



**Уральский  
федеральный  
университет**

имени первого Президента  
России Б.Н.Ельцина

**Уральский  
энергетический  
институт**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Учебно-методическое пособие





Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

# **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Учебно-методическое пособие

Рекомендовано методическим советом  
Уральского федерального университета  
для студентов вуза, обучающихся  
по направлению подготовки  
13.04.02 — Электроэнергетика и электротехника

Екатеринбург  
Издательство Уральского университета  
2020

УДК 621.316.5(075.8)

ББК 31.24-01я73

И88

Авторы:

В. И. Лузгин, И. Е. Лопатин, В. В. Рудный, С. Р. Яковенко

Рецензенты:

кафедра энергетики Уральского государственного лесотехнического университета (завкафедрой д-р техн. наук, проф. *С. М. Шанчуров*); канд. техн. наук, директор научно-технического центра НПП ООО «РЭЛ-ТЕК» *С. М. Фаткуллин*

Научный редактор — д-р техн. наук, доц. *И. В. Черных*

На обложке использовано изображение с сайта <https://goo-gl.ru/6xOH>.

**Исследование высоковольтных электрических аппаратов** : учеб.-метод. И88 пособие / В. И. Лузгин, И. Е. Лопатин, В. В. Рудный, С. Р. Яковенко ; Мин-во науки и высшего образования РФ. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. — 92 с.

ISBN 978-5-7996-3094-2

В пособии кратко изложены теоретические основы электрофизических процессов в исследуемых электрических аппаратах. Даны описания лабораторных установок. Поставлены задачи экспериментальных исследований. Сформулированы требования к оформлению результатов исследований и отчетов.

Учебно-методическое пособие рекомендуется студентам всех форм обучения по направлению подготовки 13.04.02 — Электроэнергетика и электротехника, изучающих дисциплину «Современные высоковольтные электрические аппараты в электроэнергетике».

Библиогр.: 7 назв. Рис. 43.

УДК 621.316.5(075.8)

ББК 31.24-01я73

ISBN 978-5-7996-3094-2

© Уральский федеральный университет, 2020

# Оглавление

---

---

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	6
<b>Глава 1.</b>	
<b>ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ .....</b>	<b>8</b>
1.1. Тепловые процессы в электрических аппаратах .....	9
1.2. Электродинамические усилия в электрических аппаратах .....	17
1.3. Контактные системы электрических аппаратов .....	21
1.4. Дуга отключения в электрических аппаратах .....	23
Контрольные вопросы .....	26
<b>Глава 2.</b>	
<b>ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ.....</b>	<b>28</b>
2.1. Вакуумные выключатели .....	29
2.2. Элегазовые выключатели .....	36
2.3. Измерительные трансформаторы тока.....	47
2.4. Комплектные распределительные устройства .....	56
2.5. Механизмы высоковольтных выключателей .....	63
Контрольные вопросы .....	66
<b>Глава 3.</b>	
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ .....</b>	<b>68</b>
3.1. Исследование характеристик теплового нагрева токоведущей системы высоковольтного коммутационного аппарата .....	68
Контрольные вопросы .....	71
3.2. Исследование характеристик механизмов коммутационных аппаратов.....	72
Контрольные вопросы .....	76
3.3. Исследование характеристик генераторного элегазового высоковольтного аппарата .....	77
Контрольные вопросы .....	80
3.4. Исследование характеристик теплового нагрева токоведущих систем силовых комплектных распределительных устройств .....	80
Контрольные вопросы .....	85
3.5. Исследование характеристик высоковольтного трансформатора тока .....	85
Контрольные вопросы .....	89
<b>БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....</b>	<b>90</b>

# ПРЕДИСЛОВИЕ

---

---

**Д**анное учебно-методическое пособие предназначено для студентов-магистрантов, изучающих дисциплину «Современные высоковольтные электрические аппараты в электроэнергетике». В пособии приведены сведения об основах теории электрических аппаратов, их конструкциях, а также о способах и методиках исследования основных характеристик электрических аппаратов и измерения их параметров. Теория и описание устройства аппаратов даны в довольно сжатом виде, поэтому для полного освоения этих знаний необходимо прослушать курс лекций по соответствующей дисциплине. Для самостоятельной же проработки теоретических вопросов и самоподготовки в конце книги приведен список основной литературы.

Пособие структурно разделено на три главы. Первая глава содержит описание основных физических процессов и явлений, которые положены в основу принципов действия электрических аппаратов. В конце главы есть список контрольных вопросов для проверки усвоенных знаний.

Вторая глава содержит описания устройств и принципов действия современного коммутационного высоковольтного оборудования, трансформаторов тока, комплектных распределительных устройств и общие сведения об устройстве приводных механизмов высоковольтных аппаратов. В главе также есть список контрольных вопросов для проверки усвоенных знаний и закрепления изученного материала.

Третья глава содержит практические алгоритмы и методики исследования параметров и характеристик электрических аппаратов и является основой для лабораторного практикума студентов по дисциплине «Современные высоковольтные электрические аппараты в электроэнергетике» кафедры «Техника высоких напряжений» Уральского энергетического института в составе УрФУ. В отличие от первых двух глав, которые содержат общие знания, полезные для всех изучающих

высоковольтные электрические аппараты, третья глава описывает конкретную реализацию методик для исследования электрических аппаратов. Описания алгоритмов, методик, используемых инструментов и приборов, исследуемого оборудования даются с учетом текущего технического оснащения кафедры «Техника высоких напряжений». Лабораторные стенды, реализующие описанные алгоритмы исследований, расположены в помещениях кафедры. В главе также приведены контрольные вопросы, проработка которых поможет выполнить лабораторные исследования и защитить по ним результирующие отчеты в рамках освоения соответствующей дисциплины.

