



Министерство образования  
Республики Беларусь  
**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

---

---

Кафедра «Электроснабжение»

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ**

**Рабочая программа, методические указания  
и контрольное задание  
для студентов заочной формы обучения**

**М и н с к 2 0 0 9**

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

---

Кафедра «Электроснабжение»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Рабочая программа, методические указания  
и контрольное задание для студентов заочной формы обучения  
специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение»  
и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

М и н с к 2 0 0 9

УДК 621.31(075.8)

ББК 31.264я7

Э 45

С о с т а в и т е л и:

*Л.В. Прокопенко, В.Н. Сацукевич*

Р е ц е н з е н т ы:

*В.Л. Булат, М.И. Фурсанов*

Данное издание включает рабочую программу дисциплины «Электрические аппараты» и задания к выполнению контрольной работы студентами заочной формы обучения специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение» и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы».

Для облегчения самостоятельного изучения дисциплины по каждому ее разделу сформулированы вопросы для самопроверки знаний студентов, приведена рекомендуемая литература, в приложениях содержатся справочные материалы, необходимые для решения задач.

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО РАЗДЕЛАМ

## Введение

Цели и задачи дисциплины. Назначение электрических аппаратов. Общие требования, предъявляемые к ним. Условные графические обозначения аппаратов и их элементов.

Литература: [1, с. 5–30].

### *Методические указания*

Во введении следует изучить цели и задачи дисциплины, усвоить основные понятия, определения и термины. Изучить условные обозначения электрических аппаратов и их элементов, основные требования к электрическим аппаратам.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Что называется электрическим аппаратом?
2. Какие общие требования предъявляются к электрическим аппаратам?
3. Как обозначаются электрические аппараты и их элементы в электрических схемах?

## Основы теории электрических аппаратов

Классификация электрических аппаратов. Электродинамические силы в электрических аппаратах. Силы, действующие на элементы токоведущей цепи. Динамическая стойкость аппаратов. Нагрев электрических аппаратов в нормальном режиме и при коротком замыкании, термическая стойкость. Электрические контакты: переходное сопротивление контактов, зависимость этого сопротивления от различных факторов, работа коммутирующих контактов при включении, в замкну-

том состоянии, при отключении. Расчет и выбор контактного нажатия; материалы контактов. Конструкции контактов.

Электрическая дуга. Свойства электрической дуги. Условия гашения дуги постоянного и переменного тока. Конструкции дугогасительных устройств низкого и высокого напряжения. Бездуговые отключения электрических цепей. Инновационные технологии в разработке электрических аппаратов. Электромагнитные механизмы. Магнитные цепи электрических аппаратов постоянного и переменного тока. Простейший расчет потока в рабочем зазоре электромагнита. Сила тяги электромагнитов постоянного и переменного тока. Влияние магнитного сопротивления стали на силу тяги электромагнита.

Устранение вибрации якоря электромагнита переменного тока. Расчет обмоток электромагнитов. Согласование тяговых характеристик электромагнита с механической нагрузкой. Время срабатывания и отпускания электромагнитов. Ускорение и замедление времени срабатывания и отпускания электромагнитов.

Литература: [1, с. 5–10, 31–245].

### *Методические указания*

Электрические аппараты можно классифицировать по ряду признаков: назначению, области применения, принципу действия, роду тока и др. Основной является классификация по назначению, которая предусматривает разделение электрических аппаратов на ряд больших групп, например: коммутационные, ограничивающие, пускорегулирующие и др.

При проектировании и разработке электрических аппаратов в первую очередь необходимо учитывать электродинамические усилия, возникающие в них в процессе работы.

Следует изучить методы расчета электродинамических усилий, усилия, возникающие между параллельными проводниками, усилия в витке, катушке и между витками, усилия в месте изменения сечения проводника, а также электродинамические

усилия при переменном однофазном и трехфазном токах и усвоить понятие электродинамической стойкости аппаратов.

При работе электрических аппаратов все элементы их подвергаются тепловому воздействию. Нагрев токоведущих частей и изоляции аппаратов существенно определяет надежность работы. При повышении температуры сокращается срок службы изоляции и уменьшается механическая прочность проводников.

Необходимо изучить причины нагрева электрических аппаратов при постоянном и переменном токе, способы передачи тепла внутри нагретых тел и с их поверхности. Особое внимание уделить изучению установившегося режима нагрева, кратковременного и повторно-кратковременного, а также при коротком замыкании.

Определение электрического контакта. Режимы работы контактов (включение, включенное состояние, отключение), материалы, конструкции, расчет контактов.

Ряд коммутационных аппаратов связан с возникновением, протеканием и гашением электрической дуги между контактами. Этому явлению в теории электрических аппаратов уделяется большое внимание. Следует изучить причины появления и свойства электрической дуги при постоянном и переменном токах. Особенности отключения дуги при разных видах нагрузки, условия гашения дуги, способы гашения. Конструкции дугогасительных устройств низкого и высокого напряжения. Бездуговые отключения электрических цепей. Важным конструктивным элементом многих электрических аппаратов являются электромагниты постоянного и переменного тока. На основе теории магнитных цепей следует изучить методику расчета обмоток электромагнитов постоянного и переменного тока, силу тяги и согласование тяговых характеристик с механической нагрузкой, способы устранения вибрации якоря электромагнита переменного тока, динамику работы и время срабатывания и отпускания электромагнитов, ускорение и замедление времени срабатывания и отпускания электромагнитов.

## *Вопросы для самопроверки*

1. Какие существуют методы расчета электродинамических усилий?
2. Как определить электродинамические усилия между параллельными проводниками?
3. Как определить электродинамические усилия и моменты, действующие на взаимно перпендикулярные проводники?
4. Как рассчитываются усилия в витке, катушке и между катушками?
5. Как рассчитываются электродинамические усилия в месте изменения сечения проводника?
6. Что такое электродинамическая стойкость аппаратов?
7. Как определяются электродинамические усилия при однофазном переменном токе, трехфазном токе при отсутствии и наличии апериодической составляющей тока?
8. Что такое поверхностный эффект? Как он влияет на величину сопротивления проводника на переменном токе?
9. Что такое эффект близости? Как он влияет на величину сопротивления проводника на переменном токе?
10. Способы передачи тепла внутри нагретых тел и с их поверхности.
11. Что такое установившийся процесс нагрева?
12. Как происходит нагрев аппаратов в переходных режимах?
13. В чем особенность нагрева аппаратов при коротких замыканиях?
14. Пояснить понятие «термическая стойкость» аппарата.
15. Что называется электрическим контактом? Опишите основные конструкции контактов, материалы контактов.
16. Поясните режимы работы контактов при включении, во включенном состоянии, при отключении цепи.
17. Что такое переходное сопротивление контакта, как оно зависит от величины протекающего тока?
18. Каковы меры борьбы с эрозией и коррозией контактов?

19. Причины появления электрической дуги в аппаратах.
20. Пояснить статическую вольтамперную и динамическую характеристики дуги постоянного тока.
21. Пояснить условие стабильного горения и гашения дуги постоянного и переменного тока.
22. Каковы причины возникновения перенапряжения при отключении дуги постоянного тока?
23. Как происходит процесс восстановления напряжения на дуговом промежутке при отключении активной нагрузки, индуктивной нагрузки?
24. Какие факторы влияют на скорость восстановления напряжения на дуговом промежутке в цепи переменного тока?
25. Опишите основные способы гашения дуги в электрических аппаратах.
26. Как осуществляется бездуговая коммутация электрических цепей?
27. Пояснить законы Кирхгофа для магнитной цепи электромагнита.
28. Пояснить методику расчета магнитной цепи электромагнитов постоянного тока, переменного тока.
29. Чем отличается назначение короткозамкнутого витка в электромагнитных механизмах постоянного и переменного тока?
30. Как производится расчет обмотки электромагнита постоянного тока, переменного тока?
31. Как рассчитывается сила тяги электромагнитов постоянного и переменного тока?
32. Как зависит сила тяги электромагнитов постоянного и переменного тока от величины воздушного зазора?
33. Пояснить динамику работы электромагнитов и время срабатывания (время трогания, время движения якоря, время отпускания, ускорение и замедление срабатывания и отпускания).



