоит из магнитопровода, обмотки 15 и сердечника 1 со штоком 2. Магнитопровод изготавливается из мягкой низкоуглеродистой стали или чугуна (в приводе ПС) и состоит из двух толстых плит и корпуса, стянутых шпильками. Внутри магнитопровода располагается обмотка включения 15, внутренняя поверхность которой защищена от повреждения при движении сердечника стальной гильзой.

Сердечник со штоком стальные и имеют цилиндрическую форму. Для предотвращения прилипания сердечника к верхней плите при соприкосновении с ней на шток надета отжимающая пружина. Но одна отжимающая пружина не может устранить прилипания сердечника к верхней плите магнитопровода. Поэтому к нижней поверхности верхней плиты магнитопровода прикреплена шайба из немагнитного материала толщиной 0,5–1,5 мм.

Размеры магнитной системы определяются необходимой для включения тяговой силой. Соответственно масса сердечника в разных приводах разная и изменяется в пределах от единицы до 100 кг и более.

После завершения операции включения под действием сил тяжести и отжимающей пружины сердечник опускается со скоростью свободно падающего тела. Для поглощения кинетической энергии

дающего сердечника в нижней части корпуса привода предусматривается резиновый или пружинный буфер.

Все составные части привода устанавливаются на стальном или чугунном основании. При этом предусматривается закрепление привода в вертикальном положении.

При включении выключателя ток подается в электромагнит включения 11 (см. рис. 7.1), сердечник 1 втягивается в катушку. Шток сердечника 2 упирается в ролик 4 операционного механизма и поднимает его вверх вместе с двумя шарнирно связанными рычагами. При этом происходит поворот вала привода 13. Через передаточный механизм движение вала привода передается на вал выключателя, а через приводной механизм выключателя — на его подвижные контакты (см. рис. 7.2). Одновременно растягиваются отключающие пружины 14 (см. рис. 7.2).

Ролик 4, поднимаясь вверх, скользит по поверхности защелки 3, подвигая ее влево. В конце хода сердечника по окончании процесса включения верхний срез защелки заскакивает под ролик и удерживает механизм во включенном положении.

В конце включения вспомогательные контакты 5 разрывают цепь электромагнита включения, протекание тока по катушке прекращается, сердечник 1 падает на резиновый буфер и становится в свое начальное положение.

В устройстве отключения ЭП применяется механизм свободного расцепления. У приводов серии ПС он выполнен с «ломающимся» звеном. В положении «Включено», «Отключено» ось «ломающегося» звена 14 располагается ниже линии осей вращения составляющих звеньев. При этом левое звено прижато к винтовому упору. Для отключения выключателя подается ток в обмотку электромагнита отключения. Его сердечник втягивается в катушку и бойком ударяется в звено 8. Ось 14 поднимается выше линии центров вращения соседних звеньев, и механизм свободного расцепления «сламывается». Ролик 4 скатывается с упора, и под действием отключающих пружин выключатель отключается.

Привод ПС-10 дополнительно имеет механическую блокировку против повторения включения и отключения, когда команда на включение не снята. Блокировка обуславливается специальным профилем внутреннего контура защелки 3, который не позволяет операционному механизму полностью сложиться до тех пор, пока

ось, на которой закреплен ролик 4, не окажется против выреза в за-  
щелке, т. е. до полностью отключенного положения.

Таким образом, если отключение выключателя происходит в  
момент, когда рукоятка ключа управления выключателем находится  
еще в положении «включить», то цепь электромагнита включения  
замыкается, и его сердечник снова поднимается. Однако он подни-  
мается вхолостую, так как механизм привода еще не успел полно-  
стью сложиться и включения не происходит. В подтянутом поло-  
жении сердечник остается до момента размыкания цепи электро-  
магнита включения ключом управления.

В приводах ПЭ применена электрическая блокировка против по-  
вторения включения и отключения, когда команда на включение не  
снята.

Управление выключателем осуществляется дистанционно, т. е.  
подачей соответствующей команды со щита управления. Для этого  
на щите управления установлен ключ управления выключателем.  
Поворотом рукоятки ключа замыкается цепь, и по электромагниту  
включения или отключения привода протекает ток, и выключатель  
включается или отключается. В случае повреждения на линии вы-  
ключатель отключается автоматически от действия устройств ре-  
лейной защиты. Принципиальная упрощенная схема дистанционно-  
го управления выключателем с электромагнитным приводом приве-  
дена на рис. 7.3.

Схема управления выполнена для отключенного положения Q.  
Его вспомогательные контакты Q:2, Q:4 замкнуты, а Q:1, Q:3 ра-  
зомкнуты. Ключ SA находится в положении «0» (отключено), и его  
контакты 24–22 замкнуты.

При этом горит зеленая лампа HLG, так как через нее протекает  
ток по цепи: шинка +ЕС, плавкий предохранитель FU1, контакты  
24–22 SA, лампа HLG, вспомогательный контакт выключателя Q:2,  
предохранитель FU2, шинка – ЕС. Горение зеленой лампы сигнали-  
зирует о том, что выключатель Q отключен.

Для включения выключателя необходимо подать ток на элек-  
тромагнит включения YAC. Но он потребляет ток величиной деся-  
тки или сотни ампер. Естественно, что пропустить такой ток через  
контакты ключа управления невозможно.

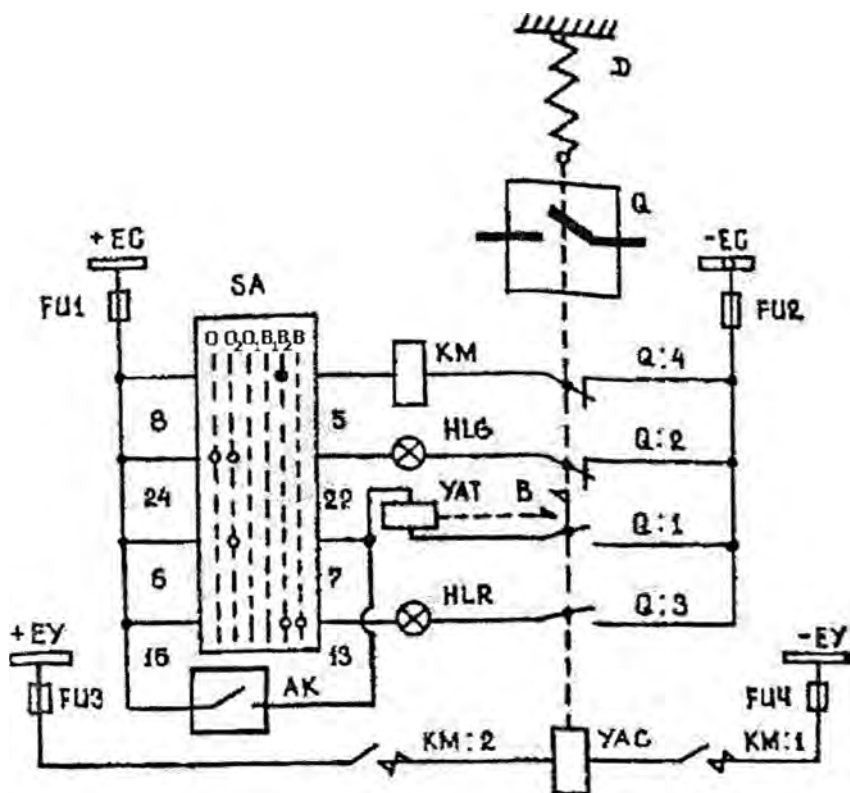


Рис. 7.3. Принципиальная упрощенная схема дистанционного управления выключателем с электромагнитным приводом:

SA — ключ управления выключателем; KM — контактор промежуточный; Q — высоковольтный выключатель; Q:1 — Q:4 — вспомогательные контакты цепей управления и сигнализации выключателя; HLG — сигнальная лампа с зеленой линзой; HLR — лампа сигнальная с красной линзой; YAT — электромагнит отключения; YAC — электромагнит включения; ЕС — шинки питания цепей управления; ЕУ — шинки питания электромагнита включения; FU — предохранитель плавкий; АК — устройство релейной защиты; D — отключающая пружина

В этой связи включение тока в цепи включающего электромагнита YAC осуществляется промежуточным контактором KM.

При включении выключателя Q поворачивают рукоятку ключа управления SA на 90° по часовой стрелке в положение B<sub>1</sub> (предварительно включено). Зеленая лампа гаснет. Продолжая поворачи-

вать рукоятку ключа еще на  $45^\circ$ , переводят его в позицию  $B_2$  (включить). При этом замыкаются контакты 8–5 SA и срабатывает контактор КМ. Контакты контактора КМ:1, КМ:2 замыкаются, по YAC привода протекает ток, сердечник втягивается в катушку, и выключатель Q включается. Его вспомогательные контакты Q:2, Q:4 замыкаются, а контакты Q:1, Q:3 замыкаются, одновременно растягивается отключающая пружина.

Включенное положение выключателя фиксируется механической защелкой В.

При размыкании контакта Q:4 прерывается ток в цепи катушки промежуточного контактора КМ, и его контакты также размыкаются. Разомкнувшимися контактами КМ:1, КМ:2 разрывается цепь тока по включающему электромагниту YAC, и его сердечник возвращается в исходное положение.

Замкнувшимися контактами Q:1 подготавливается цепь на отключение выключателя, а контакты Q:3 обеспечивают горение красной лампы HLR.

После включения выключателя рукоятку ключа SA отпускают, и она устанавливается в положение В (включено).

Для отключения выключателя рукоятку ключа SA поворачивают против часовой стрелки сначала на  $90^\circ$ , а затем еще на  $45^\circ$ , переводя ее в положение  $Q_2$  (отключить). При этом по отключающему электромагниту YAT протекает ток. Его сердечник втягивается в катушку, бойком ударяя под «ломающееся» звено механизма свободного расцепления (освобождается защелка В). Под действием отключающей пружины D выключатель Q отключается.

Вспомогательные контакты Q:1, Q:3 при этом размыкаются, а контакты Q:2, Q:4 замыкаются. Гаснет красная и загорается зеленая лампа. После выполнения операции отключения рукоятку ключа опускают, и она устанавливается в положение «О» (отключено).

Автоматическое отключение выключателя осуществляется при срабатывании устройств релейной защиты (АК). При этом замыкается контакт АК, по отключающему электромагниту YAT протекает ток, сердечник втягивается в катушку, освобождается запирающий механизм В, и выключатель Q отключается.

Рассмотренная упрощенная схема дистанционного управления выключателем позволяет понять принципы управления выключателем с электромагнитным приводом, но на практике не применяется.

Применяемые на практике схемы значительно сложнее, хотя в их основе лежит рассмотренный принцип.

В современных электромагнитных приводах для уменьшения времени срабатывания используются полупроводниковые элементы, а для отключения применяется разряд предварительно заряженного конденсатора.

### *Пружинные приводы*

В пружинных приводах двигателем и аккумулятором энергии является предварительно напряженная пружина. Напряжение пружины осуществляется небольшим электродвигателем с редуктором или многократным возвратно-поступательным движением сердечника электромагнита, соединенных с заводящим механизмом.

Операция включения осуществляется только после полного завода пружины. Для этого предусматривается небольшой электромагнит, при срабатывании которого включающая пружина освобождается. Под ее действием выключатель включается. Как только процесс включения завершен, автоматически происходит завод включающей пружины вновь. Таким образом, привод подготавливается к повторному включению. Время завода пружины составляет меньше 10 с. Следовательно, выключатель с пружинным приводом может выполнять многократное автоматическое повторное включение через 10 с.

Пружинные приводы применяются для выключателей, требующих для включения работы до 400 Н·м и обладающих некрутой тяговой характеристикой [7]. Они изготавливаются выносными и встроенными. Встроенные приводы упрощают конструкцию выключателя, уменьшают его габариты и массу. Обычно они применяются для привода маломасляных выключателей 10–35 кВ комплектных распределительных устройств. Кинематическая схема этих приводов достаточно сложная.

Встроенный пружинный привод выключателя ВМП-10П состоит из корпуса (см. образец № 2 лабораторного стенда), вала привода 1 (номера позиций указаны на образце привода), механизмов включения 3 и отключения 4, включающих и отключающих пружин, электромагнитов управления 5, 8, 9 и реле защиты 6, 7, 10, 11. На валу привода установлен барабан 12 с пластинчатыми пружинами вклю-



чения. Заводка пружин осуществляется электромагнитом заводки 13 через рычаг и обгонную муфту 14. При включении выключателя подается напряжение на включающую катушку 5 (или при нажатии кнопки ручного включения 15) и под действием включающих пружин вал привода поворачивается, выключатель включается. С помощью тяг и рычагов запорное устройство становится на защелку 16 и удерживает выключатель во включенном положении. Отключение выключателя происходит при подаче импульса на отключающую катушку 9, или на один из элементов релейного блока, или при нажатии кнопки ручного отключения. При этом запорное устройство освобождает вал выключателя 2, и под действием отключающих пружин 19 выключатель отключается.