## ВВЕДЕНИЕ

---

---

**Р**азвитие современной российской энергетики невозможно без широкого использования эффективных высоковольтных электрических аппаратов. Перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения связаны с поиском новых высокоэффективных технических решений и замены находящихся в эксплуатации устаревших, экономически невыгодных электрических аппаратов. Современные требования к электрическим аппаратам таковы: повышение надежности, снижение массогабаритных показателей, экологическая чистота, экономичность. Решение этих задач достигается созданием электрических аппаратов с управляемой коммутацией, поиском альтернативных способов коммутации и новых электрических сред для изоляции и дугогашения, разработкой комбинированных электрических аппаратов, совмещающих функции различных видов аппаратов. Разработка, производство и широкое внедрение элегазовых и вакуумных аппаратов позволяет значительно повысить надежность и экономичность их эксплуатации в энергосистемах.

Элегазовые автокомпрессионные дугогасительные устройства с автотенерацией давления элегаза энергией дуги позволяют значительно повысить отключающую способность выключателя и увеличить напряжение на один разрыв до 360–550 кВ. При этом конструкция элегазового выключателя значительно упрощается и становится возможным применение экономичных пружинных приводов.

Использование одноразрывных элегазовых выключателей в комплектных распределительных устройствах дает существенное снижение габаритных размеров и материалоемкости, что позволяет создать КРУЭ нового поколения с уменьшенными размерами и размещением трех фаз в одном корпусе.

Прогресс в технологии изготовления вакуумных дугогасительных камер позволяет увеличить токи отключения до 40 кА и напряжения

до 145 кВ и создавать на их основе вакуумные выключатели высших классов напряжения.

Ужесточение экологических требований вызывает необходимость создания комплектных распределительных устройств с вакуумными выключателями на напряжение свыше 35 кВ взамен элегазовых. Доля вакуумных выключателей и КРУ на их основе будет расти опережающими темпами в классах напряжения до 220 кВ.

Перспективным направлением развития коммутационной аппаратуры является разработка комбинированных аппаратов, применение которых позволяет отказаться от использования традиционных разъединителей. К таким аппаратам относятся выключатели-разъединители. Контакты такого выключателя расположены внутри заполненного элегазом дугогасительного устройства и в отключенном положении выполняют функцию разъединителя. Безопасность работы персонала такой аппарат обеспечивает надежной системой блокировки в сочетании с встроенным выключателем и четкой фиксацией положения контактов.

Современная электроэнергетика в условиях либерализации рынка требует повышения точности расчетов потребляемой энергии, что вызывает необходимость разработки серии новых высоковольтных измерительных трансформаторов тока и напряжения с элегазовой изоляцией. Создание таких трансформаторов позволит повысить точность в широком диапазоне измерений и обеспечит высокую надежность их работы при минимальных затратах на обслуживание.

Создание высоковольтного оборудования нового поколения невозможно без проведения глубокой исследовательской работы при проектировании. Исследовать необходимо основные процессы и явления, сопровождающие работу высоковольтных аппаратов, а также эксплуатационную надежность создаваемых конструкций.

## Глава 1.

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

---

---

**К**аждый электрический аппарат в своей конструкции содержит определенный набор систем и элементов. Наиболее распространенные из них перечислены ниже.

*Тоководущая система* (ТВС) предназначена для проведения тока через электрический аппарат и конструктивно может содержать в себе участки и элементы из разных материалов разной геометрической формы, сечения и конструктивного исполнения. Поскольку все эти участки ТВС необходимо стыковать между собой, то особое внимание требуется уделять зонам контактных переходов между ними.

*Электрические контакты* входят в состав ТВС, но, помимо функции пропускания тока через себя, могут обеспечивать и функцию коммутации (если это коммутирующие контакты). Из-за особенностей физических процессов, протекающих в них при прохождении тока, контакты по сравнению с ТВС требуют отдельного подхода.

*Дугогасительная система* (ДС) предназначена для ускорения погасания дуги и уменьшения межконтактного промежутка. Это влияет на общие габариты электрического коммутационного аппарата.

*Изоляционные конструкции* служат для изолирования различных участков ТВС и других проводниковых элементов аппарата, находящихся под напряжением, друг от друга и от земли.

*Привод* предназначен для управления процессом коммутации контактов в коммутационных электрических аппаратах.

*Вторичные цепи* предназначены для управления аппаратом и мониторинга его состояния. Через эти же цепи аппарат связан с внешними системами измерения, контроля, диспетчеризации и т. п.

## 1.1. Тепловые процессы в электрических аппаратах

Общий для всех аппаратов признак — наличие токоведущих элементов, которые в зависимости от величины их сопротивления и тока нагреваются до определенных температур, обусловленных режимами работы аппаратов и условиями их охлаждения.

### 1.1.1. Нагрев элементов электрических аппаратов

Максимальные температуры нагрева ТВС в аппарате определяют допустимую величину номинального тока аппарата. Это, в свою очередь, ставит перед задачей теплового расчета следующие цели:

- 1) достижение минимальных потерь энергии в аппарате при минимальных затратах проводникового материала;
- 2) создание наиболее благоприятных и эффективных условий для естественного теплоотвода.

Использование средств и конструктивных решений для искусственного и принудительного охлаждения следует применять при отсутствии других способов для необходимого естественного теплоотвода. Искусственный теплоотвод следует считать мерой, понижающей эффективность и надежность аппарата в целом.

При выделении внутри аппарата теплоты и рассеивании ее в окружающем пространстве возможны несколько видов нагрева. Наиболее важные виды нагрева для аппаратов следующие:

1. Нестационарный нагрев. Выделяющаяся энергия расходуется на нагрев собственно аппарата и на теплообмен с окружающей средой. В общем виде этот нагрев может быть описан уравнением

$$W_{\text{тп}} = \Delta W_{\text{вн}} + W_{\text{то}},$$

где  $W_{\text{тп}}$  — энергия тепловых потерь,  $\Delta W_{\text{вн}}$  — изменение внутренней энергии,  $W_{\text{то}}$  — энергия теплоотдачи в окружающую среду.