## **Коммутационные аппараты низкого напряжения, реле напряжения, тока и времени, позисторная защита двигателей, автоматические воздушные выключатели (автоматы)**

Контакторы и магнитные пускатели: конструкция контакторов постоянного и переменного тока; основные параметры и режимы работы контакторов. Магнитные пускатели: устройство, схема включения, тепловая защита. Выбор контакторов и магнитных пускателей.

Реле напряжения, тока и времени. Основные параметры реле и требования, предъявляемые к ним. Электромагнитные реле тока и напряжения. Коэффициент возврата реле. Конструкция электромагнитных реле тока и напряжения. Электромагнитные реле на герконах. Тепловые реле: принцип действия. Времятоковые характеристики, выбор реле.

Позисторная защита двигателей. Поляризованные реле. Принцип действия, основные соотношения. Преимущества поляризованных реле. Реле времени с механическим и электромагнитным замедлением. Устройство, регулировка и области применения реле.

Автоматические воздушные выключатели (автоматы): назначение, требования, предъявляемые к автоматам, принцип действия. Предохранители. Основные параметры и требования, предъявляемые к предохранителям. Работа предохранителей при номинальном токе и коротком замыкании. Конструкция предохранителей. Защита полупроводниковых приборов автоматики предохранителями. Выбор автоматов и предохранителей.

Литература: [1, с. 308–403, 504–552].

### *Методические указания*

Контакторы и магнитные пускатели нашли самое широкое применение в схемах электроснабжения.

Контакторы – это электрические аппараты дистанционного действия, предназначенные для частых включений и отключений силовых электрических цепей при нормальных режимах работы. Выпускаются контакторы для коммутации цепей переменного и постоянного тока. Наибольшее применение нашли контакторы с электромагнитным приводом, когда контактная система приводится в действие при помощи электромагнита, реже применяются контакторы с пневматическим и гидравлическим приводами.

При изучении контакторов постоянного и переменного тока необходимо изучить их устройство: контактные, дугогасительные и электромагнитные системы, методику выбора для практического применения, основные серии выпускаемых контакторов и их технические характеристики.

Магнитные пускатели предназначены для пуска и отключения короткозамкнутых асинхронных двигателей. Кроме контактора в пускатель встроено, как правило, тепловое реле, которое служит для защиты двигателя от токов перегрузки. При изучении магнитных пускателей следует обратить внимание не только на их конструкцию и устройство, а также и на схемы их включения (неревверсивная и реверсивная).

В схемах автоматики, управления, защиты широко применяются различные типы реле: тока, напряжения, мощности, частоты, времени, тепловые и др. Реле представляет собой электрический аппарат, в котором при изменении входного параметра до определенной заданной величины происходит скачкообразное изменение выходного параметра. Реле может реагировать не только на входной параметр, но и на разность значений входного параметра, на изменение знака или скорости изменения входного параметра. К основным характеристикам реле относятся: параметр срабатывания (например, значение тока, напряжения, при котором срабатывает реле), параметр отпускания (значение входного параметра, при котором происходит скачкообразное отпускание реле). Значения

параметров срабатывания или отпускания, на которые отрегулировано реле, называются уставкой по входному параметру. Время с момента подачи команды на срабатывание до момента начала возрастания выходного параметра называется временем срабатывания.

Значение отношения величины параметра отпускания к величине параметра срабатывания называется коэффициентом возврата.

Время с момента подачи команды на отключение до достижения минимального значения выходного параметра называется временем отключения.

Важным параметром для ряда реле является коэффициент усиления, определяемый как отношение максимальной мощности нагрузки в управляемой цепи к минимальной мощности входного сигнала срабатывания реле.

При выборе реле учитываются требования по селективности, быстродействию, чувствительности и надежности.

В схемах электроснабжения применяются электромагнитные реле серий РТ и РН. Система контактов этих реле приводится в действие с помощью электромагнитов постоянного и переменного тока. Противодействующие усилия в таких реле создаются возвратной и контактными пружинами.

Тепловые реле предназначены для защиты оборудования от токов перегрузки. Реле имеют биметаллический элемент, состоящий из двух пластин с различным коэффициентом линейного расширения. Широкое распространение в тепловых реле получили такие материалы, как инвар (с малым значением коэффициента линейного расширения) и хромоникелевая сталь (с большим значением коэффициента линейного расширения).

При нагревании биметаллическая пластина изгибается и воздействует на контакты реле. Биметаллическая пластина должна при токе перегрузки двигателя достигнуть температуры срабатывания за такое время, в течение которого двигатель может выдержать данную нагрузку. Поэтому, одной из основных

характеристик теплового реле является времятоковая характеристика, выражающая зависимость времени срабатывания реле от тока, протекающего через него.

В настоящее время для защиты электродвигателей применяются позисторы, устанавливаемые на лобовой части обмоток двигателей. Позисторы являются нелинейными резисторами. При достижении определенной температуры сопротивление позистора скачкообразно увеличивается на несколько порядков. Это свойство позистора позволяет с помощью специальных полупроводниковых схем сформировать управляющий сигнал на размыкание цепи электромагнита пускателя, после чего обмотка статора отключается от сети.

Широкое применение в устройствах электросиловой автоматики, релейной защиты, в системах телеуправления получили поляризованные реле. В них действуют два магнитных потока, один из которых создается катушкой электромагнита, другой – установленным в цепи постоянным магнитом.

Благодаря поляризующему потоку направление электромагнитного усилия на якорь изменяется в зависимости от тока в катушке. По сравнению с обычными реле поляризованные электромагнитные реле имеют ряд преимуществ:

- реле могут управляться кратковременными импульсами тока;
- замкнутое состояние контактов может сохраняться после окончания действия управляющего импульса, что позволяет использовать реле как элемент памяти;
- высокая чувствительность и высокий коэффициент усиления по мощности;
- возможность осуществления однопозиционной, нейтральной и двухпозиционной настроек.

В схемах релейной защиты, различной автоматики широко применяются реле времени, создающие выдержку времени при действии различных аппаратов и устройств. Для этой цели применяются реле с электромагнитным замедлением (демпфером)

и механическим. В качестве механического замедляющего устройства чаще всего применяется часовой (анкерный) механизм.

Автоматические воздушные выключатели (автоматы) служат для автоматического отключения цепи при перегрузках оборудования, коротких замыканиях в цепи, редких оперативных переключениях при нормальных режимах работы, при снижении напряжения питания и т.п. В соответствии с назначением автоматов к ним предъявляются следующие требования:

- токоведущая цепь автомата должна пропускать номинальный ток в течение длительного времени и кратковременно выдерживать большие токи короткого замыкания (КЗ);

- автомат должен обеспечивать многократное отключение предельных токов короткого замыкания;

- автомат должен иметь малое время отключения для обеспечения электродинамической и термической стойкости энергоустановок;

- элементы защиты автомата должны обеспечивать селективность срабатывания.

К основным узлам автомата относятся: токоведущая цепь, дугогасительная система, привод, механизм свободного расцепления, расцепители.

Автоматы выбираются по номинальному значению напряжения сети, длительному току нагрузки и кратковременному максимальному току.

Предохранители предназначены для защиты оборудования электрических цепей от токов КЗ и перегрузок. Основными элементами являются: корпус, контактное присоединительное устройство, плавкая вставка и дугогасительное устройство. Важнейшей характеристикой предохранителя является зависимость времени перегорания плавкой вставки от тока – времятоковая характеристика. К предохранителям предъявляются следующие требования:

- времятоковая характеристика должна проходить ниже, но

вблизи времятоковой характеристики защищаемого объекта;  
– время срабатывания предохранителя при КЗ должно быть минимальным, особенно при защите полупроводниковых приборов;

– должна обеспечиваться селективность защиты в цепях с несколькими предохранителями;

– конструкция предохранителей должна обеспечивать возможность безопасной и быстрой замены плавкой вставки.