На приводе имеется ряд электромеханических блокировок, препятствующих неправильной работе. В верхней части привода установлены катушки электромагнитов управления 5, 8, 9 и реле прямого действия 6, 7, 10, 11. Применяются реле максимального тока мгновенного действия (РТМ) 10, 11 и реле с выдержкой времени (РТВ) 6, 7. Конструктивно токовые реле прямого действия представляют собой электромагнит с сердечником. При достижении тока уставки сердечник втягивается в электромагнит, шток ударяет в вал запорного устройства 18, освобождает запорную защелку 16 и выключатель отключается. Ток срабатывания РТМ изменяется в пределах от 5 до 120 А путем переключения ответвленной обмотки электромагнита. Реле РТВ имеет диапазоны токов уставок от 5 до 35 А, время срабатывания от 2 до 16 с. Обмотки реле прямого действия питаются от трансформаторов тока либо от независимого источника переменного тока.

Кроме того, для автоматического отключения в установках, где в качестве оперативного тока используется ток от трансформаторов тока, предусмотрен отдельный электромагнит 8.

В других конструкциях пружинных приводов и включение, и отключение осуществляется от одного барабана с пружинами. В зависимости от особенностей конструкции эти приводы могут обеспечить выполнение одной, или большего числа операций (включения и отключения) при полностью заведенных пружинах без их подзавода. Время заводки пружин на 2 операции не превышает 20 с, а на 5 заводов – 50 с [7].

## Приводы разъединителей

Разъединители предназначены для создания видимого разрыва в электрической цепи при ремонтах оборудования. Они имеют главные и заземляющие ножи.

Для управления главными и заземляющими ножами применяются отдельные ручные, двигательные и пневматические приводы. Ручные приводы используются для управления главными ножами разъединителей напряжением до 220 кВ и заземляющими ножами разъединителей всех типов и напряжений. Двигательные и пневматические приводы позволяют осуществлять дистанционное включение и отключение разъединителей и применяются для аппаратов всех напряжений.

Трехполюсные разъединители внутренней установки обычно управляются ручными рычажными приводами ПР-2 и ПР-3 (рис. 7.4).

Эти приводы устанавливаются на стенках вертикально и имеют рычаг 1, который под воздействием руки оператора поворачивается вокруг оси примерно на  $150^\circ$ . Через тягу 2 движение подается поворотным секторам 3, от них — к тяге 4 и через рычаг — к валу разъединителя. При повороте вала разъединителя движение передается через изоляционную тягу ножам. Когда подвижные контакты разъединителя достигают крайнего положения, привод механически фиксируется подпружиненным фиксатором.

Чем больше номинальный ток разъединителя, тем больше сила трения в контактах. В этой связи в качестве приводов главных ножей разъединителей внутренней установки на токи 4000 А и больше применяются червячные приводы. Заземляющие же ножи управляются как и в предыдущем случае рычажным приводом.

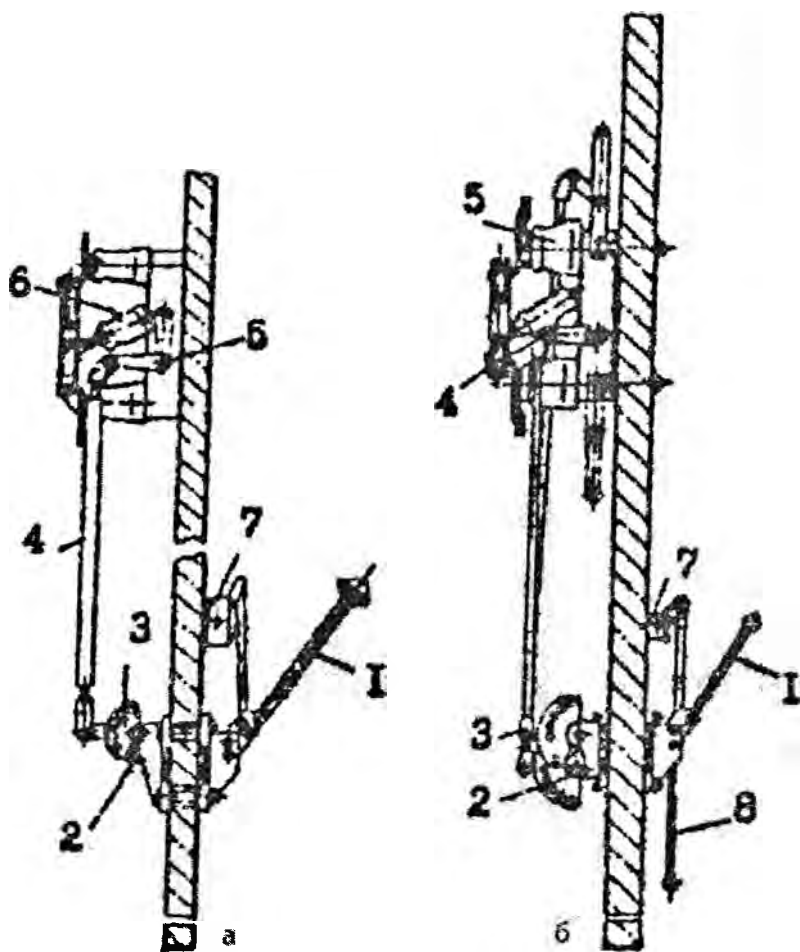


Рис. 7.4. Привод рычажный типа ПР-2 (показано во включенном состоянии разъединителя):

*а, б* – без и с заземляющими ножами:

*1* – рычаг; *2* – тяга, передающая движение от рычага к двум поворотным секторам *3*; *4* – тяга, передающая движение от секторов к валу разъединителя *5*; *б* – тяга-изолятор, передающий движение от вала разъединителя к его ножам; *7* – вспомогательные контакты (блок-контакты); *8* – рычаг включения заземляющих ножей

Между приводами главных и заземляющих ножей в разъединителях обязательно предусматриваются блокировки. Эти блокировки исключают возможность включения заземляющих ножей при включенных главных и главных ножей — при включенных заземляющих. Они выполняются механически и могут дополняться электромагнитными блок-замками. В простейшем случае запирающие приводы во включенном и отключенном положениях осуществляются навесными замками. Дужка замка продевается сквозь отверстия специально предусмотренных элементов, и замок запирается, фиксируя положение разъединителя.

Для контроля положения разъединителей приводы оснащаются вспомогательными контактами. Подвижные контакты их механически соединяются с одним из элементов привода, а при изменении его положения меняется и положение вспомогательных контактов.

Приводы для разъединителей наружной установки изготавливаются с поворотом рычага в горизонтальной плоскости (привод типа ПР-У1). Все элементы привода (диски, фиксаторы, блокировочная рейка, блок-замки) размещаются внутри корпуса привода и закрываются от атмосферных воздействий кожухом. При оперировании разъединителем этот кожух открывается.

Для оперирования ножами разъединителя, имеющими большую массу и момент инерции, ручные приводы выполняются со встроенным цилиндрическим редуктором (ПРН-1). Редуктор имеет две ступени передачи и приводится в движение вращающейся рукояткой.

Дистанционное управление колонковыми разъединителями наружной установки на 110–750 кВ осуществляется электродвигательными приводами ПДН-1У1 или ПДН-1ХЛ1, работающими на переменном токе 220/380 В. Все элементы этих приводов расположены внутри металлического шкафа. Передача движения от вала электродвигателя к валу привода осуществляется через редуктор, состоящий из червячной передачи и двух пар зубчатых колес. Движение от вала привода к ведущей колонке разъединителя передается горизонтальной тягой.

Для управления подвесными разъединителями используются пневматические приводы. Чаще всего при этом используется поршневой привод. Для его работы требуется сжатый воздух 2 (0,6) МПа.

Сжатый воздух к приводу поступает от компрессорной установки по трубопроводам.

### **Задание по работе**

1. Ознакомится с назначением приводов коммутационных аппаратов и принципами их работы.
2. Изучить электромагнитный привод ПС-10 и исследовать его работу.
3. Изучить встроенный пружинный привод ПП-60.
4. Изучить ручной рычажный привод разъединителя РЛНДУ-1-10. Составить кинематическую схему передачи движения от рычагов включения привода к подвижным контактам разъединителя.
5. Составить отчет о работе.

### **Описание лабораторной установки**

Лабораторная установка включает в себя отдельно установленные электромагнитный привод ПС-10, встроенный пружинный привод ПП-60 с ручным рычажным приводом, разъединитель РЛНДУ-1-10 и стенд. На стенде смонтирована аппаратура управления электромагнитным приводом ПС-10, приводится схема управления им. Выводы аппаратов, показанных на схеме управления, соединены с смонтированными в соответствующих местах схемы гнездами для подключения внешних проводников.

Схема управления приводом ПС-10 питается постоянным током 220 В, подводимым к схеме отдельным кабелем. Питание электромагнита включения привода осуществляется другим кабелем. Связь между приводом и стендом осуществляется третьим кабелем. Все питающие кабели имеют штыревые разъемы по концам.

Встроенный пружинный привод установлен рядом с приводом ПС-10. Все элементы привода пронумерованы, и эти номера используются в тексте настоящей методической разработки.

Ручной привод ПРНЗ-10Т смонтирован на трехфазном разъединителе РЛНДУ-1-10. Элементы привода пронумерованы.

## Методические указания и порядок выполнения работы

Перед выполнением работы необходимо предварительно по настоящей разработке и названной в ней литературе ознакомиться с назначением и принципами работы приводов коммутационных аппаратов.

Для изучения электромагнитного привода ПС-10 необходимо определить назначение каждого элемента конструкции. Установив рычаг ручного включения, медленно включать привод, рассматривая движение каждого звена. Произвести отключение привода, поднимая рукой сердечник электромагнита отключения. После уяснения работы операционного механизма требуется составить его кинематическую схему. Далее необходимо разобраться, как осуществляется передача движения от вала привода к подвижным контактам блок-контактов и как можно регулировать моменты их замыкания и размыкания.

После изучения конструкции привода собирается схема дистанционного управления им (схема показана на стенде). Для исследования изменения тока во включающем электромагните к шунту в цепи этого электромагнита подключается осциллограф. Требуемое положение ручек управления осциллографом отмечено точками краски.

Для снятия осциллограммы включается питание осциллографа, после настройки луча ключом управления приводом на стенде подается команда на его включение. Кривую изменения тока в электромагните срисовывают в отчет с экрана осциллографа. Нарисованная кривая должна иметь ось координат с указанием величин тока и времени.

Встроенный пружинный привод демонтирован из шкафа КРУ и установлен отдельно от выключателя.

Привод ПРНЗ-10Т разъединителя РЛНДУ-1-10 имеет дополнительно рукоятку управления заземляющими ножами 2. Последние смонтированы с одной стороны разъединителя. Механизмы привода основных и заземляющих ножей блокируются между собой дисками 3 и 4 с односторонними вырезами. Для фиксации положения ножей разъединителя на приводе установлены эксцентриковые замки 5 и 6, при повороте рукояток которых запираются оси вращения.

В дополнение на дисках приварены угловые элементы 7, 8, 9, 10 с отверстиями для дужек навесного замка.

После знакомства с конструкцией привода необходимо опробовать его работу и составить кинематическую схему передачи движения рычагов включения к подвижным контактам разъединителя.

### **Техника безопасности**

При выполнении работы необходимо соблюдать инструкцию по технике безопасности при работе в лаборатории электрических станций. Во время включения и отключения привода ПС-10 запрещается прикасаться к его частям.

### **Контрольные вопросы**

1. Назначение приводного механизма выключателя и принцип его работы.
2. Назначение механизма свободного расцепления в приводах.
3. Принцип действия и конструктивное исполнение электромагнитных приводов.
4. От чего зависит время включения выключателя с электромагнитным приводом?
5. Как работает механизм свободного расцепления привода ПС-10?
6. Достоинства, недостатки и конструктивное исполнение пружинного привода.
7. Как осуществляется дистанционное управление разъединителями?
8. Конструкция ручного привода типа ПРНЗ-10Т и его кинематическая схема.
9. Почему на приводах разъединителей устанавливаются механические и электрические блокировки главных и заземляющих ножей и как они выполняются?

**Литература:** [1] (с. 269–274); [2] (с. 158–162; 504–514); [7].

Работу подготовил В.Н. Мазуркевич

## Лабораторная работа № 8

### НАГРЕВ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И АППАРАТОВ РАБОЧИМИ ТОКАМИ НАГРУЗОК

**Цель работы:** изучение процесса нагрева неизолированных проводников при протекании по ним рабочих токов нагрузок.

#### Краткие теоретические сведения

##### *Потери в проводниках при переменном токе*

Токосоведущие части электроустановок и провода линий электропередачи выполняются из алюминия, сталеалюминия, стали, а электрических аппаратов – из меди и ее сплавов.

При протекании тока по токосоведущим частям и аппаратам в их сопротивлении происходят потери энергии. Вся потерянная энергия преобразуется в тепло и нагревает проводники и аппараты выше температуры окружающей среды.