2. Стационарный нагрев. Выделяющаяся энергия полностью расходуется на теплообмен с окружающей средой. Изменение внутренней энергии аппарата отсутствует.

$$W_{\text{тп}} = W_{\text{то}}, \Delta W_{\text{вн}} = 0.$$

3. Адиабатный нагрев. Выделяющаяся тепловая энергия полностью расходуется на нагрев аппарата, теплообмен с окружающей средой отсутствует. Такой вид нагрева характерен для режима тока короткого замыкания.

$$W_{\text{тп}} = \Delta W_{\text{вн}}, W_{\text{то}} = 0.$$

О нагреве резонно рассуждать в терминах температуры, а не энергии. В теории об электрических аппаратах температуру в градусах Цельсия обозначают греческой буквой «тета» —  $\vartheta$ . Тогда температура окружающей среды —  $\vartheta_0$  (или  $\vartheta_{\text{ос}}$ ). По ГОСТ эта температура принимается равной 40 °С.

Иногда удобнее говорить о превышении температуры над температурой окружающей среды, такое превышение называют перегревом и в теории аппаратов обозначают буквой «тау» —  $\tau$ . Тогда

$$\tau = \vartheta - \vartheta_0.$$

К основным ограничительным факторам, которые влияют на величину допустимой температуры нагрева, можно отнести следующие:

1. Нагревостойкость изоляционных материалов. Токоведущие и нетоковедущие элементы аппарата, которые подвергаются нагреву и соприкасаются с изоляцией, не должны приводить к превышению температуры выше допустимой по классу нагревостойкости для данного изоляционного материала.

2. Механические свойства проводниковых и прочих конструкционных материалов, зависящие от температуры. Например, при медленном нагреве (в течение 2 часов) проволок из твердотянутой меди и алюминия их предел прочности на растяжение падает в несколько раз в диапазоне от 150 до 300 °С.

3. Окисление контактов. Для большинства контактных материалов повышенная температура нагрева приводит к быстрому образованию оксидной пленки, которая обладает сниженной проводимостью, что приводит к повышению сопротивления контактов. Это, в свою очередь, вызывает еще больший их нагрев, происходит прогрессирующее повышение температуры контактных деталей.

4. Температура вспышки паров трансформаторного масла в среднем составляет 135 °С.

5. Правила техники безопасности. У персонала, работающего с электрическим оборудованием, при случайном и кратковременном прикосновении к открытым нагретым частям не должно быть ожогов.

С учетом того, что элементы ТВС, корпуса, контактов и изоляции аппаратов изготавливаются из разных материалов, и того, что эти элементы работают в разных средах и режимах нагрева, допустимый диапазон рабочих температур для большинства материалов, элементов и условий составляет  $90 \div 120$  °С.

### 1.1.2. Основные источники тепла в электрических аппаратах

**Джоулево тепло.** Выделение тепла в проводниках при прохождении по ним тока описывается известным законом Джоуля — Ленца:

$$W_{\text{тп}} = \int_0^t I^2 R_{\text{э}} dt,$$

где  $I$  — ток в цепи, А;  $R_{\text{э}} = f(t)$  — сопротивление цепи в функции времени, Ом;  $t$  — длительность протекания тока, с.

Формулу можно применять как при постоянном, так и при переменном токах, если под током в цепи подразумевать действующее значение тока.

В случае однородного проводника при его постоянной температуре и неизменной величине тока (амплитуды тока) в нем формула потерь получает вид

$$W_{\text{тп}} = I^2 R_{\text{э}} t,$$

на постоянном токе:

$$R_{\text{э}} = \rho_{\text{э}} \frac{\ell}{S_{\text{с}}},$$

где  $\rho_{\text{э}}$  — удельное электрическое сопротивление проводника, Ом·м;  $\ell$  — длина проводника, м;  $S_{\text{с}}$  — площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>;

на переменном токе:

$$R_{\text{э,перем}} = R_{\text{э}} \cdot k_{\text{дп}},$$

где  $k_{\text{дп}} = k_{\text{пэ}} \cdot k_{\text{эб}}$  — коэффициент добавочных потерь, определяемый произведением коэффициентов поверхностного эффекта  $k_{\text{пэ}}$  и эффекта близости  $k_{\text{эб}}$ .

**Зависимость удельного электрического сопротивления от температуры.** Наиболее общая запись этой зависимости имеет вид

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{\vartheta 0} (1 \pm \alpha_T \vartheta \pm \nabla \beta_T' \vartheta^2 \pm \dots),$$

где  $\alpha_T$  и  $\beta_T'$  — температурные коэффициенты сопротивления,  $K^{-1}$ . Они положительны для металлов и отрицательны для угля и электролитов. При температурах нагрева до  $300^\circ C$  достаточно ограничиться первыми двумя членами ряда.

**Поверхностный эффект.** Поверхностным эффектом называют явление неравномерного распределения плотности тока по сечению проводника, причем плотность тока максимальна на поверхности проводника и убывает по мере удаления от поверхности вглубь проводника. Можно сказать, что происходит вытеснение тока во внешние слои проводника.

Если заменить неравномерную плотность тока равномерной, которая равна ее максимальной величине на поверхности, то получится эквивалентная глубина проникновения тока в проводник из немагнитного материала:

$$\Delta_{\vartheta} = \sqrt{\frac{\rho_{\vartheta}}{\pi f \mu_0}},$$

где  $f$  — частота переменного тока, Гц;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  — магнитная постоянная, Гн/м.

Поверхностный эффект учитывается коэффициентом поверхностного эффекта, который больше или равен единице. На практике для определения  $k_{\text{по}}$  чаще всего пользуются графиками и номограммами.