Предохранители выбираются по номинальному току плавкой вставки, который должен быть больше или равен номинальному току электроприемника, и больше или равен кратковременным предусмотренным увеличениям тока в цепи, например, во время пуска двигателя.

### *Вопросы для самоконтроля*

1. Для чего применяются контакторы? Какие требования предъявляются к ним?

2. Пояснить принцип действия контакторов постоянного и переменного тока.

3. Какие дугогасительные устройства применяются в контакторах постоянного и переменного тока?

4. Каково назначение короткозамкнутого витка в контакторах переменного тока?

5. Пояснить зависимость тока в катушке от воздушного зазора в контакторах постоянного и переменного тока.

6. Как выбираются контакторы?

7. Для каких целей служит тепловое реле в магнитных пускателях?

8. Опишите конструкции тепловых реле и принцип их работы.

9. Как устроен магнитный пускатель серии ПМЛ?

10. Описать схемы включения нереверсивного и реверсивного пускателя.

11. Каково назначение электрической и механической бло-

кировок в магнитном пускателе?

12. Описать схему включения тиристорного пускателя.

13. Пояснить назначение реле и основные их характеристики.

14. Каков принцип действия электромагнитных реле тока и напряжения?

15. Описать конструкции электромагнитных реле, привести их основные параметры, характеристики.

16. Пояснить принцип действия поляризованных реле, их параметры и характеристики.

17. Каково назначение и устройство реле времени (с электромагнитным, механическим и пневматическим замедлением)?

18. Как осуществляется регулировка выдержки времени реле времени?

19. Как осуществляется позисторная защита двигателей?

20. Назначение автоматических воздушных выключателей (автоматов) и требования, предъявляемые к ним.

21. Пояснить устройство и назначение основных узлов автомата.

22. Какие принципы гашения дуги применяются в автоматах?

23. Как осуществляется выбор автоматов?

24. Пояснить устройство и назначение предохранителей. Типы предохранителей, применяемых в сети до 1 кВ.

25. Для каких целей используется металлургический эффект у плавких вставок?

26. Пояснить времятоковую характеристику предохранителей.

27. В чем особенность устройства предохранителей для защиты полупроводниковых приборов?

28. Как осуществляется выбор предохранителей для защиты электрических цепей?

## **Бесконтактные электрические аппараты**

Магнитные усилители: принцип действия дроссельного магнитного усилителя (ДМУ) и усилителя с самонасыщением

(МУС), основные характеристики и соотношения ДМУ и МУС.

Полупроводниковые электрические аппараты. Гибридные выключатели переменного тока низкого и высокого напряжения. Тиристорные приставки к контакторам переменного тока и их характеристики. Принцип действия и параметры полностью полупроводникового коммутатора (тиристорного пускателя). Коммутаторы постоянного тока на полупроводниках (тиристорах). Полупроводниковые реле.

Бесконтактные аппараты с оптоэлектронными и магнито-полупроводниковыми приборами. Согласование коммутационных аппаратов с системами микропроцессорного управления. Национальный подход к развитию микроэлектроники и полупроводниковой техники.

Литература: [1, с. 245–281, 331–334, 403–466].

### *Методические указания*

Магнитный усилитель служит для усиления электрического сигнала по току, напряжению или мощности. По конструкции они представляют собой дроссели со стальным сердечником, включаемые в сеть переменного тока. Подмагничиванием дросселей постоянного тока можно в широких пределах изменять переменный ток в регулируемой цепи.

Из многообразия схем магнитных усилителей наибольшее распространение получила схема с самоподмагничиванием (самонасыщением), обладающая наиболее высоким коэффициентом усиления и быстродействием.

Наиболее важными характеристиками магнитных усилителей являются:

коэффициент усиления (по току, напряжению, мощности); крутизна характеристики управления, кратности тока нагрузки; быстродействие.

В цепях управления и защиты широкое применение получили бесконтактные полупроводниковые электрические аппараты. На основе применения тиристоров разработаны пуска-



тели для прямого пуска двигателей, плавного пуска, реверса и останова, регуляторы мощности и напряжения, автоматические выключатели переменного тока повышенного быстродействия и др.

Гибридные (комбинированные) контакторы представляют собой комбинацию тиристорного и механического контакторов. В них совмещены положительные свойства механического контактора при установившемся состоянии «включено» с достоинствами тиристорного контактора в отношении переходных процессов включения и выключения. Полупроводниковые приборы в таком гибридном контакторе нагружены только во время процессов включения и выключения, поэтому не рассчитываются на ток короткого замыкания.

Полупроводниковые реле в отношении быстродействия, селективности, надежности, чувствительности превосходят электромагнитные. В измерительных органах полупроводниковых реле используются следующих три принципа:

- 1) сравнение однородных физических величин, например, заданного напряжения с фактическим.
- 2) проявление физического эффекта, возникающего при определенном значении измеряемой величины напряжения; скачок в нелинейной характеристике туннельного диода, релейная характеристика триггера Шмидта и др.;
- 3) преобразование входного сигнала и заданного в цифровую форму.

На основе полупроводниковых элементов выполняются различные виды реле:

- реле тока в схемах защиты при замыкании на землю генераторов, двигателей и линий с малыми токами замыкания на землю;
- реле защиты асинхронных двигателей;
- реле напряжения;
- реле времени.

Если гальваническая связь между цепью управления и цепью нагрузки недопустима, то применяются оптоэлектронные при-

боры. В этих приборах установлен излучающий элемент, чаще – это фотодиод, и фотовоспринимающий элемент – фототранзистор, фототиристор или фоторезистор. При подаче сигнала на фотодиод он начинает светиться и воздействовать на воспринимающий элемент, который меняет свой режим работы.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Пояснить принцип работы магнитных усилителей ДМУ, МУС и их основные характеристики.
2. Как определяются их коэффициенты усиления по току, мощности?
3. Пояснить, в чем отличие магнитного усилителя с самоподмагничиванием и дроссельного.
4. Для чего служат обмотки обратной связи, смещения и как они влияют на параметры магнитного усилителя?
5. Назначение и преимущества бесконтактных полупроводниковых электрических аппаратов.
6. Как влияет сопротивление обратной связи на характеристики полупроводниковых реле?
7. Пояснить схему силового блока тиристорного пускателя.
8. Как осуществляется защита от перегрузок двигателя в тиристорном пускателе?
9. Принцип действия полупроводниковых реле и области их применения.

### **Электрические аппараты высокого напряжения**

Высоковольтные выключатели: назначение, основные параметры. Устройство воздушных, элегазовых, масляных, электромагнитных и вакуумных выключателей: краткая характеристика, область применения, выбор. Охрана труда при работе с аппаратами высокого напряжения. Разъединители, отделители, короткозамыкатели: назначение, устройство. Высоковольтные

предохранители: устройство, основные параметры, выбор. Выключатели нагрузки: устройство, выбор. Трансформаторы тока (ТТ), напряжения (ТН): назначение, устройство ТТ и ТН на различные классы напряжения, режимы работы, основные параметры, выбор ТТ и ТН. Реакторы: назначение, устройство одинарных и сдвоенных реакторов, основные параметры, выбор реакторов. Инновационные пути развития электроаппаратостроения.

Литература: [1, с. 526–530, 552–628, 640–680].

### *Методические указания*

Выключатели являются важнейшими коммутационными аппаратами. Они служат для включения и отключения токов нагрузки, токов короткого замыкания, токов холостого хода силовых трансформаторов, емкостных токов конденсаторных батарей, линий электропередачи. К основным параметрам выключателя относятся: номинальное напряжение, номинальный (длительный) ток, номинальный ток термической стойкости, номинальный ток электродинамической стойкости, номинальный ток отключения, номинальная мощность отключения, номинальный ток включения, собственное время включения и отключения, полное время включения и отключения.