Наибольшие температуры нагрева токосоведущих частей ограничены конкретными значениями, указанными в «Правилах устройства электроустановок» (ПУЭ).

При проектировании электроустановок выбор их оборудования производится по нагреву. В эксплуатации необходимо определять температуру нагрева токосоведущих частей при известных величинах протекающих токов в конкретных режимах работы и условиях окружающей среды.

При протекании по проводнику переменного тока вокруг него и внутри образуется переменный магнитный поток. Этот поток индуцирует в самом проводнике электродвижущую силу (ЭДС), направленную противоположно приложенному напряжению. Центральные слои проводника охватываются большим магнитным потоком, чем наружные. Наводимая здесь против ЭДС будет большей, чем в наружных слоях. Сопротивление протеканию тока по этим слоям будет большим, чем по наружным. Это приведет к уменьшению плотности тока во внутренних слоях, вытеснению тока на поверхность проводника и возрастанию сопротивления протеканию тока.



Явление вытеснения тока в поверхностные слои проводника называется поверхностным эффектом. Его мерой является коэффициент поверхностного эффекта

$$K_{\text{пз}} = \frac{R_a}{R_0},$$

где  $R_a$  – сопротивление проводника переменному току (активное сопротивление);

$R_0 = \rho \frac{l}{s}$  – сопротивление проводника постоянному току (омическое сопротивление);

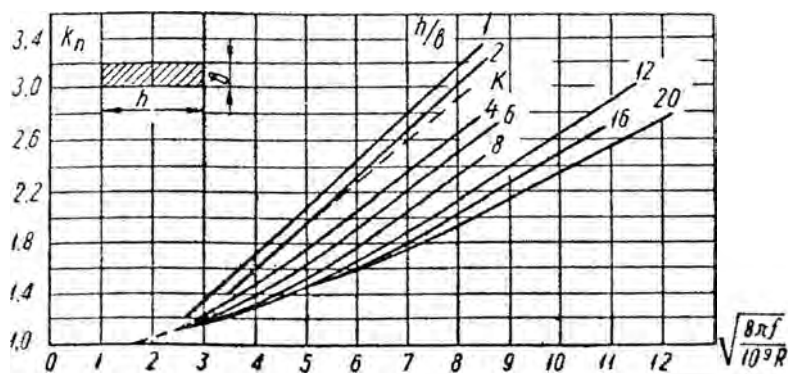
$\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала проводника;

$l, s$  – длина и сечение проводника.

Коэффициент  $K_{\text{пз}}$  зависит от частоты тока, удельного сопротивления и магнитной проницаемости материала проводника, его формы и размеров. Величины  $K_{\text{пз}}$  в конкретных случаях могут быть определены по графикам и номограммам, построенным по данным экспериментов [2, 8].

На рис. 8.1 приведены кривые для определения  $K_{\text{пз}}$  в алюминиевых проводниках прямоугольного и круглого сечений. Как видно на рис. 8.1, чем меньше отношение  $b/h$  или  $t/D$  у проводника, тем меньше  $K_{\text{пз}}$ . По мере увеличения сечения проводника коэффициент поверхностного эффекта увеличивается. Для проводников сплошного квадратного и круглого сечений  $K_{\text{пз}}$  значительно больше, чем для труб и плоских шин.

С точки зрения экономии проводникового материала общепризнано токоведущие части электроустановок и электроаппаратов принимать такими, чтобы  $K_{\text{пз}}$  не превышала величины 1,1–1,2.



a

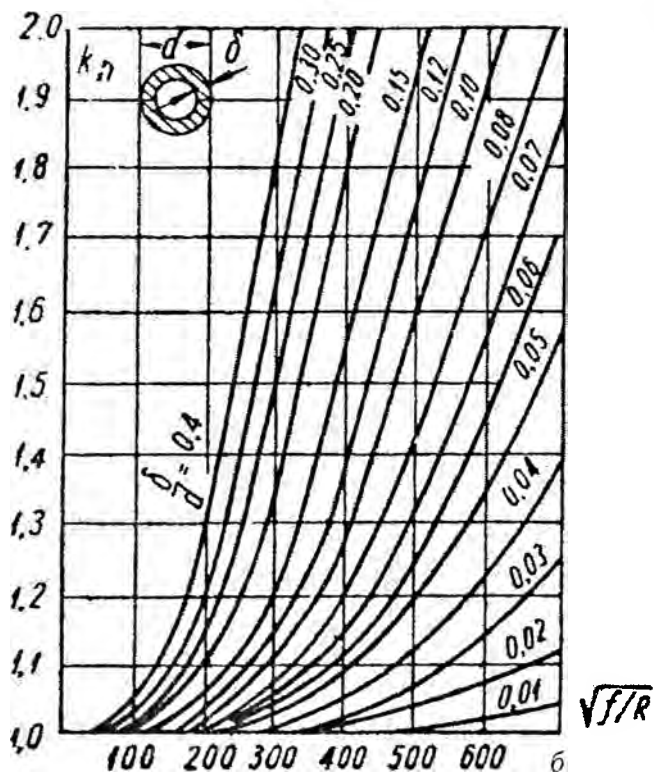


Рис. 8.1. Кривые для определения коэффициента поверхностного эффекта:  
а — в шинах прямоугольного сечения; б — в трубах круглого сечения

Неравномерное распределение переменного тока по сечению проводника возникает также и под влиянием магнитного потока рядом расположенного проводника с током. Это явление называется эффектом близости и характеризуется коэффициентом эффекта близости

$$K_{зб} = \frac{R_{a2}}{R_{a1}},$$

где  $R_{a2}$  – активное сопротивление проводника, расположенного вблизи других проводников с током;

$R_{a1}$  – активное сопротивление уединенного проводника.

Коэффициент  $K_{зб}$  зависит от частоты тока, удельного электрического сопротивления и магнитной проницаемости материала, формы и размеров поперечного сечения проводника, расстояния между проводниками, направления и фазы токов в них. Величины  $K_{зб}$  для конкретных случаев проводников приведены в [8].

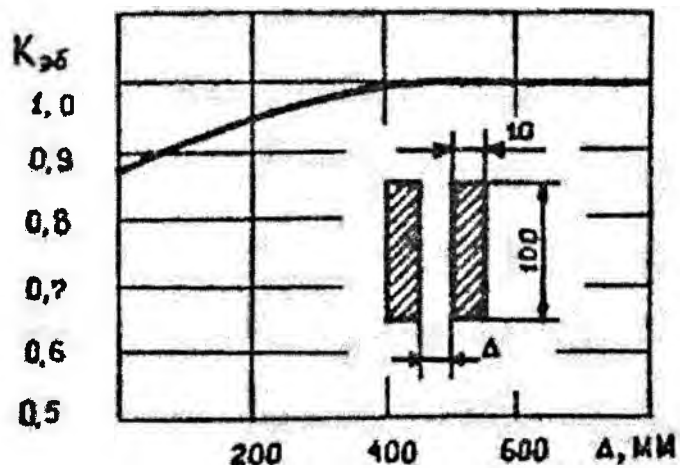
Для случаев двух плоских параллельно расположенных проводников из алюминия сечением  $10 \times 100$  мм, по которым протекает ток цепи,  $K_{зб}$  в зависимости от расстояния ( $\Delta$ ) между ними может быть определен по рис. 8.2 [8]. Из рис. 8.2 следует, что  $K_{зб}$  зависит от расположения плоских проводников относительно друг друга и резко уменьшается при увеличении расстояния между ними. Уже при  $\Delta$  равном  $2h$   $K_{зб}$  близок к 1.

В общем случае активное сопротивление проводника определяется с учетом поверхностного эффекта и эффекта близости

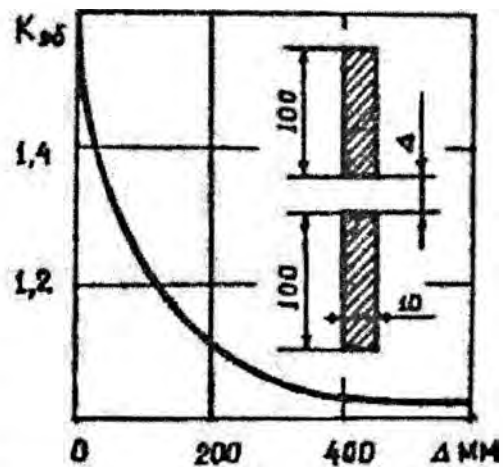
$$R_a = K_{пз} \cdot K_{зб} \cdot R_0 = K_d \cdot R_0,$$

где  $K_d = K_{пз} \cdot K_{зб}$  – коэффициент добавочных потерь.

В ферромагнитных проводниках поверхностный эффект и эффект близости проявляются очень резко [1, 2, 8]. Это объясняется большой величиной магнитной проницаемости стали и ее нелинейной зависимостью от напряженности магнитного поля. В этой связи стальные проводники в электроустановках применяются ограничено.



*a*



*δ*

Рис. 8.2. Коэффициент эффекта близости двух алюминиевых шин при разном их расположении относительно друг друга

Таким образом, потери в проводнике, имеющем температуру  $J$ , на переменном токе равны

$$P = I^2 \cdot R_{aj},$$

где  $I$  – действующее значение тока, А;

$R_{aj} = K_d \cdot R_{0J} = K_d \cdot \rho_J \frac{l}{S} = K_d \cdot \rho_c [1 + \alpha(J - J_c)] \frac{l}{S}$  – активное сопротивление проводника при температуре  $J$ , Ом;

$\rho_J$ ,  $\rho_c$  – удельное электрическое сопротивление материала проводника при температуре  $J$  и  $J_c$ , Ом;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала проводника,  $1/^\circ\text{C}$ ;

$J_c$  – значение температуры, при которой приводятся в справочниках и специальной литературе величины удельных сопротивлений материала ( $0^\circ\text{C}$ ,  $70^\circ\text{C}$ ).

#### *Нагрев однородного проводника при продолжительном режиме работы*

В продолжительном режиме работы по проводнику длительно протекает ток неизменного значения. Потери энергии в проводнике преобразуются в тепло и нагревают его выше температуры окружающей среды. Температура проводника зависит от соотношения между количеством выделяющегося тепла и интенсивностью его отвода, а также теплопоглощающей способностью проводника.

Уравнение теплового баланса для любого момента времени имеет следующий вид:

$$P_{dt} = MCdt + KF\tau dt,$$

где  $dt$  – время протекания тока, с;

$M$  – масса проводника, кг;

$C$  – удельная теплоемкость проводника, Дж/(кг · К);

$\tau = J_1 - J_0$  – превышение температуры (перегрев) проводника  $J_1$ ) над температурой окружающей среды ( $J_0$ ), °C;

$K$  – общий коэффициент теплоотдачи, учитывающий все виды теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$F$  – наружная поверхность проводника, м<sup>2</sup>.

При продолжительном режиме работы ток в проводнике и его температура меняются в небольших пределах, это позволяет принять  $C$ ,  $K$ ,  $R_a$  постоянными. При начальном перегреве (равном нулю) ( $J_{\text{начальное}} = J_0$ ) нетрудно получить решение уравнения теплового баланса

$$\tau = \frac{I^2 R_a}{KF} \left( 1 - e^{-\frac{KF}{MC} \tau} \right). \quad (8.1)$$

Как видно из выражения (8.1), нагрев проводника происходит по экспоненциальному закону (кривая 1 рис. 8.3). При  $t = \infty$  все выделяющееся тепло отдается в окружающую среду, а температура проводника достигает установившегося значения  $J_{\text{уст}}$

$$\tau_{\text{уст}} = J_{\text{уст}} - J_0 = \frac{I^2 R_a}{KF},$$

где  $\tau_{\text{уст}}$  – установившийся перегрев.

В действительности  $C$ ,  $K$ ,  $R_a$  зависят от температуры и будут меняться во времени от начала включения тока до достижения проводником установившейся температуры. В этой связи для уменьшения погрешности указанные величины в формуле (8.1) должны вводиться значениями, близкими к значениям при установившейся температуре.