Поверхностный эффект приводит к уменьшению эквивалентного сечения проводника, а значит, к увеличению сопротивления и избыточному нагреву. Например, для меди при комнатной температуре и промышленной частоте  $\Delta_{\vartheta} \approx 10$  мм. Учитывая то, что ток проникает в проводник по всему периметру, на промышленной частоте невыгодно применение медных проводников толщиной более  $(2 \div 3)\Delta_{\vartheta} = 20 \div 30$  мм.

Поверхностный эффект в ферромагнитных проводниках. В ферромагнитных проводниках магнитная проницаемость зависит от напряженности магнитного поля  $H$ , что оказывает влияние на поверхностный эффект. Электромагнитная волна в таком случае проникает внутрь проводников на очень небольшую глубину, что существен-

но сокращает эффективную площадь поперечного сечения и приводит к росту сопротивления и тепловыделения.

**Эффект близости.** Эффектом близости называется явление неравномерного распределения переменного тока по поперечному сечению проводника, обусловленное влиянием магнитного поля тока, проходящего по расположенному рядом другому проводнику.

$$k_{эб} = \frac{R_{э.перем.б}}{R_{э.перем.уд}}$$

где  $R_{э.перем.б}$  — электрическое сопротивление проводника переменному току с учетом влияния близлежащих проводников с током,  $R_{э.перем.уд}$  — электрическое сопротивление уединенно расположенного проводника переменному току.

Коэффициент  $k_{эб}$  зависит от частоты переменного тока, удельного электрического сопротивления материала проводника, расстояния между проводами, формы и размеров их поперечного сечения, а также от направления и фазы токов в них.

**Нагрев диэлектриков под действием переменного напряжения.** Потери мощности в диэлектриках определяются следующим выражением:

$$P_{тп} = \omega C U^2 \operatorname{tg}(\delta),$$

где  $C$  — емкость изолятора, Ф;  $U$  — напряжение на изоляторе, В;  $\delta$  — угол диэлектрических потерь материала изолятора.

**Другие источники тепла.** К другим источникам тепловыделения можно отнести:

1. Потери энергии в электрической дуге в коммутационных аппаратах. Температура дуги может достигать 20 000 °С, что сопровождается нагревом всех проводниковых и конструкционных деталей, находящихся вблизи дуги.

2. Механические потери энергии на трение в демпфирующих и тормозных системах.

### 1.1.3. Охлаждение элементов электрических аппаратов

Джоулево тепло от проводников с током с учетом добавочных потерь является основным источником теплоты в аппаратах. Чем эффективнее условия теплоотвода в окружающую среду, чем рав-

номернее распределение температуры по ТВС, тем совершеннее аппарат.

Существует три основных вида переноса тепловой энергии: теплопроводность, конвекция и излучение.

**Теплопроводность.** Теплопроводностью называется процесс распространения тепловой энергии путем взаимодействия элементарных частиц тела. Теплопроводность определяется движением частиц тела и зависит от агрегатного состояния вещества.

Аналитическое выражение, описывающее этот процесс, называется законом Фурье для теплопроводности. По выражению видно, что плотность теплового потока пропорциональна градиенту температуры:

$$q = -\lambda \cdot \text{grad}(\vartheta),$$

где  $q = Q/(S_{\text{п}}t)$  — плотность теплового потока, равная количеству теплоты  $Q$ , проходящей через единицу поверхности  $S_{\text{п}}$  за единицу времени  $t$ , Дж/(м<sup>2</sup>·с);  $\lambda$  — теплопроводность материала, определяет количество теплоты, которое проходит через единицу поверхности за единицу времени при падении температуры на один градус на единицу длины теплового потока, Вт/(м·К).

**Конвекция.** Конвекцией называется совместный процесс передачи теплоты теплопроводностью, на который накладывается процесс перемешивания среды, поэтому конвекция возможна только в жидких и газообразных средах.

Решение задач конвективного теплообмена в основном сводится к составлению дифференциальных уравнений и определению граничных условий. Решение полученных уравнений возможно только в частных случаях и при использовании упрощающих допущений. Как итог, полученные результаты плохо согласуются с опытными данными. Для решения задач такого типа часто применяется теория подобия.

Слово «подобие» в данном случае имеет геометрический смысл: определяющий размер тела принимают за масштаб, в котором выражают все остальные размеры тела. Подобными могут быть не только размеры тела, но и физические явления. Теория подобия позволяет строить модели, физические явления в которых подобны явлениям в реальном образце.

Теория подобия из физических параметров и определяющих размеров формирует безразмерные комплексы, которые называются критериями подобия.

Основные критерии, с помощью которых возможно описание конвективного теплообмена, — это критерии Нуссельта, Грасгофа, Рейнольдса, Прандтля, Фурье, Пекле.

**Излучение.** Излучением называется процесс переноса теплоты электромагнитными волнами, что позволяет ему протекать даже в вакууме, т. е. при полном отсутствии вещества.

Лучше всего тепловую энергию переносят волны инфракрасного излучения. Излучение реальных элементов аппаратов всегда меньше, чем излучение абсолютно черного тела. Величина уменьшения их излучательной способности по сравнению с абсолютно черным телом учитывается коэффициентом черноты поверхности  $\varepsilon_{\text{ч}}$ .

Основной закон теплового излучения известен как закон Стефана — Больцмана:

$$Q = \varepsilon_{\text{ч}} k_6 T^4,$$

где  $k_6 = 5,67 \cdot 10^{-8}$  — постоянная Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>);  $T$  — температура поверхности, К.

Не стоит пренебрегать теплоотдачей излучением, поскольку при диапазоне рабочих температур 100 ÷ 120 °С доля теплового потока от излучения может достигать до половины всего теплообмена с окружающей средой.