В масляных выключателях дуга, образующаяся между контактами, горит в трансформаторном масле. Под действием энергии дуги масло разлагается и образующиеся при этом газы и пары используются для гашения дуги. В зависимости от изоляции токоведущих частей различают баковые выключатели и маломасляные (малообъемные). В баковых выключателях масло используется для гашения дуги и изоляции токоведущих частей соседних фаз друг от друга и от земли, а в малообъемных выключателях трансформаторное масло используется только для гашения дуги. В воздушных выключателях в качестве гасящей среды используется сжатый воздух, находящийся в баке под давлением. При отключении сжатый воз-

дух из бака подается в дугогасительное устройство, обдувая дугу. В элегазовых выключателях гашение дуги осуществляется за счет охлаждения ее движущимся с большой скоростью элегазом, который используется и как изолирующая среда. В электромагнитных выключателях гашение дуги происходит за счет увеличения ее сопротивления вследствие интенсивного удлинения и охлаждения. В вакуумных выключателях контакты расходятся в вакууме. Возникающая при расхождении контактов дуга быстро гаснет благодаря интенсивной диффузии зарядов в вакууме.

При сравнительно небольшом токе нагрузки (400–600 А) в сетях 6–10 кВ применяются выключатели нагрузки. Они имеют дугогасительные устройства небольшой мощности для отключения токов нагрузки. Для гашения дуги применяются камеры с автогазовым, электромагнитным, элегазовым дутьем и вакуумными элементами. Для отключения токов короткого замыкания применяются высоковольтные предохранители.

Разъединители используют в системах электроснабжения для разъединения и переключения участков сети, находящихся под напряжением. Они создают необходимый видимый разрыв электрической цепи, требуемый условиями эксплуатации. Разъединители не имеют специальных устройств для гашения дуги, и с помощью их можно отключать небольшие токи, например, токи холостого хода трансформаторов, зарядные токи шин, линий.

Отделители – коммутационные аппараты, выполненные на базе разъединителей. Их назначение такое же, как и разъединителей. Отделители оснащены быстродействующим автоматическим приводом, с помощью которого производится быстрое размыкание цепи, например, в бестоковую паузу при действии автоматического повторного включения.

Короткозамыкатели служат для искусственного создания короткого замыкания, когда ток при повреждениях в трансформаторе может оказаться недостаточным для срабатывания релейной защиты. Они применяются на подстанциях без вы-

ключателей со стороны высшего напряжения.

Высоковольтные предохранители чаще всего применяются для защиты силовых трансформаторов небольшой мощности, электродвигателей, распределительных сетей, трансформаторов напряжения.

Наибольшее распространение получили предохранители с мелкозернистым наполнителем и стреляющие.

Предохранители характеризуются следующими параметрами: номинальным напряжением, наибольшим рабочим напряжением, номинальными токами предохранителя и плавкой вставки, номинальным и наименьшим токами отключения.

Трансформаторы тока имеют замкнутый магнитопровод с двумя обмотками. Через первичную обмотку проходит измеряемый ток, вторичная обмотка подключается к измерительным приборам или реле. Один вывод вторичной обмотки трансформатора обязательно заземляется. Основными параметрами трансформатора являются: номинальное напряжение, номинальный первичный и вторичный токи, номинальный коэффициент трансформации, номинальная мощность нагрузки. Класс точности трансформатора определяется его погрешностью по току в процентах при первичном токе, равном 100–120 % от номинального. Трансформаторы тока могут иметь классы точности: 0,2; 0,5; 1; 3; 10.

Трансформаторы напряжения служат для преобразования высокого напряжения в низкое, стандартное напряжение. Обычно за номинальное вторичное напряжение принимается напряжение 100 В или  $100/\sqrt{3}$  В. Первичная обмотка трансформатора напряжения изолируется от вторичной в соответствии с классом напряжения установки. Для безопасности обслуживания один вывод вторичной обмотки заземляется. Таким образом, трансформатор напряжения изолирует измерительные приборы и реле от цепи высокого напряжения и делает безопасным их обслуживание.

Основными параметрами трансформаторов напряжения являются: номинальное напряжение первичной и вторичной обмоток, номинальный коэффициент трансформации, номинальная вторичная нагрузка, класс точности (0,2; 0,5; 1; 3), зависящий от нагрузки.

Реакторы предназначены для ограничения тока короткого замыкания. Они представляют собой катушку с большим индуктивным и малым активным сопротивлением и характеризуются номинальным током, номинальным напряжением, индуктивным сопротивлением, токами термической и динамической стойкости.

Чтобы индуктивность катушек реакторов не зависела от величины тока, протекающего по обмоткам, реакторы выполняют без стальных сердечников. Для уменьшения падения напряжения в нормальном режиме применяют сдвоенные реакторы, в которых реакторы соседних ветвей сближены так, что между ними существует сильная магнитная связь. В нормальном режиме магнитные поля реакторов направлены встречно и оказывают взаимно размагничивающее действие. В результате индуктивное сопротивление ветви падает. Основные параметры сдвоенного реактора: номинальный ток каждой ветви, индуктивное сопротивление одной ветви в процентах, коэффициент связи, электродинамическая стойкость каждой ветви, термическая стойкость одной ветви.

### *Вопросы для самопроверки*

1. Назначение и основные параметры высоковольтных выключателей.
2. Поясните устройство и принцип действия баковых масляных и маломасляных выключателей.
3. Какие приводы масляных выключателей применяются? Поясните их принципы действия.
4. Как устроены воздушные выключатели?

5. Как устроены элегазовые выключатели и вакуумные?
6. Как устроены электромагнитные выключатели?
7. Какие способы гашения дуги применяются в высоковольтных выключателях?
8. Поясните назначение, принцип действия и устройство выключателя нагрузки?
9. Как осуществляется выбор высоковольтных выключателей?
10. Назначение и устройство разъединителей и отделителей.
11. Как производится выбор разъединителей и отделителей?
12. Для каких целей служат короткозамыкатели? Поясните принцип работы и методику выбора короткозамыкателей.
13. Поясните принцип действия и устройство предохранителей с мелкозернистым наполнителем и стреляющего типа.
14. Как выбираются высоковольтные предохранители?
15. Поясните назначение, устройство и режимы работы трансформаторов тока.
16. От каких факторов и как зависит погрешность трансформаторов тока?
17. Как осуществляется выбор трансформаторов тока?
18. Поясните назначение, устройство и режимы работы трансформаторов напряжения.
19. От каких факторов и как зависит погрешность трансформаторов напряжения?
20. Как осуществляется выбор трансформаторов напряжения?
21. Поясните назначение, принципиальное устройство и основные параметры реакторов.
22. Как устроены сдвоенные реакторы? Какими параметрами они характеризуются?

## Литература

1. Чунихин, А.А. Электрические аппараты / А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
2. Чунихин, А.А. Аппараты высокого напряжения / А.А. Чунихин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
3. Основы теории электрических аппаратов / Б.К. Буль [и др.]. – М.: Высшая школа, 1970. – 600 с.
4. Задачник по электрическим аппаратам / Г.В. Буткевич [и др.]. – М.: Высшая школа, 1987. – 231 с.
5. Миловзоров, В.П. Электромагнитные устройства автоматики / В.П. Миловзоров. – М.: Высшая школа, 1983. – 408 с.



## Контрольное задание

Каждый студент должен выполнить контрольную работу, состоящую из решения задач по семи темам, содержание которых приведено ниже. Контрольная работа оформляется в школьной тетради или на листах формата А4 с приложением необходимых рисунков и схем, которые могут выполняться на миллиметровой бумаге или с помощью компьютерной графики. Текст контрольных задач переписывать не требуется, достаточно указать свой шифр и номер выполняемого варианта. Порядковый номер задачи в первой, второй и четвертой темах определяется суммой двух последних цифр шифра, а в остальных задачах – последней цифрой шифра. Температуру окружающей среды при решении задач принять равной 20 °С.

В приложениях приведены справочные материалы, позволяющие упростить поиск необходимых данных для решения поставленных задач.

### 1. Электродинамические усилия

1.0. Определить усилие, действующее на проводник длиной 4 м, по которому протекает постоянный ток 20 кА, находящийся в магнитном поле с индукцией 0,2 Тл; угол между вектором индукции и направлением тока 30°.