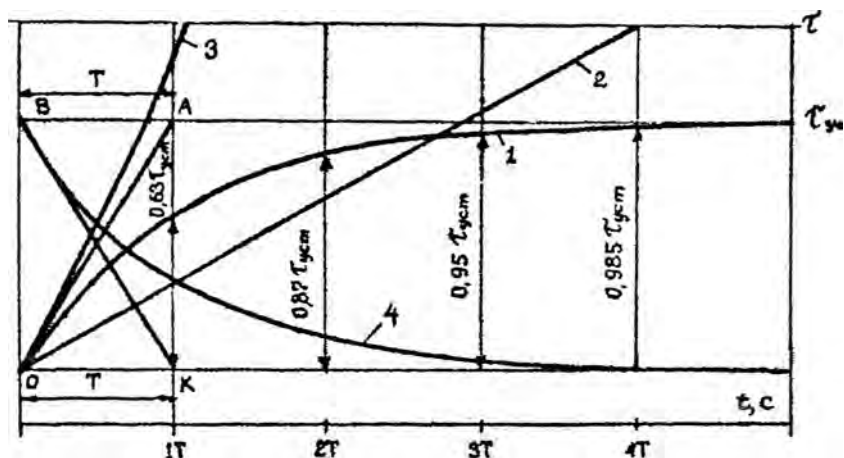


Рис. 8.3. Кривые нагрева и охлаждения проводника:

1 – изменение температуры однородного проводника при продолжительном режиме работы; 2, 3 – изменение температуры нагрева проводника при высокой интенсивности нагрева; 4 – изменение температуры проводника при охлаждении; ОА – касательная к начальной точке кривой нагрева; ВК – касательная к начальной точке кривой охлаждения

$$\text{Величина } \frac{MC}{KF} = T \quad (8.2)$$

представляет собой отношение теплопоглощающей способности проводника к его теплоотдающей способности, имеет размерность времени и называется тепловой постоянной времени нагрева. Физически она представляет собой то время, за которое проводник нагревается до установившейся температуры при отсутствии теплоотдачи в окружающую среду.

Величина постоянной времени нагрева для токоведущих частей и оборудования изменяется в пределах от нескольких минут для шин до нескольких часов для мощных трансформаторов и генераторов.

На рис. 8.3 приведены кривые изменения температуры нагрева проводника в зависимости от времени  $t$ . Как видно из рис. 8.3 (кривая 1), установившийся режим практически наступает через

$t = (4-5)T$ . Постоянную времени нагрева  $T$  можно определить графически как длину подкасательной к любой точке кривой нагрева.

Величина  $I^2 R_a / MC$  характеризует скорость повышения температуры проводника, а  $I^2 R_a / KF$  – тепловую интенсивность электротермического процесса.

При высокой интенсивности электротермического процесса постоянная времени  $T_1$  определяется по уточненному выражению [8]:

$$T_1 = \frac{M \cdot C}{KF - \alpha I^2 R_a}. \quad (8.3)$$

В случае протекания по проводнику тока короткого замыкания знаменатель выражения (8.3) стремится к 0, а постоянная нагрева – к бесконечности. Следовательно, температура нагрева проводника будет возрастать по кривым, подобным 2 или 3 (см. рис. 8.3) до бесконечности, а практически до плавления проводника.

При отключении тока проводник будет охлаждаться. Уравнение теплового баланса в этом случае имеет вид

$$MCdt + KF\tau dt = 0.$$

Решив его при  $\tau_{нач.} = \tau_{уст.}$ , получим

$$\tau = \frac{I^2 R_a}{KF} e^{-\frac{t}{T}} = \tau_{уст.} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (8.4)$$

Кривая 4 (см. рис. 8.3) построена по выражению (8.4). Как видно из рис. 8.3, она является зеркальным отражением кривой 1 относительно прямой, параллельной оси абсцисс и отстоящей от нее на расстояние  $\frac{1}{2}\tau_{уст.}$ . Аналогично рассмотренному по кривой охлаждения может быть определена графически постоянная нагрева проводника  $T$ .

Таким образом, токоведущие части электроустановок и электрооборудования в продолжительном режиме работы достигают уста-



новившейся температуры. Чтобы обеспечить длительную и надежную работу электроустановки, величина установившейся температуры не должна превышать длительно допустимых значений (по ПУЭ). Значение тока, при котором проводник нагрет до предельно допустимой температуры ( $J_{\text{доп}}$ ) при стандартной температуре окружающей среды ( $J_{\text{ос}}$ ), называют допустимым или номинальным значением:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{ном}} = \sqrt{\frac{KF(J_{\text{доп}} - J_{\text{ос}})}{R_a}}, \text{ А.} \quad (8.5)$$

При протекании тока по изолированному проводнику передача тепла осуществляется через изоляцию. Тепловой поток должен преодолеть сопротивление слоя изоляции. В результате при одном и том же токе температура изолированного проводника будет выше, чем неизолированного проводника того же сечения. Следовательно, допустимые токи изолированных проводников меньше, чем неизолированных.

#### *Нагрев и охлаждение проводника при кратковременной и повторно-кратковременной нагрузке*

В продолжительном режиме работы электростанции, подстанции или отдельного присоединения электроустановки рабочие токи в течение суток изменяются в соответствии с графиком нагрузки. При изменении нагрузки изменяются и потери мощности в проводниках. Возникает переходный процесс, в течение которого температура проводника изменяется от одного установившегося значения до другого, соответствующего новому значению тока (рис. 8.4 кривая б).

Превышение температуры проводника в любой момент этого переходного процесса может быть определено по формуле

$$\tau = \tau_{\text{уст.1}} + (\tau_{\text{уст.2}} - \tau_{\text{уст.1}}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где  $\tau_{уст.1}$ ,  $\tau_{уст.2}$  – величины перегрева проводника при большем и меньшем значениях тока нагрузки соответственно.

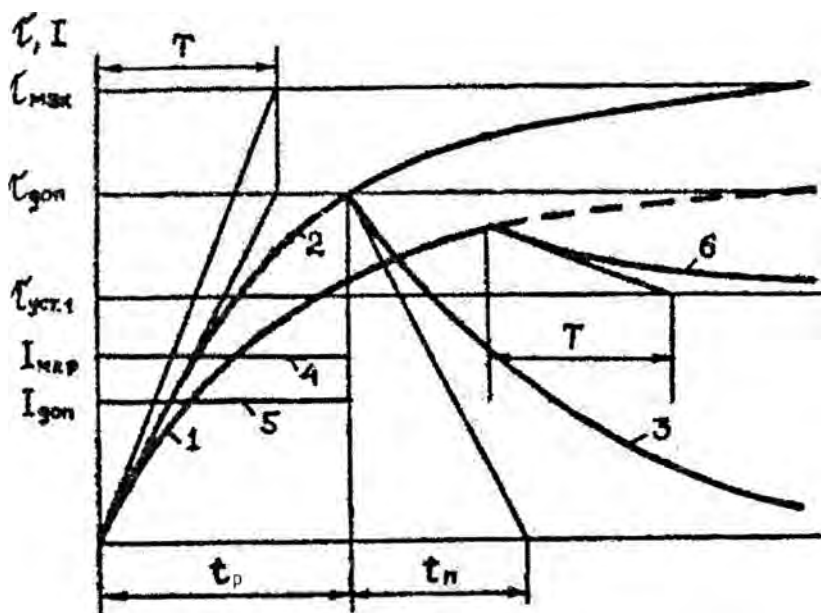


Рис. 8.4. Кривые процесса нагрева и охлаждения проводника при кратковременном режиме работы

Кроме продолжительного режима электроустановки могут работать в кратковременном и повторно-кратковременном режимах.

Кратковременный режим характеризуется небольшими по времени периодами работы  $t_p$  и длинными паузами  $t_n$  с отключением электроприемники от сети. При этом за период работы превышение температуры нагрева проводника над температурой окружающей среды не успевает достигнуть установившегося значения (см. рис. 8.4, кривая 1). За период же паузы проводник успевает охладиться до температуры окружающей среды.

Для эффективного использования проводника величина максимального тока нагрузки в кратковременном режиме  $I_{\max.кп}$  должна

быть такой, чтобы к концу периода работы температура проводника достигла допустимого значения (см. рис. 8.4, кривая 2). Следовательно, предельная величина тока нагрузки в кратковременном режиме будет больше, чем  $I_{\text{доп}}$  для продолжительного режима. При этом коэффициент перегрузки по току

$$K_{I_{\text{кр}}} = \frac{I_{\text{мах.кр}}}{I_{\text{доп}}} = \sqrt{\frac{\tau_{\text{мах}}}{\tau_{\text{доп}}}} = \sqrt{\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}}, \quad (8.6)$$

где  $\tau_{\text{мах}}$  – установившийся перегрев проводника, соответствующий значению тока  $I_{\text{мах.кр}}$  (см. рис. 8.4).

В повторно-кратковременном режиме кратковременный период работы установки  $t_p$  чередуется с паузами  $t_n$ . При этом рабочие периоды недлительные (по ГОСТ до 4 минут) и температура проводника не достигает установившегося значения. Во время пауз (по ГОСТ  $t_p + t_n = 10$  мин) проводник не успевает охладиться до температуры окружающей среды (рис. 8.5). В результате многократных циклов максимальная температура проводника будет ниже, чем в продолжительном режиме при том же значении тока нагрузки (кривая 1 рис. 8.5). В этой связи целесообразный коэффициент превышения тока в этом режиме над током продолжительного режима

$$K_{I_{\text{пов}}} = \frac{I_{\text{пов}}}{I_{\text{доп}}} = \sqrt{\frac{1 - e^{-\frac{t_p + t_n}{T}}}{1 - e^{-\frac{t_p}{T}}}}. \quad (8.7)$$

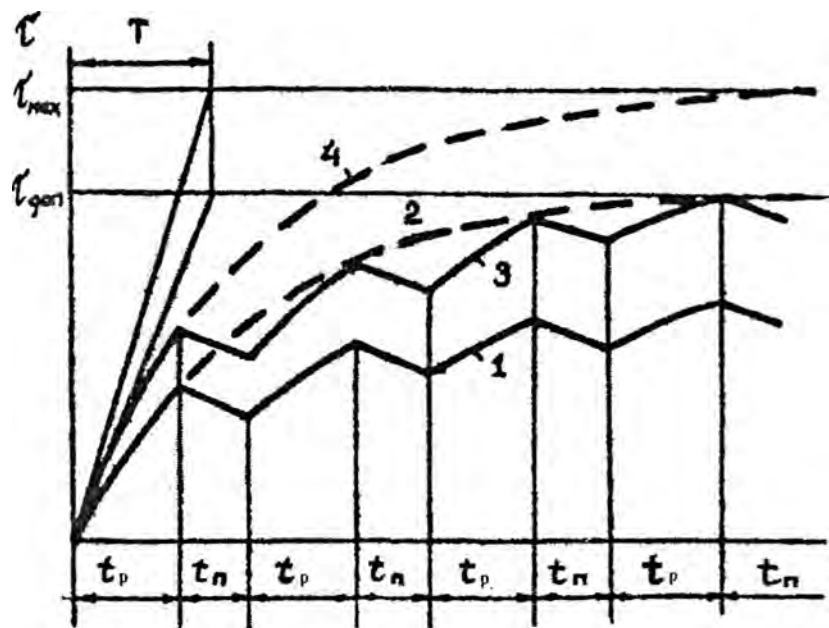


Рис.8.5. Кривые процесса нагрева и охлаждения проводника при повторно-кратковременном режиме работы

### Задание по работе

1. Ознакомиться с физическими процессами, происходящими при протекании переменного тока по проводникам.
2. Изучить процесс нагрева однородного неизолированного проводника в продолжительном режиме работы.
3. Изучить процессы нагрева, происходящие при изменении тока в продолжительном режиме, а также в кратковременном и повторно-кратковременном режимах.
4. Исследовать процесс нагрева алюминиевых шин в продолжительном режиме работы лабораторной установки, определить активное сопротивление шин при установившейся температуре и коэффициент добавочных потерь.
5. Построить кривую нагрева и определить постоянную нагрева исследуемых шин.

6. Рассчитать величину длительного допустимого тока нагрузки шин и предельных токов шин в кратковременном и повторно-кратковременном режимах (для заданного варианта).

7. Составить отчет о работе.

### Описание лабораторной установки

Лабораторная установка (рис. 8.6) включает в себя: регулировочный Т1 и нагрузочный Т2 трансформаторы, участок шинопровода и измерительную схему.

Регулировочный и нагрузочный трансформаторы обеспечивают возможность регулирования тока в цепи установки в широких пределах. Они смонтированы под лабораторным столом.

Участок шинопровода состоит из двух алюминиевых окрашенных шин  $40 \times 4$  мм. Шины расположены параллельно и обращены узкими сторонами друг к другу.

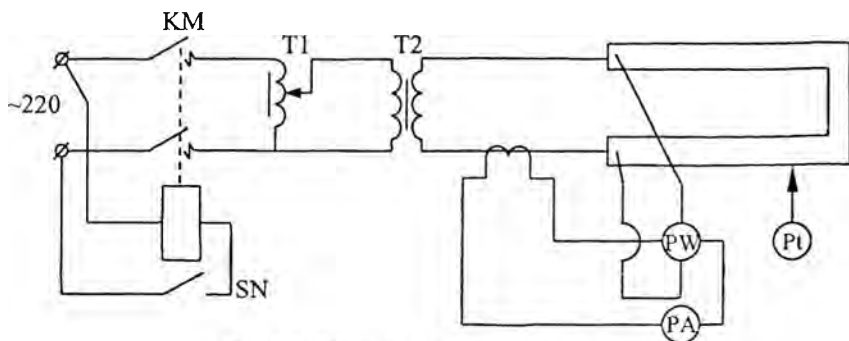


Рис. 8.6. Схема экспериментальной установки

Суммарная длина последовательно соединенных шин составляет 3,5 м. Удельное сопротивление материала шин при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$   $\rho_{20} = 2,2 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Ом} \times \text{мм}^2}{\text{М}}$ ; температурный коэффициент сопротивления  $\alpha = 0,0037 \frac{1}{^{\circ}\text{C}}$ ; удельная теплоемкость  $C = 881 \frac{\text{Вт} \times \text{с}}{\text{кг} \times ^{\circ}\text{C}}$ ; удельный вес алюминия  $\gamma = 2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ .

Измерительная схема позволяет измерить величину тока в шинах, мощность потерь в них  $P$  и температуру нагрева шин  $t_{ш}$ . Для измерения тока в цепи лабораторной установки установлен трансформатор тока ТА, имеющий коэффициент трансформации 400/5.

Измерение мощности осуществляется ваттметром с зашунтированным перемычкой добавочным сопротивлением на пределе 30 В. Номинальное напряжение обмотки напряжения прибора при этом составляет 3В.

Измерение температуры шин производится электронным вольтметром В7-27, который комплектуется специальным щупом. Щуп измерительной головки прижат к шине. В измерительную головку смонтирован бескаркасный транзистор типа КТ384А, являющийся датчиком температуры.

При нагреве шины нагревается транзистор в измерительной головке. Это приводит к изменению сопротивления перехода эмиттер-база и соответственно к изменению падения напряжения на этом переходе. Падение напряжения измеряется вольтметром, проградуированным в  $^{\circ}\text{C}$ .

Питание лабораторной установки осуществляется от сети 220/127 В по шланговому кабелю с штыревым разъемом на конце. Включение питания после установки штыревого разъема в гнездо на щитке питания производится тумблером SN, замыкающим цепь катушки пускателя КМ.

### **Техника безопасности при выполнении работы**

При выполнении работы следует соблюдать требования инструкции по технике безопасности при работе в лаборатории электрических станций. После подачи напряжения на установку запрещается прикасаться к ее токоведущим частям.

### **Методические указания и порядок выполнения работы**

1. Выполнение работы осуществляется в последовательности, указанной в задании по работе. Номер варианта с исходными данными содержится в табл. 8.1 и задается преподавателем.

Таблица 8.1

Вариант	Ток шин, А	Продолжительность работы $t_p$ , мин		Продолжительность паузы в повторно-кратковременном режиме $t_n$ , мин
		Кратковременный режим	Повторно-кратковременный режим	
1	240	5	1	5
2	280	7	2	6
3	320	10	4	6
4	360	12	4	3

2. После изучения материала настоящей разработки подать питание на установку. Включить тумблер *SN* и установить регулировочным трансформатором заданное значение тока в шинах. Отключить установку.

3. Подключить к вольтметру В7-27 щуп, установить переключатель пределов измерения в положение « $t\ ^\circ\text{C}$ » и включить прибор.

4. Установить шунтирующую перемычку на ваттметр и нажать кнопку предела «30 U». Включить установку и произвести записи температур и мощностей потерь через промежутки времени, указанные в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Время, мин	0	2	4	6	8	10	12	15	20	25	30
Мощность потерь, Вт											
Температура шин, $^\circ\text{C}$											

При производстве измерений следить за величиной тока шин. В случае отклонения  $I_{\text{ш}}$  от заданного значения производить его регулировку.

5. Отключить установку от сети. По данным табл. 8.2 построить кривую нагрева шин. По построенной кривой определить графически постоянную нагрева шин.

6. Рассчитать:

- ( $KF$ ) по формуле (8.2)

$$KF = \frac{MC}{T};$$

- омическое сопротивление шин

$$R_o = \rho \frac{l}{s};$$

- активное сопротивление шин

$$R_a = \frac{P}{I^2};$$

- коэффициент добавочных потерь

$$K_d = \frac{R_a}{R_o};$$

- допускаемый ток продолжительного режима  $I_{ном}$  (формула (8.5));

- максимальный допустимый ток кратковременного режима  $I_{мах.кр.}$  (формула (8.6));

- максимальный ток повторно-кратковременного режима  $I_{мах.пв.}$  (формула (8.7)).

Расчет величин сопротивлений производить для допускаемой температуры шин  $+70^\circ\text{C}$ . Температуру окружающей среды принять  $+25^\circ\text{C}$ .

Результаты расчетов занести в табл. 8.3.

Таблица 8.3

Алюминиевая шина $40 \times 4 \text{ мм}$	$R_o$ , Ом/м	$K_d$	$T$ , с	$I_{доп}$ , А	$I_{мах.кр.}$ , А	$I_{мах.пв.}$ , А
--	-----------------	-------	------------	------------------	----------------------	----------------------

### Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Данные испытаний на нагрев (см. табл. 8.2) и кривая нагрева с указанием величины постоянной нагрева шин.
3. Результаты расчетов (см. табл. 8.3).



## Контрольные вопросы

1. Почему на переменном токе применяют плоские, трубчатые или корытообразные шины?
2. Что такое коэффициент добавочных потерь? От чего он зависит и как определяется?
3. Расскажите о процессе нагрева однородного проводника в продолжительном режиме.
4. Что такое постоянная нагрева, от чего она зависит и как может быть определена?
5. Что понимают под допускаемым (номинальным) током проводника (аппарата) и как он определяется?
6. С какой целью окрашивают неизолированные шины?
7. Как определяются максимальные токи кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы электроустановки?
8. Как нагревается неизолированный проводник при протекании тока короткого замыкания?
9. Как изменяется температура проводника при изменении величины тока в продолжительном режиме работы (при увеличении или уменьшении тока)?
10. В чем состоит особенность нагрева изолированных проводников рабочими токами нагреток?

**Литература:** [2] (с. 38–45;) [8] (с. 5–14, 29–33).

Работу подготовил В.Н. Мазуркевич

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

**Цель работы:** ознакомление с различными видами контактных соединений токоведущих частей электроустановок; изучение физических процессов на контактах при их работе; изучение способов выполнения контактных соединений; освоение методов контроля их состояния.

## Краткие теоретические сведения

### *Переходное сопротивление контактов*

Токоведущие части электроустановок выполняются из медных или алюминиевых изолированных и неизолированных проводов, шин, кабелей. Для образования отдельных цепей в соответствии со схемой электрических соединений установки токоведущие части соединяются между собой и с выводами электрооборудования. Соединение токоведущих частей осуществляется электрически и механически специальными конструктивными устройствами – контактными соединениями (контактами).

Поверхности проводников, предназначенные для соединения, называются контактными поверхностями. В месте их соприкосновения образуется электрический контакт, через который ток протекает из одной токоведущей части в другую.

Контактные соединения в большом количестве входят во все электрические цепи и аппараты любой электроустановки и являются их очень ответственными элементами.

Контактные соединения токоведущих частей электроустановок предназначены для длительного пропускания токов нормального режима и кратковременных токов аварийных режимов. Они могут выполняться неподвижными и подвижными.

В подвижных контактах происходит перемещение контактной поверхности одного проводника относительно поверхности другого. Если такое перемещение осуществляется без разрыва тока, то контакт называют скользящим. Скользящие контакты используются в электрических машинах, регулирующих устройствах, на электрифицированном транспорте и др.

Если при перемещении контактных поверхностей осуществляется разрыв тока цепи (коммутация тока), то контакты называют размыкающимися. Ими оснащаются коммутационные аппараты (выключатели, разъединители, контакторы, реле и др.). В настоящей работе подвижные контакты не рассматриваются.

В неподвижных контактах проводники жестко скрепляются друг с другом. Такое скрепление может быть достигнуто сваркой, пайкой, склеиванием или с помощью болтов, винтов, сжимов, пружин,

клиньев и др. В первом случае образуется неразборное контактное соединение, во втором – разборное. Кроме того, могут создаваться разъемные контактные соединения – устройства, состоящие из вилки и розетки.

При наложении двух контактных поверхностей друг на друга и сжатии их силой  $P$  действительная площадь соприкосновения проводников значительно меньше их геометрической площади. Это объясняется тем, что даже при шлифовке поверхностей на них остаются микронеровности, и контактирование осуществляется по отдельным выступам. Под действием силы контактного нажатия некоторые из контактирующих выступов деформируются упруго, другие – пластически. При этом пластическая деформация определяется напряжением смятия материала контактов.

В результате первоначальные точки соприкосновения превращаются в небольшие площадки. Но суммарная контактная поверхность, воспринимающая давление, во много раз меньше геометрической поверхности контакта.

В реальных контактах площадь перехода тока еще меньше из-за явления поверхностного эффекта на переменном токе и деформации металла проводников (шин) вокруг стягивающих болтов.

Обычно на поверхности металла имеется тонкий слой из адсорбированных газов, окислов, жиров и др. Под действием давления эти пленки утончаются вплоть до толщины молекулярного слоя и препятствуют соприкосновению металлов контактов. Но этот молекулярный слой обладает туннельным эффектом и хорошо проводит ток.

Кроме того, при нахождении контактов на воздухе на их поверхности имеется еще слой окислов, сульфидов, хлоридов и других соединений. Слой оксидов является практически не проводящим. Под давлением, в силу хрупкости, этот слой частично разрушается, и в микротрещины может проникать металл, образуя проводящие точки.

Таким образом, контактная поверхность, воспринимающая давление, состоит из следующих участков:

- 1) с металлическим контактом (поверхности 1 на рис. 9.1, б);
- 2) покрытых тонкой адгезионной пленкой и обладающих туннельной проводимостью (поверхности 2 на рис. 9.1, б);
- 3) покрытых оксидами, практически не проводящими ток (3 на рис. 9.1, б).

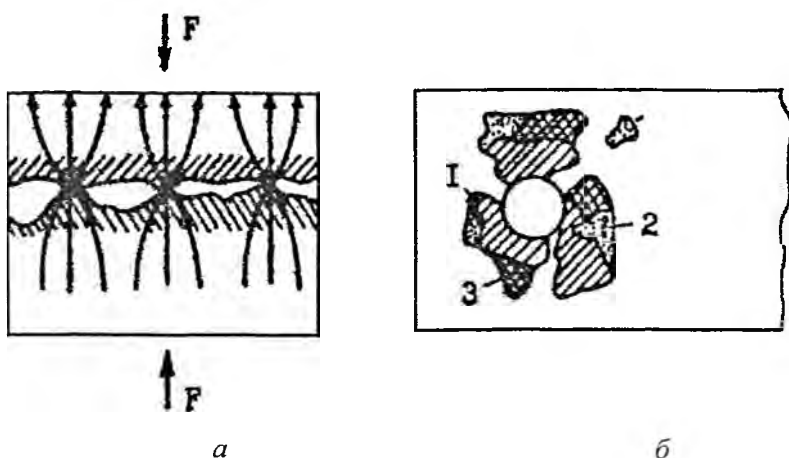


Рис. 9.1:

*a* — поперечный разрез контактного соединения под увеличением с указанием линий тока; *б* — контактная поверхность алюминиевой шины одноболтового шинного контакта

В общем случае площадь, через которую протекает ток, в контакте невелика и не превышает нескольких процентов от геометрической. Так, по данным [9], для алюминиевых шин с поперечным сечением  $60 \times 6$  при длине накладываемых частей 60 мм и силе сжатия  $F = 33350$  Н площадь, через которую протекает ток, составляет всего  $61 \text{ мм}^2$ .

Вследствие малой площади перехода в материале контактов линии тока стягиваются к проводящим площадкам. Возникает явление сужения линий тока, и возрастает сопротивление переходу тока.

Переходное сопротивление контакта  $R_k$  состоит, таким образом, из двух частей — сопротивления адгезионных пленок пограничного слоя  $R_{пл}$  и сопротивления сужения тока  $R_c$ .

$$R_k = R_{пл} + R_c$$

Сопротивление  $R_c$  составляет основную часть сопротивления контакта. С увеличением силы сжатия контактов оно уменьшается. Аналитическое определение  $R_k$  возможно только для точечного контакта. Для других типов контактов переходное сопротивление можно определить по формуле

$$R_k = \frac{C}{F^m} \text{ Ом,} \quad (9.1)$$

где  $F$  – сила сжатия, Н;

$C$  – коэффициент, зависящий от свойств материала контактов и состояния их поверхностей. Значения  $C$ , определенные экспериментально в Ом  $\cdot$  Н $^{-m}$ , приводятся в [2, 9];

$m$  – показатель степени, зависящий от конструктивных особенностей контактного соединения. Изменяется в пределах от 0,5 до 1 [2, 9].

Зависимость величины переходного сопротивления медного контакта от силы нажатия приведена на рис. 9.2.