**Формула Ньютона.** Как правило, в аппаратах разные виды теплоотвода не существуют обособленно друг от друга, а действуют совместно. Общий теплообмен с окружающей средой от суммарного действия всех видов переноса теплоты описывается формулой Ньютона

$$W_{\text{тп}} = Q = k_{\text{т}} S_0 (\vartheta - \vartheta_0),$$

где  $k_{\text{т}}$  — коэффициент теплоотдачи или теплообмена, показывает количество теплоты, отданной с единицы поверхности в единицу времени при перепаде температур между поверхностью и окружающей средой в один градус, Вт/(м<sup>2</sup> · К);  $S_0$  — площадь поверхности охлаждения, м<sup>2</sup>;  $(\vartheta - \vartheta_0)$  — температурный напор с поверхности тела в окружающую среду, °С.

Сложность оперирования формулой Ньютона состоит в правильном определении коэффициента теплоотдачи. Существуют как эмпирические формулы расчета  $k_{\text{т}}$  для самых распространенных случаев, так и различные графики и номограммы. При естественном теплоот-

воде и при рабочих температурах аппаратов коэффициент теплоотдачи  $k_T$  лежит в диапазоне  $5 \div 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

#### 1.1.4. Выбор сечения токоведущих участков

Выше было показано, что внутри аппарата достаточно много источников тепловыделения, были перечислены причины для ограничения температуры токопровода на определенном уровне. Очень коротко были изложены также базовые механизмы отвода тепловой энергии в окружающую среду.

Отвод теплоты от проводника в окружающее пространство чаще всего происходит в радиальном направлении. На своем пути тепловой поток встречает слои из различных материалов, обладающих разными физическими характеристиками, агрегатными состояниями и размерами. Как правило, в процессе радиального теплоотвода известны граничные температуры: допустимая рабочая температура поверхности проводника  $\vartheta_{\text{доп}}$  (принимается по требованиям ГОСТ) и температура окружающей среды  $\vartheta_0$  или специальной теплоотводящей среды. Температурное распределение между этими точками в радиальном направлении неизвестно. Процесс поиска этого распределения носит итерационный характер. Для того чтобы найти минимальное сечение токопровода  $S_{\text{min}}$  с учетом всех требований, можно воспользоваться следующей формулой:

$$S_{\text{min}} = \frac{I_{\text{ном}}^2 \rho_0 (1 + \alpha \vartheta_{\text{доп}}) \cdot (R_{T\Sigma} k_T S_0 + 1)}{k_T S_0 (\vartheta_{\text{доп}} - \vartheta_0)},$$

где  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток, А;  $\rho_0$  — удельное электрическое сопротивление материала токопровода при  $0^\circ\text{C}$ , Ом·м;  $\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $R_{T\Sigma}$  — полное тепловое сопротивление от поверхности проводника до поверхности внешней оболочки аппарата,  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$ ;  $k_T$  — коэффициент теплоотдачи в окружающую среду с поверхности внешней оболочки аппарата,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $S_0$  — площадь поверхности охлаждения единичной длины внешней оболочки аппарата,  $\text{м}^2$ .

$$R_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n R_{Ti},$$

где  $R_{Ti}$  — тепловое сопротивление  $i$ -го слоя,  $n$  — число слоев, преодолеваемых тепловым потоком.

## 1.2. Электродинамические усилия в электрических аппаратах

Электродинамическими усилиями (ЭДУ) называются механические силы, возникающие при взаимодействии токов в проводниках или в контурах с магнитным полем.

Наибольшее значение эти силы приобретают при режимах короткого замыкания. Возникающие при этом ЭДУ стремятся деформировать токовый контур. Электродинамические силы могут достигать десятков, а иногда и сотен тысяч ньютонов в сильноточных аппаратах.

**Прямой метод определения ЭДУ.** Электродинамические силы можно определить с помощью формулы для силы Ампера  $dF = B \cdot i \cdot d\ell \cdot \sin \beta$ , где  $B$  — магнитная индукция, Тл;  $i$  — ток в проводнике, А;  $d\ell$  — длина элемента проводника с током, м;  $\beta$  — наименьший угол между элементом длины и магнитной индукцией.

Из формулы силы Ампера очевидно, что величина силы зависит от значения взаимодействующих токов ( $i$  и  $B$  — магнитное поле соседнего тока), магнитных свойств среды и геометрической конфигурации контура и взаимного расположения проводников ( $d\ell$  и  $\beta$ ).

Прямой метод дает значение равнодействующей силы и ничего не говорит о точке ее приложения и характере распределения по проводнику. Эту задачу можно решить, используя, например, графо-аналитический метод определения ЭДУ.

**Энергетический метод.** Для расчета ЭДУ в контурах сложной конфигурации целесообразно использовать принцип изменения магнитной энергии.

Совершаемая механическая работа по перемещению проводника осуществляется за счет изменения магнитной энергии  $dA_{\text{мех}} = dW_{\text{м}}$ , с другой стороны, известно, что эта работа равна  $dA_{\text{мех}} = Fdq$ , где  $q$  — обобщенная координата, в направлении которой происходит перемещение.

Таким образом,  $F = \frac{\partial W_{\text{м}}}{\partial q}$ .

Энергетический метод позволяет определять силу через производную изменения магнитной энергии по обобщенной координате.

### 1.2.1. Электродинамические силы на переменном токе

На переменном токе электродинамическая сила, порожденная взаимодействием токов, изменяется во времени. Для расчета аппаратов на стойкость к воздействию этой силы нужно знать ее максимальное значение. На рис. 1.1 изображены графики изменения тока, постоянной и переменной составляющих электромагнитных сил и полной электромагнитной силы на переменном токе.