1.1. Определить величину и направление усилия, действующего между двумя параллельными проводниками длиной 6 м, находящимися на расстоянии 2 м друг от друга, по которым протекают постоянные токи 5 и 10 кА.

1.2. Определить силу, возникающую между двумя шинами сечением 0,2×0,02 м, по которым протекает постоянный ток 20 кА; расстояние между узкими сторонами шин 0,2 м, длина 5 м.

1.3. Параллельные прямоугольные шины сечением 0,3×0,03 м, длиной 3 м обращены друг к другу широкими сторонами, рас-

стояние между ними 0,1 м. Найти электродинамическую силу, если по шинам протекает ток 40 кА.

1.4. По двум проводникам диаметром 0,02 м, соединенным под углом  $90^\circ$ , протекает постоянный ток 20 кА; длина проводников 1 м. Определить силу, действующую на проводник, и построить ее график в зависимости от длины проводника.

1.5. Определить электродинамическую силу, действующую на перемычку, соединяющую два параллельных бесконечных проводника диаметром 0,01 м, если расстояние между проводниками 0,2 м и по ним протекает ток 10 кА. Построить зависимость силы от длины перемычки.

1.6. Вычислить значение ЭДУ и построить график силы по длине перемычки длиной 0,2 м, диаметром 0,02 м, соединяющей параллельные проводники длиной 3 м, если по ним протекает ток 25 кА.

1.7. Какое разрывающее усилие действует на место, где проводник изменяет свой диаметр с 0,04 до 0,02 м при протекании тока короткого замыкания 20 кА?

1.8. Через П-образный проводник протекает постоянный ток 6 кА. Определить полный момент относительно точки в середине перемычки, если ее длина 0,4 м, диаметр 0,01 м.

1.9. Определить силу и вращающий момент, действующие на нож разъединителя, длиной 0,4 м, если диаметр вертикального проводника 0,02 м, длина 0,6 м, а ток короткого замыкания 50 кА.

1.10. Вычислить максимальное усилие, действующее на ножи трехполюсного разъединителя при протекании тока 10 кА, длине ножей 0,6 м и расстоянии между ними 0,4 м.

1.11. Определить усилие, действующее на средний нож трехполюсного разъединителя при протекании тока короткого замыкания 60 кА, если длина ножей 0,5 м, расстояние между ними 0,2 м.

1.12. Определить силу взаимодействия между двумя шинами прямоугольного сечения, расположенными горизонтально.

Размер шин  $3 \times 15$  см. Расстояние между осями шин 20 см. Ток через каждую шину постоянный и равен 3000 А, длина шин 1 м.

1.13. Определить силу взаимодействия между двумя медными шинами прямоугольного сечения, расположенными вертикально. Размер шин  $1 \times 5$  см. Расстояние между осями шин 5 см. Ток короткого замыкания через каждую шину постоянный и равен 2500 А, длина шин 2,5 м.

1.14. Определить амплитуду и среднее значение силы, действующей на проводники однофазной сети при протекании по ним переменного тока. Амплитудное значение тока равно 200 А. Расстояние между проводниками 5 см. Длина проводников 2 м.

1.15. Определить амплитуду силы, действующую на среднюю шину трехфазной сети при коротком замыкании. Амплитудное значение тока короткого замыкания 4000 А. Размер шин  $2 \times 10$  см. Расстояние между осями шин 15 см, длина шин 5 м. Шины алюминиевые и расположены горизонтально.

1.16. Определить силу взаимодействия между двумя медными шинами прямоугольного сечения, расположенными горизонтально. Размер шин  $1 \times 5$  см. Расстояние между осями шин 10 см. Ток короткого замыкания через каждую шину постоянный и равен 1500 А, длина шин 1,5 м.

1.17. Определить амплитуду и среднее значение силы, действующей на проводники однофазной сети при протекании по ним переменного тока. Амплитудное значение тока равно 100 А. Расстояние между проводниками 10 см. Длина проводников 3 м.

1.18. Определить амплитуду силы, действующую на среднюю шину трехфазной сети при коротком замыкании. Амплитудное значение тока короткого замыкания 2000 А. Размер шин  $2 \times 10$  см. Расстояние между осями шин 10 см, длина шин 3 м. Шины алюминиевые и расположены вертикально.

## **2. Нагрев электрических аппаратов**

2.0. Рассчитайте коэффициенты поверхностного эффекта (при частотах 50 и 400 Гц) для сплошного круглого проводни-

ка из меди с диаметром 2,1 см и для алюминиевой шины прямоугольного сечения 6×2 см.

2.1. Определите, во сколько раз на переменном токе с частотой 50 Гц сопротивление будет больше, чем на постоянном токе у полого круглого медного проводника. Внутренний диаметр проводника 1,2 см, толщина стенки – 0,8 см. То же самое определить на частоте 400 Гц.

2.2. Рассчитайте коэффициент близости для медных шин прямоугольного сечения 0,382×0,159 см, расположенных вертикально на частоте 4 кГц. Расстояние между большими сторонами шин 0,05 см.

2.3. Определите градиент падения температуры вдоль координаты  $X$  в стальной стенке толщиной 5 см. Плотность теплового потока, проходящего через стенку, составляет 20 кВт/м. Данные по удельной теплопроводности материалов приведены в приложении.

2.4. Определите градиент падения температуры вдоль координаты  $X$  в стальной стенке толщиной 6 см. Плотность теплового потока, проходящего через стенку, составляет 25 кВт/м<sup>2</sup>. Данные по удельной теплопроводности материалов приведены в приложении.

2.5. Определите количество тепла, отводимого в 1 с в окружающую среду путем конвекции от горизонтального круглого проводника, нагретого до температуры 165 °С. Диаметр проводника 6 см, длина – 4,2 м. Температура окружающей среды 25° С. Отводом тепла с торцов проводника можно пренебречь.

2.6. Определите количество тепла, отводимого в 1 с в окружающую среду путем конвекции от горизонтальной плоскости, нагретой до температуры 100 °С, обращенной поверхностью вверх. Поверхность имеет прямоугольное сечение со сторонами 1 и 2 м. Температура окружающей среды 30 °С.

2.7. Определите превышение температуры плоской медной шины, поставленной на ребро, над температурой окружающей среды. Поверхность шины составляет 0,2 м<sup>2</sup>. Количество теп-

ла, отдаваемое в окружающую среду, равно 160 Вт.

2.8. Определите превышение температуры стальной поверхности над температурой окружающей среды, если площадь поверхности составляет  $1,3 \text{ м}^2$ , а количество тепла, отдаваемое в окружающую среду, равно 4 кВт.

2.9. Определите ток, который можно длительно пропускать через медную шину прямоугольного сечения  $15 \times 3 \text{ мм}$ . Температура, допустимая для изоляции шины, равна  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Температура окружающей среды  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи принять равным  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

2.10. Определите, во сколько раз больший ток можно пропустить через медный провод диаметром 8 мм при кратковременном режиме работы по сравнению с длительным режимом и времени включения 15 с. Допустимая температура нагрева  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

2.11. Определите, во сколько раз больший ток можно пропустить через алюминиевый провод диаметром 16 мм при кратковременном режиме работы по сравнению с длительным режимом и времени включения 30 с. Допустимая температура нагрева  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

2.12. Определите, какой ток можно пропустить через медный провод диаметром 8 мм при кратковременном режиме работы по сравнению с длительным режимом и времени включения 25 с. Допустимая температура нагрева  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

2.13. Определите, какой ток можно пропустить через алюминиевый провод диаметром 16 мм при кратковременном режиме работы по сравнению с длительным режимом и времени включения 20 с. Допустимая температура нагрева  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплоотдачи  $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ .

2.14. Рассчитайте, во сколько раз больший ток можно пропустить через медную шину прямоугольного сечения  $2 \times 8 \text{ мм}$ , при повторно-кратковременном режиме работы по сравнению с дли-

тельным режимом. Время включения 1 мин, время цикла 3 мин. Допустимая температура нагрева 120 °С. Коэффициент теплоотдачи 10 Вт/(м<sup>2</sup>·°С). Температура окружающей среды 20 °С.