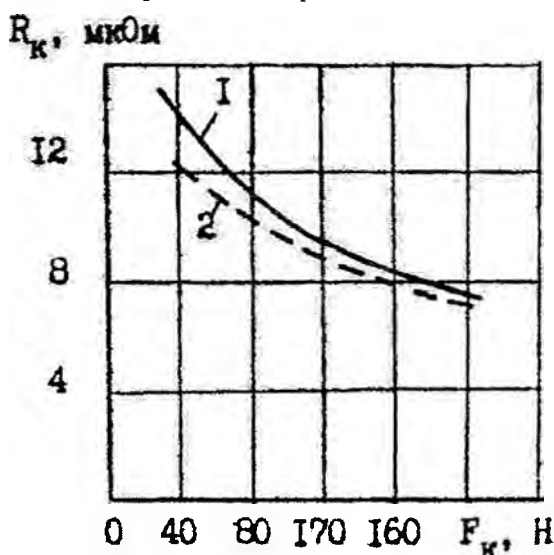


Рис. 9.2. Зависимость величины переходного сопротивления медного контакта от силы нажатия

Как видно на рис. 9.2, с увеличением контактного нажатия переходное сопротивление снижается. Это объясняется тем, что с увеличением давления увеличивается действительная площадь их соприкосновения вследствие деформации отдельных выступов. При дальнейшем увеличении нажатия материал деформируется в меньшей степени, и уменьшение переходного сопротивления замедляется. Если продолжать увеличивать давление, переходное сопротивление

контакта начнет увеличиваться вследствие того, что начнет возрастать текучесть металла и изгибание контактных поверхностей.

При уменьшении силы сжатия переходное сопротивление меняется меньше (кривая 2 рис. 9.2). Это обуславливается наличием остаточной деформации на контактирующих поверхностях. Аналогичная зависимость наблюдается и на алюминиевых контактах.

Определенное влияние на переходное сопротивление оказывает степень обработки контактирующих поверхностей. Пример влияния обработки медных контактных поверхностей показан на рис. 9.3. Из рисунка видно, что наилучший результат получается при обработке поверхностей наждачной бумагой под слоем вазелина.

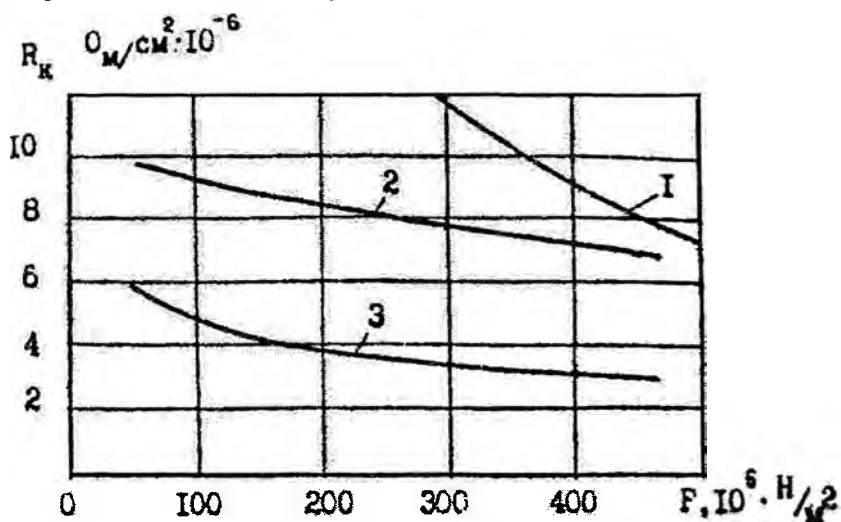


Рис. 9.3. Зависимость переходного сопротивления медного контакта от давления при различной обработке контактных поверхностей:

- 1 — обработка наждачной бумагой; 2 — обработка напильником;  
3 — обработка наждачной бумагой под слоем вазелина

При прохождении тока через контакт он нагревается, и его сопротивление возрастает. Наибольшую температуру будут иметь контактные поверхности и точки. По мере удаления от них температура снижается. В результате сопротивление контакта, определяемое по падению напряжения на контакте, будет меньше, чем в

случае, когда температура во всей области контакта была бы одинаковой и равной температуре точек перехода тока.

На рис. 9.4 приведена зависимость переходного сопротивления медных контактов от температуры.

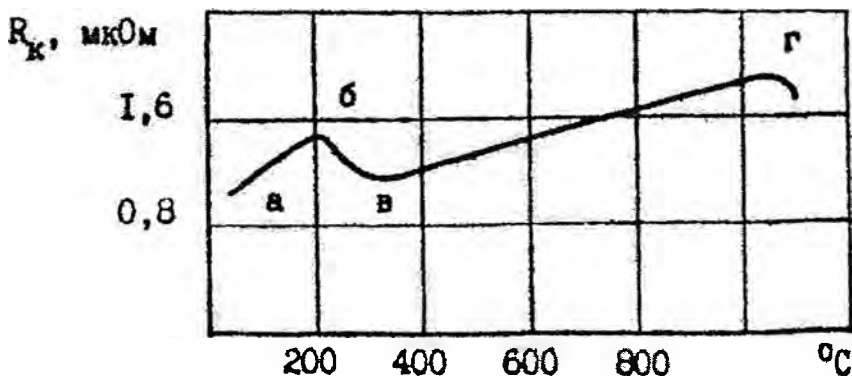


Рис. 9.4. Зависимость переходного сопротивления медных контактов от температуры

Как следует из рис. 9.4, с увеличением температуры нагрева переходное сопротивление возрастает вследствие повышения удельного электрического сопротивления материала контактов (участок а-б). Одновременно увеличивается суммарная поверхность, так как облегчается деформация микронеровностей вследствие снижения механической прочности материала. На участке 200–300 °C это происходит скачком. Затем наступает некоторое увеличение сопротивления, вплоть до точки плавления контактного материала (точка г). После этой точки на площадке контактирования образуется расплавленная ванна жидкого металла.

В пределах температур до 200 °C переходное сопротивление контакта можно рассчитать по формуле [1, 2, 3]

$$R_{K2} = R_{K1} \left[ 1 + \frac{2}{3} \alpha (V_2 - V_1) \right],$$

где  $R_{K1}$ ,  $R_{K2}$  – переходное сопротивление контакта при температурах  $V_1$  и  $V_2$  соответственно;

$\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления материала контактов.

Увеличение температуры контактов усиливает процесс окисления контактных поверхностей. По мере увеличения толщины слоя окиси переходное сопротивление контакта увеличивается, что приводит к еще большему повышению температуры. На рис. 9.5 показана зависимость переходного сопротивления контактов из меди и алюминия, работающих в воздухе.

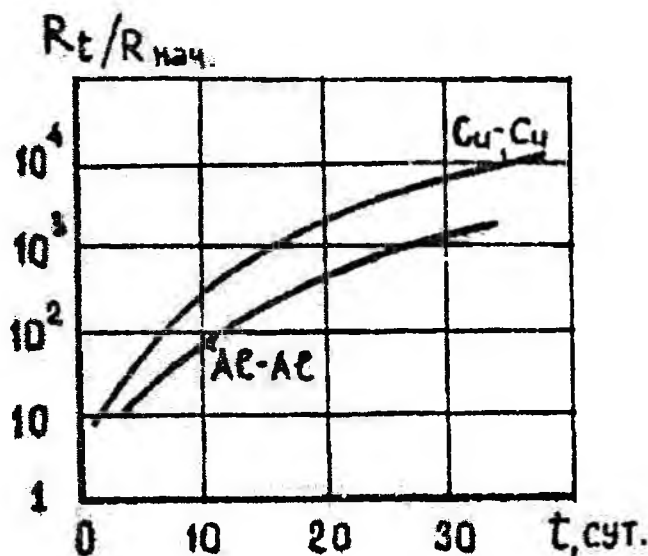


Рис. 9.5. Зависимость отношения сопротивления контактов к начальному их значению от времени нахождения под током

Огромное возрастание  $R_k$  объясняется окислением поверхности контактов воздухом, проникающим через швы соединения. Если обеспечить воздухонепроницаемую заделку швов поверхности (окрашиванием) или покрыть контактирующие поверхности оловом (серебром), то окисление контактных поверхностей будет малым, и сопротивление контактов будет изменяться мало. Особенно если температура контактов при работе не будет превышать допустимую.

В случае протекания через контакты токов короткого замыкания резко возрастают температура в контактных площадках и силы их электродинамического отталкивания. Кроме электродинамических сил, обусловленных взаимодействием токов в месте сужения,



вследствие высокого роста температуры в области стягивания линий тока может возникнуть взрывное испарение металла. Если электродинамические силы и усилия взрывного испарения области стягивания тока превысят контактное нажатие, то происходит самопроизвольное размыкание контактов. Между ними возникает короткая дуга, которая разрушает контакт.

В этой связи при выполнении контактов необходимо учитывать не только физические процессы при длительном протекании тока, но и особенности работы контактов при пропускании токов короткого замыкания.

### *Требования к конструкции контактного соединения*

Конструкции и способы выполнения контактных соединений должны обеспечить высокое качество и надежность работы электроустановки. В соответствии с ГОСТ 10434–82 к контактам предъявляются следующие требования.

Первоначальное переходное сопротивление контакта не должно быть больше сопротивления эквивалентного участка целого проводника. Если контакт образован проводниками из разных материалов, его сопротивление не должно превышать сопротивления эквивалентного участка проводника, имеющего меньшую проводимость.

Контактное сопротивление присоединения проводов, кабелей и шин к штыревым выводам аппаратов не должно превышать указанных в ГОСТ величин. Например, для штыревого вывода с резьбой МЗ сопротивление не должно быть более 80 мк·Ом, а для М5 – 60 мк·Ом.

Увеличение переходного сопротивления в процессе эксплуатации не должно превышать 1,8 начального значения.

Допустимые температуры нагрева контактов при длительном протекании токов нагрузки зависят от назначения, вида токоведущих частей и условий окружающей среды. Для неизолированных шин, расположенных в воздухе, при стандартной температуре окружающей среды +25 °С допустимая температура нагрева равна +70 °С. Для болтовых соединений и присоединений к выводам аппаратов, если контактные соединения не имеют защитного покрытия (оловом, серебром и др.), длительно допускается температура +80 °С

при температуре воздуха  $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с покрытием оловом  $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , серебром  $+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

При коротких замыканиях температура контактных соединений не должна быть более  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  для алюминиевых проводников и  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  для медных и стальных проводников.

Механическая прочность контактов, работающих на растяжение, должна составлять не менее 90 % временного сопротивления разрушения металла проводника; 70 % для контактов, не работающих на растяжение; 30 % для соединения контактных выводов аппаратов; жилами проводов и кабелей без наконечников.

### *Способы выполнения неразборных контактных соединений*

Для выполнения контактных соединений токоведущих частей электроустановок применяются различные технологические способы: электросварка контактным разогревом и угольным электродом, газопламенная и термитная сварка, холодная сварка давлением, пайка, стягивание болтами и винтами, скрутка и др.

Сварка позволяет получить высококачественное соединение (см. образцы № 2, 7, 11, 15). Образующееся монолитное соединение имеет сопротивление, равное сопротивлению сплошного проводника, и не изменяется в процессе эксплуатации. Его механическая прочность также не отличается от прочности сплошного проводника.

В этой связи неразборные соединения токоведущих частей, как правило, выполняются сварными.

Электросварку проводников контактным разогревом применяют для оконцевания, соединения и ответвления алюминиевых проводников сечением до  $1000\text{ мм}^2$ , медных до  $2000\text{ мм}^2$ , а также для соединения алюминиевых токоведущих частей с медными. Сварка угольным электродом используется чаще всего для соединения проводов и жил кабелей сечением до  $10\text{ мм}^2$  (обычно в сетях освещения).

Для сварки угольным электродом применяются понижающие (9–12 В) трансформаторы небольшой мощности. Плотно прижимают конец угольного электрода к проводникам до их расплавления. После сварки соединение зачищается напильником, покрывается лаком и изолируется.

При сварке алюминиевых проводников сечением более  $10 \text{ мм}^2$  необходимо защищать алюминий от окисления в процессе сварки. Для этого используется флюс ВАМИ, состоящий из хлористого калия – 50 %, хлористого натрия – 30 % и криолита К-1 – 20 %. Перед сваркой его разводят водой и наносят тонким слоем на свариваемые проводники и присадочные прутки.

Сварка проводников большого сечения выполняется либо пламенем газовой горелки, либо аргонодуговой. При аргонодуговой электросварке аргон подается к дуге и защищает зону дуги и околошовный участок металла от воздействия кислорода воздуха. Это наиболее прогрессивный способ получения контактов. Промышленностью изготавливаются специальные установки для аргонодуговой сварки – УДАР-300 и так далее для ручной сварки неплавящимся электродом; ПРМ-2, ПШП-10 и т. п. - для полуавтоматической сварки плавящимся электродом.

*Холодная сварка давлением* осуществляется в специальных гильзах или наконечниках путем местного вдавливания пуансона прессом или сплошного обжатия. При этом происходит пластическая деформация металла, и за счет сил молекулярного сцепления образуется прочное соединение, обладающее малым переходным сопротивлением. Согласно ГОСТ опрессование допускается для проводов и кабелей малых сечений до  $10 \text{ мм}^2$ , кроме алюминиевых кабелей в сетях крупных городов, на электростанциях и подстанциях. Опрессовка местным вдавливанием производится одним, двумя или четырьмя вдавливаниями (см. образцы № 11, 13, 16). Опрессовка выполняется в определенной технологической последовательности (рис. 9.6).