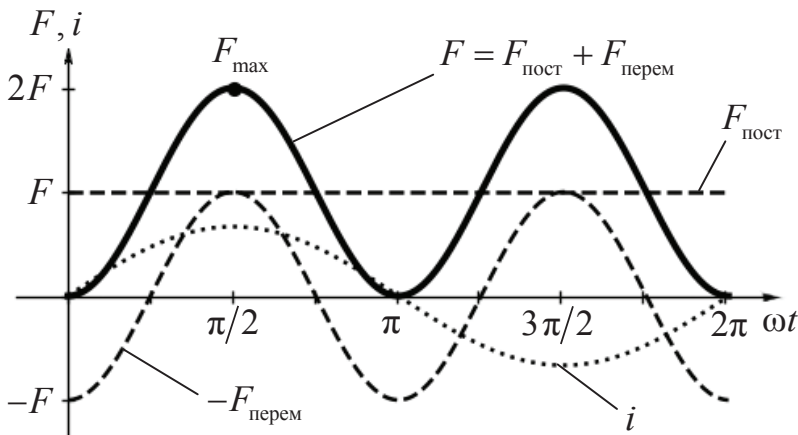


Рис. 1.1. ЭДУ на переменном токе

Особенности силы на переменном токе:

- 1) униполярность: сила изменятся по величине, но не по направлению;
- 2) двойная частота колебаний по сравнению с частотой колебаний питающей сети;
- 3) максимальное значение силы в два раза больше, чем при тех же условиях, но на постоянном токе.

При переменном трехфазном токе характер сил, взаимодействующих между собой фазовых токов, отличается от однофазного вариан-

та, приведенного на рисунке. Причем из всех фаз сила воздействия максимальна на среднюю фазу, но меньше, чем в однофазной цепи. Ее доля составляет 0,866 при том же токе.

### 1.2.2. ЭДУ при изменении сечения проводника

На всем своем протяжении токопровод может иметь разные линейные размеры при сохранении неизменности сечения, а иногда и разное сечение. Связано это с конструктивными особенностями того или иного аппарата, условиями теплоотвода, наличием контактных переходов и т. п.

При изменении сечения проводника возникают силы, направленные по оси проводника в сторону большего сечения или радиуса. Эти силы в общем случае называются силами сужения, а в контактных узлах — силами Двайта. В общем случае для проводника некруглого сечения формула для определения величины этой силы выглядит следующим образом:

$$F_{\text{суж}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot i^2 \cdot \ln \left( \sqrt{\frac{S_{c1}}{S_{c2}}} \right),$$

где  $S_{c1}$  и  $S_{c2}$  — большее и меньшее поперечные сечения токопровода.

Если на пути тока несколько таких перепадов сечений, то суммарная  $F_{\text{суж}}$  определяется отношением наибольшего и наименьшего из сечений.

Из-за магнитной постоянной даже при значительных номинальных токах силы сужения не имеют существенного значения. При режиме короткого замыкания, при значительном перепаде сечений  $F_{\text{суж}}$  приобретает заметную величину. Особенно сильно это явление проявляется в коммутирующих контактах при аварийных токах.

### 1.2.3. ЭДУ в аварийных режимах

Режим короткого замыкания, помимо значительного термического воздействия на токопровод, также подвергает токоведущую систему механическим перегрузкам. Причем максимальная величина механической силы зависит от ударного тока КЗ. На рис. 1.2 изображены

графики изменения силы и тока (его периодической и аperiodической составляющих) при режиме короткого замыкания, отмечены их максимальные значения.

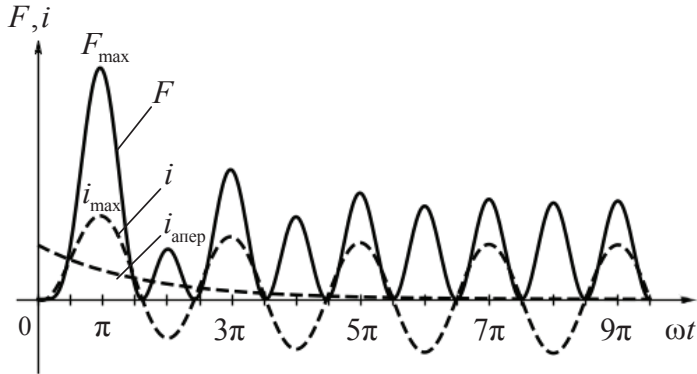


Рис. 1.2. ЭДУ в однофазной системе переменного тока при КЗ

При коротком замыкании ударный ток определяется соотношением

$$i_{\text{уд}} = i_{\text{max}} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{уд}} \cdot I_{\text{пн}} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot I_{\text{пн}} = 2,55 I_{\text{пн}},$$

где  $k_{\text{уд}} = 1,8$  — нормированное значение ударного коэффициента;  $I_{\text{пн}}$  — действующее значение периодической составляющей тока КЗ за первый период, А.

Максимальное значение силы пропорционально квадрату ударного тока, то есть  $F_{\text{max}} \approx i_{\text{уд}}^2 = (2,55 I_{\text{пн}})^2 = 6,48 I_{\text{пн}}^2$ .

#### 1.2.4. Электродинамическая стойкость аппаратов

При протекании тока по аппарату в его токовом контуре могут возникать электродинамические усилия. В режиме короткого замыкания эти усилия оказывают разрушительное механическое воздействие на аппарат, которое проявляется в деформации проводников, изоляторов и прочих конструкционных корпусных элементов. Поэтому необходимо оценивать стойкость аппарата к такого рода воздействиям.

Электродинамической стойкостью аппарата называется его способность противостоять силам, возникающим при протекании токов короткого замыкания.

Электродинамическую стойкость можно выражать непосредственно амплитудным значением тока динамической стойкости  $I_{\text{дс}}$ , коэффициентом кратности этого тока относительно амплитуды номинального тока  $k_{\text{дс}} = I_{\text{дс}} / (\sqrt{2} \cdot I_{\text{ном}})$ .

### 1.3. Контактные системы электрических аппаратов

Электрическим контактом можно назвать место соединения двух или более проводников, по которым предполагается протекание электрического тока.