2.15. Рассчитайте, во сколько раз больший ток можно пропустить через алюминиевую шину прямоугольного сечения 3×12 мм при повторно-кратковременном режиме работы по сравнению с длительным режимом. Время включения 2 мин, время цикла 4 мин. Допустимая температура нагрева 120 °С. Коэффициент теплоотдачи 10 Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

2.16. Определите ток короткого замыкания, который можно в течение 3 с пропускать через медный провод диаметром 1 мм (т.е. ток трехсекундной термической устойчивости). До начала короткого замыкания через провод протекал ток, нагревший его до температуры 90 °С. В конце короткого замыкания допускается температура 250 °С.

2.17. Определите диаметр алюминиевого проводника, по которому можно пропустить ток короткого замыкания 1000 А в течение 1 с. До начала короткого замыкания через провод протекал ток, нагревший его до температуры 100 °С. В конце короткого замыкания допустимая температура нагрева 200 °С.

2.18. Определите длительность протекания тока короткого замыкания 2000 А через алюминиевый провод диаметром 4 мм. До начала короткого замыкания через провод протекал ток, нагревший его до температуры 90 °С. В конце короткого замыкания допускается температура 200 °С.

### 3. Электрические контакты

3.0. Определить переходное сопротивление медного контакта (сфера–сфера) при протекании через него тока 15 А и усилия сжатия контактов 5 Н, коэффициент  $\varepsilon = 3,16 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ .

3.1. Определить переходное сопротивление серебряного контакта (сфера–сфера) при протекании через него тока 10 А и усилия сжатия контактов 4 Н, коэффициент  $\varepsilon = 0,006 \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ .

3.2. Определить превышение температуры площадки кон-

тактирования относительно тела медных односточечных контактов при протекании тока 16 А и усилия сжатия 9 Н, коэффициент  $\varepsilon = 3,16 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ .

3.3. Определить превышение температуры площадки контактирования относительно тела серебряных односточечных контактов при протекании тока 20 А и усилия сжатия 6 Н,  $\varepsilon = 0,006 \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ .

3.4. Определите, какой длительный ток можно пропустить через медные односточечные контакты при усилии сжатия 3 Н, коэффициент  $\varepsilon = 0,014 \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ . Падение напряжения в контакте для точки размягчения  $U_1 = 0,12 \text{ В}$ .

3.5. Определить силу сжатия серебряных односточечных контактов при протекании номинального тока 12 А, коэффициент  $\varepsilon = 0,006 \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ , падение напряжения в контакте для точки размягчения  $U_1 = 0,09 \text{ В}$ .

3.6. Определить длительный ток, который можно пропустить через медные односточечные контакты, чтобы превышение температуры площадки контактирования относительно тела контактов было 10 °С, при усилии сжатия 5 Н, коэффициент  $\varepsilon = 0,014 \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ .

3.7. Определить необходимое усилие нажатия медных односточечных контактов, если длительный номинальный ток равен 20 А, а ток короткого замыкания 300 А. Принять коэффициент  $\varepsilon = 3,16 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ , падение напряжения в контакте для точки размягчения  $U_1 = 0,12 \text{ В}$ , значение коэффициента К при сваривании контактов принять равным  $1300 \text{ А} / \text{Н}^{0,5}$ .

3.8. Определить длительный ток через медные контакты (сфера–сфера) при превышении температуры в месте касания 8 °С и усилии сжатия контактов 5 Н. Принять коэффициент  $\varepsilon = 0,014 \text{ Ом} \cdot \text{Н}^{0,5}$ , падение напряжения в контакте для точки размягчения  $U_1 = 0,12 \text{ В}$ .

3.9. Между двумя плоскими медными шинами находятся два медных шарика (шины и шарики покрыты серебром). Шины стянуты силой 250 Н. Рассчитать сопротивление стягива-

ния при пластической деформации.

#### 4. Электрическая дуга

4.0. Определите напряжение на дуге, если катодное падение напряжения 20 В, анодное падение напряжения 10 В, напряженность электрического поля в столбе дуги  $3 \cdot 10^3$  В/м, а длина столба дуги 3 мм.

4.1. Определите напряжение на дуге, если катодное падение напряжения 18 В, анодное падение напряжения 6 В, напряженность электрического поля в столбе дуги  $2 \cdot 10^3$  В/м, длина столба дуги 2 мм.

4.2. Определите, какое напряжение дуги достаточно для ее гашения. Напряжение источника питания 110 В, ток дуги 50 А, сопротивление цепи 1,6 Ом.

4.3. Определите, какое напряжение дуги достаточно для ее гашения. Напряжение источника питания 220 В, ток дуги 80 А, сопротивление цепи 2,2 Ом.

4.4. Рассчитайте коэффициент перенапряжения, если напряжение источника питания 110 В, индуктивность цепи 0,02 Гн, скорость изменения тока в момент его исчезновения  $2 \cdot 10^4$  А/с.

4.5. Постройте зависимость восстанавливающегося напряжения от времени, если ЭДС источника питания промышленной частоты в момент нуля тока 220 В, активное сопротивление цепи 510 Ом, индуктивность цепи 0,017 Гн, эквивалентная емкость  $2,5 \cdot 10^{-8}$  Ф.

4.6. Постройте зависимость восстанавливающегося напряжения от времени, если ЭДС источника питания промышленной частоты в момент нуля тока 220 В, активное сопротивление цепи 540 Ом, индуктивность цепи 0,02 Гн, эквивалентная емкость  $2,3 \cdot 10^{-8}$  Ф.

4.7. Постройте зависимость восстанавливающегося напряжения от времени, если ЭДС источника питания промышленной частоты в момент нуля тока 110 В, активное сопротивление цепи 340 Ом, индуктивность цепи 0,008 Гн, эквивалентная



емкость  $2,1 \cdot 10^{-8}$  Ф.

4.8. Постройте зависимость восстанавливающегося напряжения от времени, если ЭДС источника питания промышленной частоты в момент нуля тока 220 В, активное сопротивление цепи 300 Ом, индуктивность цепи 0,01 Гн, эквивалентная емкость  $1,8 \cdot 10^{-8}$  Ф.

4.9. Рассчитайте среднюю скорость восстановления напряжения и коэффициент пика при ЭДС источника питания промышленной частоты в момент нуля тока 380 В, индуктивности цепи 0,02 Гн, активном сопротивлении цепи 500 Ом, эквивалентной емкости  $2,2 \cdot 10^{-8}$  Ф.

4.10. Рассчитайте среднюю скорость восстановления напряжения и коэффициент пика при ЭДС источника питания промышленной частоты в момент нуля тока 220 В, индуктивности цепи 0,016 Гн, активном сопротивлении цепи 470 Ом, эквивалентной емкости  $2,4 \cdot 10^{-8}$  Ф.

4.11. Рассчитайте среднюю скорость восстановления напряжения и коэффициент пика при ЭДС источника питания промышленной частоты в момент нуля тока 110 В, индуктивности цепи 0,012 Гн, активном сопротивлении цепи 450 Ом, эквивалентной емкости  $2,6 \cdot 10^{-8}$  Ф.

4.12. Определить энергию, поглощенную дугой постоянного тока при ее гашении, если сопротивление отключаемой цепи 2 Ом, индуктивность цепи 150 мГн, ток в дуге изменяется по линейному закону, а время гашения дуги 0,2 с. Напряжение сети 220 В.

4.13. Определить энергию, поглощенную дугой постоянного тока при ее гашении, если сопротивление отключаемой цепи 1 Ом, индуктивность цепи 250 мГн, ток в дуге изменяется по линейному закону, а время гашения дуги 0,3 с. Напряжение сети 220 В.

4.14. Определить коэффициент перенапряжения при отключении дуги постоянного тока. Напряжение источника питания 220 В, индуктивность цепи 0,05 Гн, скорость изменения тока в

момент его исчезновения  $2 \cdot 10^4$  А/с.