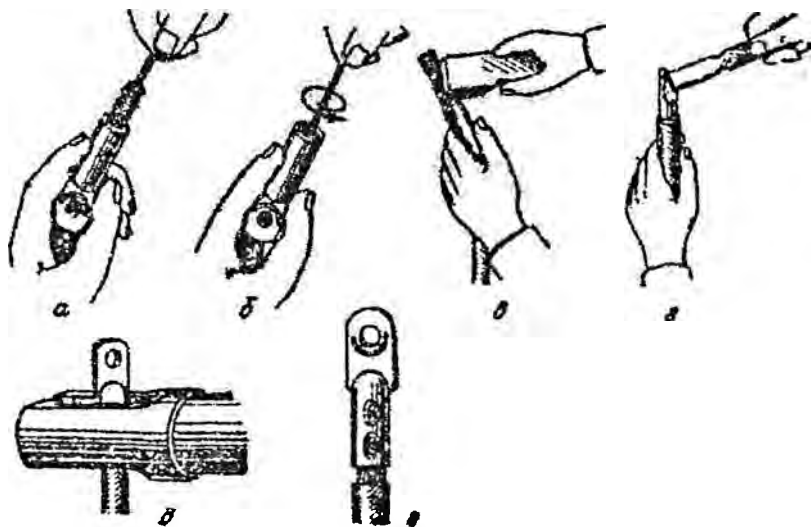


Рис. 9.6. Соединение алюминиевых жил опрессовкой:

а — зачистка внутренней поверхности наконечника; б — смазка внутри наконечника кварцевазелиновой пастой; в — зачистка жил; г — смазка жил кварцевазелиновой пастой; д — опрессовка; е — вид после опрессовки

1. Подбирается гильза или наконечник, пуансон и матрица.

2. Концы проводников и внутренняя поверхность гильзы или наконечника зачищаются до металлического блеска и сразу смазываются кварцевазелиновой пастой (смесь технического вазелина или смазки ЦИАТИМ-221 (50 %) с кварцевым песком (50 %)).

3. Жила вводится внутрь гильзы.

4. Подготовленное соединение вставляется в матрицу, укрепленную в прессе, и производят одно или несколько вдавливающих пуансона до соприкосновения с матрицей.

5. После опрессовки соединение протирается и изолируется.

Сплошное обжатие применяется для соединения, оконцевания многопроволочных алюминиевых, сталеалюминиевых и медных проводов распределительных устройств и ЛЭП любых напряжений (см. образцы № 5, 6, 9). Разновидностью соединения сплошным обжатием является соединение проводов ЛЭП способом скручивания с применением овальных соединительных зажимов. Образующееся

при этом соединение имеет малое переходное сопротивление и высокую механическую прочность.

В случае невозможности использования сварки токоведущие провода и жилы кабелей соединяют пайкой. Для пайки медных проводников применяется оловянисто-свинцовый припой (ПОС-30 и др.). В качестве флюса используется канифоль или паста КСп. При пайке алюминиевых жил применяется цинково-оловянистый припой А или ЦА (15 % Al, 85 % Zn) и др.

В настоящее время для соединения жил кабелей и проводов, присоединения их к выводам аппаратов все шире начинают применяться специальные контактные устройства.

Для соединения алюминиевых жил кабелей контактное устройство содержит алюминиевую соединительную втулку, ось внутреннего отверстия которой смещена относительно оси наружной поверхности. На внутренней поверхности втулки нарезана резьба. В более толстой ее стенке выполнены два, четыре и более отверстий с резьбой. В эти отверстия вворачиваются специальные болты из алюминиевого сплава, торец которых закруглен, а под головкой имеется кольцевая проточка. При соединении двух кабелей концы их жил вводятся во внутреннее отверстие втулки, каждый до середины ее длины. Гаечным ключом болты вворачиваются до среза их головок. Этим обеспечивается холодная сварка жил кабелей с металлом втулки.

Для присоединения жил проводов и кабелей к выводам аппаратов используются контактные устройства из специального сплава, не требующие сварки или пайки. В некоторых из них жила находится в среде защитной токопроводящей смазки.

Подробно познакомиться с технологией, оборудованием и материалами, используемыми при выполнении неразборных контактных соединений, можно по [9].

### *Конструкции и способы выполнения разборных контактных соединений*

Разборные контактные соединения в электроустановках выполняют с помощью болтов, шпилек и винтов. Для долговечного надежного соединения контактные поверхности проводников должны

быть подготовлены и защищены от окисления, а при монтаже в контакте должно быть создано оптимальное давление.

Подготовка концов проводников для соединения их болтами включает выравнивание поверхностей (рихтовку, фрезерование и т.п.), сверление или пробивку отверстий под болты, очистку от всякого рода пленок (окислов, масел и др.). Очистка чаще всего производится при помощи стальных щеток. Контактные поверхности алюминиевых проводников очищают особо тщательно под слоем технического вазелина.

После очистки контактных поверхностей их защищают от окисления. Для этого на контактные поверхности наносится тонкий слой защитной смазки, на медные поверхности – тонкий слой технического вазелина или смазки ЦИАТИМ-221, а на алюминиевые поверхности – слой кварцевазелиновой пасты.

Кварцевазелиновая паста представляет собой смесь технического вазелина (50 %) с кварцевым песком (50 %). Кварцевый песок придает пасте новые свойства, так как крупинки песка при сжатии контактных поверхностей врезаются в них, разрушают окисную пленку и образуют металлические кратеры, увеличивающие размеры и число контактных точек.

Количество болтов, их диаметр зависят от оптимальных удельных давлений между контактными поверхностями и допустимых растягивающих усилий болтов. Всегда стремятся применить несколько болтов меньшего сечения, чем один болт большего сечения. Это объясняется тем, что контактные поверхности и точки сосредотачиваются вокруг отверстий для болтов и при нескольких болтах контактных пятен больше, они равномернее распределяются по контактной площади.

Оптимальные удельные давления для различных материалов приведены в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Материалы	Удельное давление, МПа
Медь луженая	0,5–10,0
Медь и ее сплавы нелуженые	0,5–20
Алюминий	25,0
Сталь луженая	10,0–15,0
Сталь нелуженая	60,0

При прохождении тока контакты нагреваются и расширяются. Особенно значительный нагрев и расширение происходят при протекании тока короткого замыкания. Однако расширяются детали соединения по-разному из-за разных коэффициентов линейного расширения. Коэффициент линейного расширения стального болта меньше, чем алюминия или меди. Кроме того, болты при коротком замыкании нагреваются меньше, чем проводники. В результате на болты действуют дополнительные силы, которые, складываясь с силой затяжки, могут привести к остаточным деформациям материала проводников и ослаблению силы сжатия при охлаждении соединения.

Чтобы уменьшить напряжения под головки болтов или гаек, устанавливают специальные тарельчатые пружины (рис. 9.7).

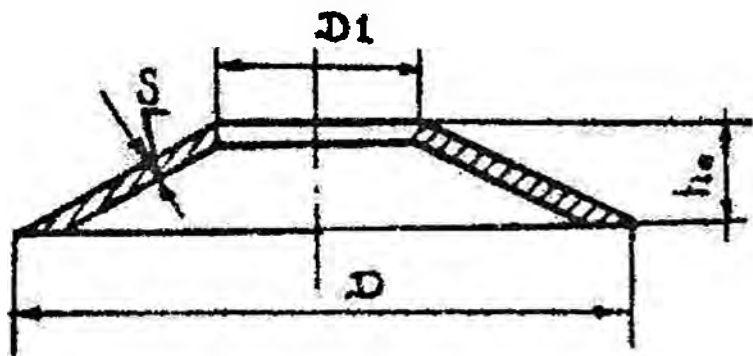


Рис. 9.7

Тарельчатые пружины изготавливают двух типов – типа ТШ (для шин) и ТК (для стабилизации контактного давления в присоединении кабельного наконечника к выводу электрооборудования). В соединениях с тарельчатыми пружинами контргайки не применяются.

Допускается вместо тарельчатых пружин со стороны алюминия устанавливать увеличенную шайбу (но без пружинной шайбы Гровера).

Длину болтов подбирают такой, чтобы после сборки и обтяжки соединения (с контргайкой) оставалось не менее двух ниток свободной резьбы.

Затяжку болтов производят гаечным ключом, обеспечивая требуемые значения крутящих моментов. При использовании болтов 112 и выше для соединения алюминиевых проводников вначале болты затягивают полным усилием (примерно 100 Н). Затем соединение следует ослабить, после чего вторично затянуть болты с нормальным усилием (200 Н). Для фиксации гайки на нее устанавливают контргайку.

Болты на соединениях с тарельчатыми пружинами затягивают в два приема. Вначале болт затягивают до полного сжатия тарельчатой пружины, затем соединение ослабляют поворотом ключа в обратную сторону на 1/4–1/6 оборота.

Болтовые соединения шин выполняются «внахлестку» или «встык» с накладками (см. образец № 3). Длину перекрытия полос выбирают с таким расчетом, чтобы разместить на ней необходимое число болтов.

Присоединение круглых токоведущих частей большого сечения к выводам электрических машин и аппаратов осуществляется с помощью наконечников, имеющих отверстие для болта (см. образцы № 1–16). Наконечники на токоведущие части монтируются горячей или холодной сваркой (образцы 11–13, 15–16) или могут быть отформованы из самой жилы. К плоским выводам из меди или алюминиевого сплава присоединение осуществляется с помощью стальных болтов, гаек и тарельчатых шайб. При отсутствии тарельчатых шайб возможно применение плоских увеличенных шайб при условии, что переходное сопротивление и температура нагрева соединения не превысят допустимой величины.

Плоские медные проводники к штыревым выводам оборудования присоединяются при помощи стандартных гаек из меди и ее сплавов. Алюминиевые плоские проводники присоединяются стальными гайками. При этом упорные гайки должны быть увеличенными (см. образец № 3).

Круглые проводники сечением до 10 мм<sup>2</sup> к выводам аппаратов присоединяются без наконечников. Для этого их концы изгибаются колечком, диаметр которого должен быть больше диаметра болта или штыревого вывода. Колечко надевается на вывод (болт) так, чтобы оно при закручивании болта или гайки не выдавливалось из-под



них. Наверх устанавливается шайба-звездочка, и гайкой колечко прижимается к зажиму (см. образцы № 20 и 22).

Контактные соединения из разнородных металлов образуют гальваническую микропару с некоторой разностью потенциалов. При попадании на контактную поверхность влаги возникает электрохимическое разрушение металла, имеющего больший отрицательный потенциал. Чтобы устранить разрушение контакта алюминиевых токоведущих частей к медным выводам электрооборудования применяются медно-алюминиевые переходные пластины и наконечники (образцы № 1, 4, 5, 7). Они изготавливаются прокаткой, контактно-стыковой или холодной сваркой. Алюминиевая часть пластины (наконечника) приваривается к алюминиевому проводнику, а медная – болтами присоединяется к медным выводам аппарата.

Для соединения жил проводов и кабелей в разветвительных коробках различных проводок используются плоскoprужинные зажимы и соединительные колпачки, заполненные токопроводящей контактной пастой.

### *Методы контроля состояния контактных соединений*

В процессе эксплуатации электроустановок под воздействием различных факторов (вибрации, усилий, окисления и др.) переходное сопротивление контактных соединений токоведущих частей увеличивается. Это приводит к увеличению температуры их нагрева выше допустимого значения и ускоренному окислению контактных поверхностей. Переходное сопротивление еще больше увеличивается, и так до разрушения соединения и аварийного отключения установки.

В этой связи для обеспечения надежной работы электроустановок необходимо осуществлять контроль состояния контактных соединений. Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) регламентируется определенная система контроля состояния контактов, предусматривающая приемочный, периодический и текущий контроль.

Приемочный контроль осуществляется после монтажа установки. Он проводится визуально и в сочетании с измерением размеров соединений или силы затяжки болтов. Все соединения с дефектами (трещинами сварочных швов, свищами, непроварами, малыми толщинами металла в местах вдавливания пуансонов (при холодной

сварке), неправильной установкой шайб (в болтовых соединениях)) и другими нарушениями технологии исполнения перемонтируются.

Периодический контроль состояния контактов производится в определенные ПУЭ сроки и может выполняться при работе установки или в отключенном ее состоянии.

При работе установки состояние контактных соединений может оцениваться по температуре их нагрева рабочим током нагрузки или по падению напряжения на них. Состояние контактов отключенной установки оценивается по результатам измерения их переходного сопротивления.

Температура нагрева контактов измеряется дистанционно с помощью индикаторов инфракрасного излучения (тепловизоров, радиометров) или специальных электротермометров (типа ЭГ-1, ЭГ-2). Электротермометры выполняются в виде измерительной головки, в которую вмонтирован температурный датчик и микроамперметр. Головка укрепляется на конце измерительной штанги. Для измерения головка прижимается штангой к контакту, находящемуся под напряжением, и производится отсчет по шкале прибора.