По выполняемым функциям контакты можно разделить на три большие группы:

1. Коммутирующие (размыкаемые) контакты обеспечивают функцию коммутации тока в цепях.
2. Скользящие контакты обеспечивают непрерывность электрической цепи при взаимном перемещении контактных деталей.
3. Некоммутирующие (неразмыкаемые) контакты обеспечивают постоянную замкнутость электрической цепи, конструктивно состоящей из разных деталей и элементов. Неразъемность может создаваться болтовыми или винтовыми соединениями, пайкой, сваркой и другими способами.

Основной характеристикой контакта является переходное контактное сопротивление. Пусть известно сопротивление  $R_1$  участка цепи. Разделим этот участок на две части и после обработки поверхностей в зоне разделения соединим эти части, как показано на рис. 1.3. Сопротивление  $R_2$  получившейся конструкции окажется такой величины, что  $R_2 > R_1$ . Разность между этими сопротивлениями определяется процессами в зоне контактного перехода и численно равна переходному контактному сопротивлению. Наличие переходного контактного сопротивления объясняется следующими причинами:

1) загрязненностью и окислением соприкасающихся поверхностей контактов или сопротивлением пленок  $r_{\text{пл}}$ ;

2) стягиванием (сужением) линий тока к площадкам фактического контактирования или сопротивлением сужения  $r_{\text{суж}}$ . Контактные де-

тали соприкасаются не по всей площади поперечного сечения, а в отдельных точках, которые располагаются в разных местах и определяются микрогеометрией сдавливаемых граней контактных деталей.

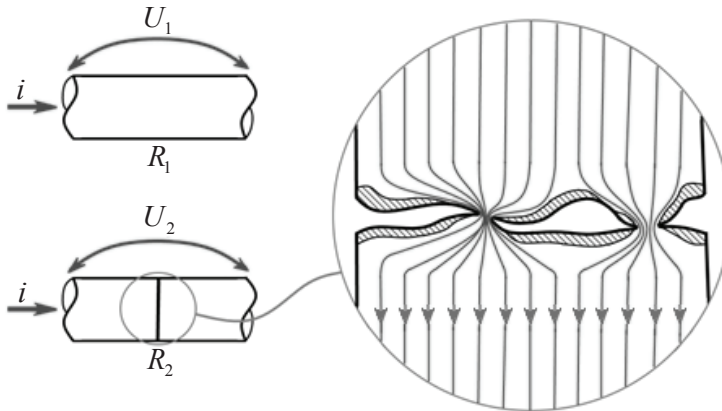


Рис. 1.3. Контакт и переходное контактное сопротивление

Таким образом, переходное контактное сопротивление можно записать формулой

$$r_{\text{к}} = r_{\text{пл}} + r_{\text{суж}}.$$

Сопротивление пленок на поверхности контакта может меняться в очень широких пределах. Сопротивление сужения зависит в основном от материала контактов, числа площадок и силы контактного нажатия. Для нормальной работы контакта его переходное сопротивление должно лежать в определенных пределах.

К основным факторам, влияющим на величину переходного контактного сопротивления, можно отнести: качество обработки поверхности, очистку поверхности от оксидов и нагара, контактное нажатие, материал контакта, температуру, химический состав окружающей среды.

Контакты являются частью токоведущей системы, но из-за особенностей физических процессов в них требуют отдельной проверки по токам в номинальных и аварийных режимах.

К основным параметрам контактного узла можно отнести следующие:

1. Номинальный ток контакта —  $I_{\text{н}}$ . Контакты должны быть спроектированы таким образом, чтобы номинальный ток не перегревал их выше допустимых величин.

2. Номинальное напряжение контакта —  $U_n$ . Расстояние между контактами в разомкнутом состоянии называется *раствором*. Величина раствора в коммутирующих контактах, помимо электрической прочности, определяется и процессом гашения электрической дуги.

3. Ток термической стойкости —  $I_{тс}$ . В контактах аппарата ток термической стойкости не должен приводить к расплавлению контактных зон и явлению сваривания контактов.

4. Ток динамической стойкости —  $I_{дс}$ . Поэтому ток динамической стойкости в контактах — это максимальный ток, который не должен снижать параметры контактной системы аппарата.

5. Время надежной работы —  $N_{комм}$ , задается количеством коммутаций номинальных и аварийных токов. Контакты должны быть спроектированы таким образом, чтобы сохранять свои параметры на заданном уровне в течение всего срока службы.

Зная условия работы контактного узла, можно сформировать требования к контактному материалу. Эти требования почти всегда противоречивы. Например, коммутирующий контакт одновременно должен выдерживать термическое воздействие электрической дуги, т. е. быть тугоплавким, и обладать низким переходным сопротивлением. В природе не существует такого материала из чистых металлов. В связи с этим нередко в качестве контактных материалов используют металлокерамику (композиты).

## 1.4. Дуга отключения в электрических аппаратах

В процессе отключения электрической цепи с током коммутирующий элемент аппарата превращается из проводника электрического тока в диэлектрик. Практически любая электрическая цепь обладает индуктивностью  $L$ , сопротивлением  $R$  и емкостью  $C$  (например, емкость проводников относительно земли), при токе  $I_0$  и напряжении источника  $U_0$  в цепи запасена электромагнитная энергия:

$$W_{эм} = \frac{LI_0^2}{2}.$$

По закону сохранения энергии при отключении аппарат должен рассеять эту  $W_{эм}$  в окружающем пространстве в виде тепла или пере-

вести ее в какой-то накопительный элемент (например, в конденсатор), так как после отключения ток должен стать равным нулю. Если бы аппарат не осуществлял эти функции, электромагнитная энергия преобразовалась бы в электростатическую энергию полей, т. е. ушла бы на заряд всегда имеющихся в цепи емкостей проводов и других токоведущих элементов относительно земли и друг друга:

$$W_{\text{эм}} = W_{\text{эл}} = \frac{CU_c^2}{2}.$$

Возникающие в процессе заряда напряжения  $U_c$  были бы столь велики, что это приводило бы к пробое изоляционных промежутков.