4.15. Определить коэффициент перенапряжения при отключении дуги постоянного тока. Напряжение источника питания 110 В, индуктивность цепи 0,06 Гн, скорость изменения тока в момент его исчезновения  $3 \cdot 10^4$  А/с.

4.16. Рассчитать среднюю скорость восстановления напряжения на дуговом промежутке выключателя при ЭДС генератора, равной 380 В промышленной частоты, индуктивности цепи 0,02 Гн, эквивалентной емкости  $1,5 \cdot 10^{-8}$  Ф, активном сопротивлении цепи 150 Ом и определить восстанавливающееся напряжение через половину периода собственных колебаний контура.

4.17. Рассчитать среднюю скорость восстановления напряжения на дуговом промежутке выключателя при ЭДС генератора, равной 220 В промышленной частоты, индуктивности цепи 0,01 Гн, эквивалентной емкости  $2 \cdot 10^{-8}$  Ф, активном сопротивлении цепи 100 Ом и определить восстанавливающееся напряжение через половину периода собственных колебаний контура.

4.18. Объясните влияние шунта на отключение цепи переменного тока. Определите критическое активное сопротивление шунта, достаточное для перевода колебательного процесса восстановления напряжения в аperiodический, и наибольшую скорость восстановления напряжения. Исходные данные: ЭДС источника питания промышленной частоты в момент нуля тока 110 В, индуктивность цепи 0,011 Гн, эквивалентная емкость  $1,9 \cdot 10^{-8}$  Ф.

## 5. Обмотки электромагнитов

5.0. Рассчитать обмотку напряжения электромагнита постоянного тока, необходимую для создания намагничивающей силы 300 А при напряжении 220 В. Средняя длина витка равна 22 см, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Площадь окна катушки  $50 \text{ см}^2$ , а диаметр сердечника магнитопровода равен 2 см. Проверить обмотку на нагрев.

5.1. Определить число витков и диаметр провода обмотки

напряжения переменного тока промышленной частоты по следующим данным: напряжение сети равно 220 В, поток  $\Phi_M = 2,5 \cdot 10^{-4}$  Вб, амплитуда МДС равна 300 А, сечение магнитопровода  $1 \times 1$  см<sup>2</sup>, средняя длина витка 10 см, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

5.2. Рассчитать обмотку напряжения электромагнита постоянного тока, необходимую для создания намагничивающей силы 300 А при напряжении 220 В. Наружный диаметр обмотки 90 мм, внутренний диаметр 50 мм, высота обмотки 120 мм, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Проверить обмотку на нагрев.

5.3. Рассчитать обмотку напряжения электромагнита постоянного тока, необходимую для создания намагничивающей силы 250 А при напряжении 220 В. Средняя длина витка равна 20 см, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, площадь окна катушки 40 см<sup>2</sup>, а диаметр магнитопровода равен 2 см. Проверить обмотку на нагрев.

5.4. Рассчитать токовую обмотку электромагнита постоянного тока, необходимую для создания намагничивающей силы 150 А при токе 10 А. Средняя длина витка равна 17,5 мм, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, площадь окна катушки 90 мм<sup>2</sup>, а диаметр сердечника магнитопровода равен 1 см. Проверить обмотку на нагрев.

5.5. Определить число витков и диаметр провода обмотки напряжения переменного тока промышленной частоты по следующим данным: напряжение сети равно 127 В, поток  $\Phi_M = 3 \cdot 10^{-4}$  Вб, амплитуда МДС  $I_M W = 200$  А, площадь окна катушки 500 мм<sup>2</sup>, сечение магнитопровода  $1 \times 1$  см<sup>2</sup>, высота катушки 2 см, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

5.6. Рассчитать обмотку напряжения электромагнита постоянного тока, необходимую для создания намагничивающей силы 500 А при напряжении 220 В. Средняя длина витка равна 20 см, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Площадь окна катушки 60 см<sup>2</sup>, а диаметр сердечника магнитопро-

вода равен 2 см. Проверить обмотку на нагрев.

5.7. Определить число витков и диаметр провода обмотки напряжения переменного тока промышленной частоты по следующим данным: напряжение сети равно 127, поток  $\Phi_m = 1,5 \cdot 10^{-4}$  Вб, амплитуда МДС равна 400 А, сечение магнитопровода  $1 \times 1$  см<sup>2</sup>, средняя длина витка 12 см, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м.

5.8. Рассчитать обмотку напряжения электромагнита постоянного тока, необходимую для создания намагничивающей силы 200 А при напряжении 220 В. Наружный диаметр обмотки 80 мм, внутренний диаметр 30 мм, высота обмотки 100 мм, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Проверить обмотку на нагрев.

5.9. Рассчитать обмотку напряжения электромагнита постоянного тока, необходимую для создания намагничивающей силы 350 А при напряжении 220 В. Средняя длина витка равна 15 см, удельное сопротивление меди  $1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, площадь окна катушки 50 см<sup>2</sup>, а диаметр магнитопровода равен 2 см. Проверить обмотку на нагрев.

## 6. Электрические аппараты распределительных устройств

6.0. Выбрать плавкую вставку предохранителя для защиты асинхронного двигателя мощностью 5,5 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,88$ ;  $\eta = 0,87$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,0$ . Условия пуска легкие.

6.1. Выбрать плавкую вставку предохранителя для защиты асинхронного двигателя мощностью 7,5 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,88$ ;  $\eta = 0,86$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,5$ . Условия пуска тяжелые.

6.2. Выбрать автоматический выключатель ВА 51Г, тепловой и электромагнитный расцепители для защиты электродвигателя мощностью 5,5 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,88$ ;  $\eta = 0,87$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,0$ .

6.3. Выбрать автоматический выключатель ВА 51Г, тепло-

вой и электромагнитный расцепители для защиты электродвигателя мощностью 7,5 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,88$ ;  $\eta = 0,87$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,5$ .

6.4. Выбрать плавкую вставку предохранителя для защиты асинхронного двигателя мощностью 3,0 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,83$ ;  $\eta = 0,82$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,0$ . Условия пуска легкие.

6.5. Выбрать плавкую вставку предохранителя для защиты асинхронного двигателя мощностью 11,0 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,87$ ;  $\eta = 0,88$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,5$ . Условия пуска тяжелые.

6.6. Выбрать автоматический выключатель В А 51Г, тепловой и электромагнитный расцепители для защиты электродвигателя мощностью 11,0 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,87$ ;  $\eta = 0,88$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,5$ .

6.7. Выбрать автоматический выключатель ВА 51Г, тепловой и электромагнитный расцепители для защиты электродвигателя мощностью 3,0 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,83$ ;  $\eta = 0,82$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,0$ .

6.8. Выбрать плавкую вставку предохранителя для защиты асинхронного двигателя мощностью 15,0 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,89$ ;  $\eta = 0,89$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,0$ . Условия пуска тяжелые.

6.9. Выбрать автоматический выключатель В А 51Г, тепловой и электромагнитный расцепители для защиты электродвигателя мощностью 15,0 кВт, напряжение сети 380 В,  $\cos \varphi = 0,89$ ;  $\eta = 0,89$ ;  $K_{\text{пуск}} = 7,0$ .

## 7. Магнитные усилители

7.0. ДМУ имеет следующие параметры: число витков рабочей обмотки  $W_p = 150$ ; число витков обмотки управления  $W_y = 1500$ ; ток в обмотке управления  $I_y = 0,01$  А. Определить среднее значение тока в нагрузке.

7.1. ДМУ имеет следующие параметры:  $W_p = 150$ ;  $W_y = 1500$ ;  $R_n = 1500$ ;  $R_y = 300$  Ом. Определить коэффициент усиления по мощности.

7.2. Простейший магнитный усилитель имеет следующие па-

параметры:  $W_p = 50$ ;  $R_H = 50$  Ом;  $W_y = 2000$ ;  $U_y = 3$  В при сопротивлении цепи управления 150 Ом. Определить среднее значение тока в нагрузке  $I_{н.ср}$  и коэффициент усиления по току  $K_I$ .