Оценка состояния контактов, находящихся под током нагрузки, может производиться и по величине падения напряжения на участке цепи, содержащей контактное соединение. Для этого используется метод сравнения падения напряжения на участке цепи с контактом и на участке такой же длины без контакта. Измерения производятся при помощи специальных измерительных штанг.

Рабочая часть штанги представляет собой съемную головку с двумя парами сменных измерительных щупов и измерительным прибором (рис. 9.8). Измерительные щупы накладываются на участок с контактом и после отсчета показания прибора – на участок без контакта. Если показания прибора отличаются более чем на 20 %, то контактное соединение считается дефектным.

Однако ни температура нагрева контакта, ни падение напряжения на нем не позволяют судить о начале развития дефекта в контакте. Это объясняется большой теплоемкостью и теплопроводностью металла, большой массой контакта, зависимостью нагрева от тока нагрузки и условий охлаждения.

Точная оценка состояния контактов производится по величине измеренного его переходного сопротивления. Но для этого необходимо вывести установку из работы.

Измерение  $R_k$  может быть выполнено на постоянном и переменном токе. Истинным значением переходного сопротивления является сопротивление постоянному току. При измерении на переменном токе в результате дополнительно учитывается индуктивное сопротивление измерительной цепи. Величина же индуктивного сопротивления зависит от частоты тока и размеров измерительного контура. Поэтому измерения на переменном токе не позволяют точно измерить переходное сопротивление.

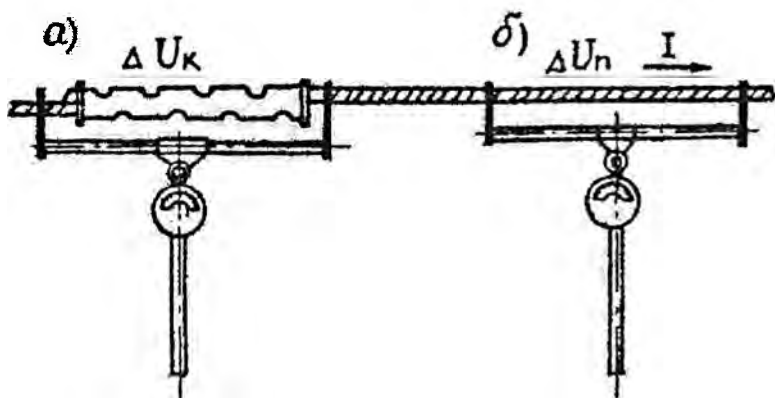


Рис. 9.8. Положение головки штанги при контроле соединительных контактов: а — измерение падения напряжения на участке, содержащем КС; б — измерение падения напряжения на участке целого провода

Непрерывный контроль состояния контактных соединений, недоступных для измерения штангой, выполняется с помощью термоуказателей однократного или многократного действия. Термоуказатели однократного действия представляют собой полоски бумаги, окрашенной термочувствительной краской, меняющей свой цвет при температуре  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , и наклеенные на доступные осмотру части контактов. Они могут выполняться и в виде флажковых указателей, состоящих из двух частей, способных перемещаться друг относительно друга и закрепленных легкоплавким припоем. Такой указатель устанавливается вблизи контакта. При нагревании контакта и соответственно припоя выше температуры плавления одна из частей указателя под действием силы тяжести или пружины проворачивается

отпадает) в заданном направлении, сигнализируя о недопустимом нагреве контакта.

Термоуказатели многократного действия представляют собой полосу термопленки, меняющей свой цвет под действием температуры. При остывании поверхности, на которую наклеена термопленка, ее цвет восстанавливается до первоначального. Термопленочные указатели наклеиваются на поверхность контакта клеем БФ-4.

### **Задание по работе**

1. Ознакомиться с различными видами контактных соединений токоведущих частей, имеющихся в лаборатории.
2. Рассмотреть физические процессы в контактном соединении при длительном протекании токов нагрузки и кратковременных токах короткого замыкания.
3. Рассмотреть способы получения контактных соединений разных видов.
4. Определить переходное сопротивление болтового соединения шины лабораторной установки.
5. Снять данные и построить график зависимости переходного сопротивления исследуемого контактного соединения на постоянном и переменном токах.
6. Рассчитать зависимости  $R_k = f(F)$  по формуле (9.1). Сравнить с экспериментальными данными. Выяснить причины различия данных.
7. Составить отчет о работе.

### **Описание лабораторной установки**

Лабораторная установка включает в себя стенд, где представлены пронумерованные образцы различных контактных соединений токоведущих частей, и испытательную установку по исследованию плоского шинного контакта.

Испытательная установка содержит источник регулируемого напряжения (ЛАТР) и нагрузочный трансформатор Т1, трансформатор тока ТА и амперметр РА, плоскую стальную шину сечением  $15 \times 0,8 \text{ мм}^2$  с исследуемым ХТ и болтовым ХТ1 контактами.

Шина имеет три равных по длине участка:

- 1-2 – с исследуемым контактным соединением ХТ;
- 2-3 – с болтовым соединением ХТ1;
- 3-4 – участок сплошной (без контактов).

Исследуемый контакт состоит из отрихтованных контактных поверхностей двух концов шины и металлического квадрата, помещенного между ними. Размеры этого квадрата из стали 10 x 10 x 2 мм. Сила сжатия контактных поверхностей может изменяться в пределах от 0 до 10 кг (100 Н) затяжкой гайки, сжимающей калиброванную пружину.

Для измерения сопротивления участков токоведущей шины на стенде установлен вольтметр В7-27.

Кроме того, на лабораторном столе приводятся необходимые для выполнения работы таблицы справочных данных.

### **Техника безопасности**

При выполнении лабораторной работы необходимо соблюдать требования инструкции по технике безопасности при работе в лаборатории «Электрические станции».

Изменение силы сжатия калиброванной пружины производить только при отключенной установке от сети питания.

### **Методические указания и порядок выполнения работы**

1. Для выполнения работы необходимо изучить содержание настоящего лабораторного практикума, ознакомиться с представленными образцами контактных соединений и испытательной установкой.

2. Чтобы определить переходное сопротивление болтового соединения шины на постоянном токе необходимо:

- переключатель пределов измерений вольтметра В7-27 установить в положение 1 Ом;
- к прибору присоединить кабель № 4 и его щупы установить на поверхности токоведущей шины по концам участка 2–3 (с измеряемым сопротивлением);
- включить прибор и записать величину сопротивления участка шины с болтовым соединением;

- переставить щупы кабеля № 4 на концы участка шины 3–4 (без контактных соединений);
- измерить сопротивление этого участка;
- выключить прибор.

Сопротивление болтового соединения рассчитать по формуле

$$R_6 = R_{2-3} - R_{3-4}.$$

3. Для снятия зависимости  $R_k = f(F)$  для исследуемого контакта необходимо измерять сопротивление между концами участка шины 1-2 при разной затяжке калиброванной пружины. Измерение производится так же, как и в пункте 2.

Переходное сопротивление исследуемого контакта для каждой величины силы сжатия рассчитать по формуле

$$R_k = \frac{R_{2-3} - R_{3-4}}{2}.$$

По результатам измерений и последующих расчетов заполняется табл. 9.2.

В табл. 9.2  $R_k$  расчетное вычисляется по формуле (9.1) при  $C = 7,6 \text{ Ом} \cdot \text{Н} \cdot 10^{-2}$ ,  $m = 0,5-0,7$ .

Таблица 9.2

Сила сжатия $F$ , Н	20	40	60	80	100
Давление в контакте $P = \frac{F}{S}$ , МПа					
$R_{k1}$ , Ом (эксперимент на постоянном токе)					
$Z_k$ , Ом (эксперимент на переменном токе)					
$R_{k2}$ , Ом (расчетное)					

4. Измерение переходного сопротивления исследуемого контакта на переменном токе выполняется в следующей последовательности:

- к отключенному от сети питания вольтметру В7-27 присоединить кабель № 3, а переключатель пределов измерения перевести в положение «1В переменного тока»;

- щупы кабеля № 3 включить в гнезда Х5 соответствующих участков шины;

- включить прибор и подать питание на установку;

- установить ток в шине 4–6 А и произвести измерение падения напряжения на участке при разной «затяжке» калиброванной пружины;

- рассчитать  $Z_k$  для каждой силы давления в контакте по формуле

$$Z_k = \frac{Z_{kXS1-XS2} - Z_{XS3-XS4}}{2},$$

где  $Z_{kXS1-XS2} = \frac{\Delta U_1}{I}$ , Ом;

$\Delta U_1$  – измеренное падение напряжения на участке с исследуемым контактом при конкретном значении силы нажатия, В;

$$Z_{kXS3-XS4} = \frac{\Delta U_2}{I}, \text{ Ом};$$

$\Delta U_2$  – измеренное падение напряжения на участке шины без контактных соединений, В;

$I$  – ток в испытательной установке, А.

Рассчитанные значения  $Z_k$  записать в табл. 9.2.

5. Результаты исследований анализируются. Выясняются возможные причины, вследствие которых определенные значения  $R_{к1}$ ,  $Z_k$ ,  $R_{к2}$  отличаются друг от друга.

### Содержание отчета

В отчете должны быть приведены:

- краткие записи по содержанию работы;
- результаты определения сопротивлений участков шин и контактных соединений (заполненная табл. 9.2);
- зависимость  $R_k = f(F)$ .

## Контрольные вопросы

1. Что называется контактом и чем он характеризуется?
2. От чего зависит сопротивление контакта и как оно изменяется во времени?
3. Как зависит переходное сопротивление контакта от температуры?
4. Почему контактные поверхности стремятся изолировать от проникновения воздуха и как это может быть осуществлено?
5. Какие требования и почему предъявляются к конструкции контактного соединения?
6. Как монтируют неразборные контакты?
7. В чем состоит особенность монтажа разъемных соединений?
8. Как выполняется соединение контактного наконечника с жилой кабеля методом холодной сварки?
9. Как осуществляется присоединение проводов и шин к выводам аппаратов?
10. Как контролируется качество разборных контактов при эксплуатации?

**Литература:** [2] (с. 89–99); [8] (с. 69–88); [9].

Работу подготовил В.Н. Мазуркевич



## Литература

1. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций / Л.Д. Рожкова, Л.К. Корнеева, Т.В. Чиркова. – М.: Академия, 2004.
2. Электрическая часть станций и подстанций / под ред. А.А. Васильева. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть станций и подстанций (справочные материалы) / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения / под ред. В.В. Афанасьева. – Л.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Лисовский, Г.С. Главные схемы и электротехническое оборудование подстанций 35–750 кВ / Г.С. Лисовский, М.Э. Хейфиц. – М.: Энергия, 1977.
6. Улисова, И.Н. Вакуумные коммутационные аппараты за рубежом / И.Н. Улисова. – М.: Информэлектро, 1982.
7. Афанасьева, В.В. Приводы к выключателям и разъединителям высокого напряжения / В.В. Афанасьева, Э.Н. Якунин. – Л.: Энергоатомиздат, 1982.
8. Теория электрических аппаратов / под ред. Г.Н. Александрова. – М.: Высшая школа, 1985.
9. Бредихин, А.Н. Электрические контактные соединения / А.Н. Бредихин, М.В. Хомяков. – М.: Энергия, 1980.

## Содержание

Лабораторная работа № 1 ОБОРУДОВАНИЕ И СХЕМЫ ПЕРВИЧНЫХ ЦЕПЕЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ .....	3
Лабораторная работа № 2 РАЗЪЕДИНИТЕЛИ, ОТДЕЛИТЕЛИ И КОРОТКОЗАМЫКАТЕЛИ .....	12
Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛООБЪЕМНОГО МАСЛЯНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ .....	21
Лабораторная работа № 4 ВЫКЛЮЧАТЕЛИ НАГРУЗКИ .....	34
Лабораторная работа № 5 ВАКУУМНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ .....	45
Лабораторная работа № 6 ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ И ОГРАНИЧИТЕЛИ УДАРНОГО ТОКА .....	55
Лабораторная работа № 7 ПРИВОДЫ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И РАЗЪЕДИНИТЕЛЕЙ .....	68
Лабораторная работа № 8 НАГРЕВ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И АППАРАТОВ РАБОЧИМИ ТОКАМИ НАГРУЗОК .....	87
Лабораторная работа № 9 ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК .....	104

Учебное издание

# ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Лабораторный практикум  
для студентов энергетических специальностей

В 3 частях

Часть 1

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Составители:

МАЗУРКЕВИЧ Владимир Николаевич  
РУМЯНЦЕВ Юрий Георгиевич  
СВИТА Леонтий Николаевич

Редактор И.Ю. Никитенко

---

Подписано в печать 23.07.2009.

Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 7,61. Уч.-изд. л. 5,95. Тираж 200. Заказ 363.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.