7.3. ДМУ имеет следующие параметры:  $W_p = 200$ ;  $W_y = 2000$ ;  $R_H = 50$  Ом;  $R_y = 100$  Ом; число витков обмотки обратной связи  $W_{о.с} = 180$ . Как повлияет положительная обратная связь по току на величину коэффициентов усиления по току и по мощности?

7.4. Определить число витков обмотки  $W_{о.с}$  дроссельного магнитного усилителя с положительной обратной связью по току для получения коэффициента усиления по току  $K_{I,о.с} = 50$ . Параметры магнитного усилителя:  $W_p = 100$ ;  $W_y = 1500$ .

7.5. Постоянная времени ДМУ с обмоткой управления  $W_y = 3000$  и сопротивлением  $R_y = 450$  Ом равна 0,25 с. Как изменится постоянная времени с добавлением в усилитель второй обмотки управления с числом витков  $W_y = 1000$  и  $R_y = 100$  Ом?

7.6. Сколько витков необходимо иметь в обмотке внешней обратной связи  $W_{о.с}$ , чтобы получить коэффициент усиления по току  $K_{I,о.с} = 50$ , если без обратной связи усилитель имеет  $K_I = 10$ , а число витков рабочей обмотки  $W_p = 50$ .

7.7. Обмотка внешней обратной связи  $W_{о.с}$  содержит 60 витков, и коэффициент усиления по току  $K_{I,о.с} = 60$ . Сколько витков содержит рабочая обмотка МУ, если без обратной связи усилитель имеет  $K_I = 20$ ?

7.8. Определить число витков обмотки  $W_{о.с}$  магнитного усилителя с положительной обратной связью по току для получения коэффициента усиления по мощности  $K_{P,о.с} = 2000$ ; параметры ДМУ:  $W_p = 200$ ;  $W_y = 2500$ ;  $R_H = 40$  Ом;  $R_y = 100$  Ом.

7.9. Определите, во сколько раз повысится коэффициент усиления по току ДМУ, если использовать положительную обратную связь; при этом число витков обмотки обратной связи  $W_{о.с}$  в четыре раза меньше числа витков рабочей обмотки  $W_p$ , последнее в десять раз меньше числа витков обмотки управления  $W_y$ . Как изменится характеристика «вход-выход»? (Построить в масштабе.)

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

### Физические постоянные материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельное сопротивление при 0 °С×10 <sup>-8</sup> , Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления ×10 <sup>-3</sup> , 1/градус	Теплопроводность при 0 °С, Вт/(м·градус)	Теплоемкость, Дж/(кг градус)	Температурный коэффициент теплоемкости ×10 <sup>-4</sup> , 1/градус	Температура плавления, °С
Алюминий	2700	2,62	4,2	210	950	4,7	660
Медь	8700	1,62	4,3	390	390	1,0	1083
Олово	7300	11,0	4,5	64	230	1,3	232
Свинец	11300	19,5	4,1	35	130	0,9	327,4
Серебро	10500	1,5	4,0	420	234	0,77	960
Сталь	7800	11,0	9,0	40	470	7,3	1350

Таблица П2

### Технические данные автоматических трехполюсных выключателей серий ВА 51 и ВА 52 с комбинированным расцепителем

Тип выключателя	Номинальный ток, А		Кратность тока отсечки по отношению к I <sub>нр</sub>
	выключателя	расцепителя, I <sub>нр</sub>	
1	2	3	4
ВА51Г-25	25	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,8; 1; 1,25; 1,6; 2; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25	14
ВА 51-25	25	6,3; 8; 10,0; 12,5; 16; 20; 25	7; 10

ВА 51-31	100	6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	3; 7; 10
----------	-----	--	----------

Окончание табл. П2

1	2	3	4
ВА51Г-31	100	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	14
ВА 52-31	100	16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	3; 7; 10
ВА 51-33 ВА 52-33	160	80; 100; 125; 160	10
ВА51Г-33 А52Г-33	160	80; 100; 125; 160	14

Таблица ПЗ

### Технические данные предохранителей

Тип	Номинальное напряжение, В	Номинальный ток, А	
		предохранителя	плавкой вставки
НПН2-63	500	63	6, 10, 16, 20, 25, 31, 40, 63
ПН2-100	380	100	31,5, 40, 50, 63, 80, 100
ПН2-250	380	250	80, 100, 125, 160, 200, 250
ПН2-400	380	400	200, 250, 315, 355, 400
ПН2-600	380	630	315, 400, 500, 630



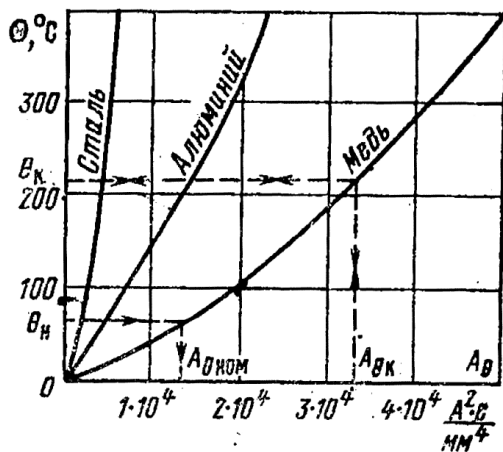


Рис. П1. Кривые адиабатического нагрева проводниковых материалов

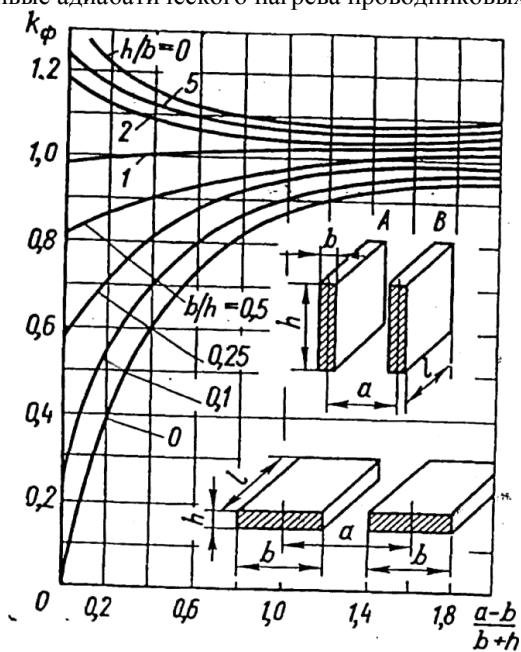


Рис. П2. Значения коэффициента формы для параллельных шин

Таблица П4

Коэффициент заполнения по меди для медного провода  
с эмалевой изоляцией ПЭВ-1

$d$ , мм	$f_M$	$d$ , мм	$f_M$	$d$ , мм	$f_M$	$d$ , мм	$f_M$
0,06	0,319	0,18	0,578	0,41	0,634	0,74	0,670
0,07	0,376	0,20	0,581	0,44	0,637	0,80	0,676
0,08	0,408	0,23	0,584	0,47	0,641	0,86	0,682
0,09	0,436	0,25	0,594	0,49	0,643	0,93	0,689
0,10	0,501	0,27	0,597	0,51	0,646	1,00	0,696
0,11	0,520	0,29	0,607	0,53	0,648	1,08	0,704
0,12	0,538	0,31	0,616	0,55	0,650	1,16	0,712
0,14	0,545	0,33	0,625	0,59	0,654	1,25	0,721
0,15	0,565	0,35	0,627	0,64	0,660		
0,16	0,571	0,38	0,63	0,69	0,665		

Учебное издание

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Рабочая программа, методические указания  
и контрольное задание для студентов заочной формы обучения  
специальностей 1-43 01 03 «Электроснабжение»  
и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

Составители:

ПРОКОПЕНКО Людмила Васильевна  
САЦУКЕВИЧ Валерий Николаевич

Редактор Л.Н. Шалаева

Компьютерная верстка Н.А. Школьниковой

---

Подписано в печать 08.12.2009.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2,38. Уч.-изд. л. 1,86. Тираж 100. Заказ 1204.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.