В контактных аппаратах запасенная цепью электромагнитная энергия при отключении преобразуется в процесс зажигания дуги, затем в разогрев дугового канала, после чего рассеивается в виде теплоты в окружающей среде.

Электрическая дуга — это разновидность самостоятельного разряда в газах, специфический газовый проводник. Физически дуга представляет собой ионизированный газ, т. е. плазму.

Помимо положительного эффекта рассеивания запасенной в цепи электромагнитной энергии горение электрической дуги сопровождается отрицательными последствиями:

1. Затягивание процесса отключения: пока горит дуга, в цепи протекает ток. При обесточивании аварийных режимов отключение необходимо проводить по возможности наиболее быстро из-за значительного термического и электродинамического воздействия токов этих режимов на оборудование и систему.

2. Термическое воздействие на коммутирующие контакты аппарата и конструкционные элементы дугогасительного устройства.

3. Опасность взрыва при горении дуги в замкнутом объеме. Выделение значительного количества тепловой энергии за короткий промежуток времени приводит к росту давления в замкнутом объеме и возможному последующему взрывообразному механическому разрушению.

Для ограничения разрушительного воздействия дуги нужно:

- сокращать время ее горения;
- локализовывать процесс горения дуги в специально предназначенном для этого объеме дугогасительного устройства.

Отключение цепей постоянного и переменного тока происходит по-разному.

**Условие для отключения цепи постоянного тока.** На рис. 1.4 показана вольтамперная характеристика дуги и реостатная характеристика отключаемой цепи, которая соответствует простейшему последовательному  $RL$ -контур с контактами. Графический анализ взаимного расположения кривых приводит к следующему выводу: для отключения цепи постоянного тока необходимо, чтобы ВАХ дуги располагалась выше реостатной характеристики отключаемой цепи.

На практике достаточно касания этих кривых в одной точке, критическом положении.

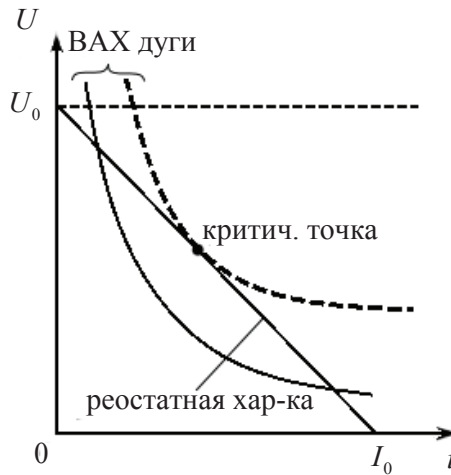


Рис. 1.4. ВАХ дуги и реостатная характеристика цепи

**Условие для отключения цепи переменного тока.** Отключение цепей переменного тока происходит гораздо легче, чем цепей постоянного тока. Объясняется это тем, что переменный ток с заданной периодичностью пересекает нулевое значение, из чего следует, что в эти моменты времени и запасенная в цепи электромагнитная энергия равняется нулю. Отключение происходит по гораздо более легкому сценарию, в эти моменты времени аппарату нужно создать условия для быстрого роста электрической прочности межконтактного промежутка.

При отключении на переменном токе одновременно протекают два процесса:

1. Переходный процесс восстановления напряжения на контактах аппарата. В отключенном положении к контактам приложено напряжение источника, в замкнутом положении падение напряжения

на контактах составляет доли вольт. Этот процесс роста напряжения от минимального до полного напряжения источника называется *переходным восстанавливающимся напряжением*  $U_b = f(R, L, C, t)$ .

2. Процесс восстановления межконтактным промежутком своих изоляционных свойств. Этот процесс называется *восстанавливающейся прочностью*  $U_{вп}$ , и его протекание зависит от многих факторов.

При сопоставлении кривых для этих процессов можно сказать, что для успешного гашения дуги в цепи переменного тока необходимо, чтобы за переходом тока через ноль кривая восстанавливающейся прочности всегда лежала выше кривой переходного восстанавливающегося напряжения.

При несоблюдении этого условия при смене направления тока происходит повторный пробой промежутка, и дуга снова загорается на полпериода.

Для гашения дуги вне зависимости от рода тока можно применять следующие воздействия на нее: охлаждение дуги, увеличение длины дуги, увеличение сопротивления дуги. В электрических коммутационных аппаратах для ускорения погасания дуги используют дугогасительные устройства, которые в той или иной степени реализуют вышеописанные воздействия.

## Контрольные вопросы

---

1. Почему поверхностный эффект приводит к дополнительному нагреву?
2. Какими причинами ограничивается допустимая рабочая температура нагрева?
3. Чем конвекция отличается от теплопроводности?
4. Как можно увеличить теплоотдачу из вакуумной дугогасительной камеры наружу, если излучения с боковой поверхности ТВС внутри камеры недостаточно?
5. При каких условиях можно пренебречь теплообменом с окружающей средой в режиме протекания тока короткого замыкания?
6. От чего зависит количество теплоты, отдающейся с поверхности аппарата в окружающую среду?

7. Чем опасны ЭДУ и в каких режимах?
8. К чему может привести сила сужения в контактах?
9. При прочих равных условиях на каком токе максимальная ЭДУ выше: постоянном или переменном?
10. Каковы основные особенности ЭДУ на переменном токе?
11. От чего зависит значение ЭДУ?
12. Какие функции контакты выполняют в аппаратах?
13. Перечислите основные требования к контактному материалу.
14. Возможно ли совмещение всех требований к контактному материалу из чистого металла одновременно?
15. Чем вызвано использование композитных контактных материалов?
16. Что влияет на качество контакта?
17. Чем опасна электрическая дуга?
18. Как снизить опасное воздействие дуги на аппарат?
19. Чем опасно отсутствие дуги в процессе коммутации?
20. Какой ток — постоянный или переменный — проще отключить?

## Глава 2.

# ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

---

---

**Э**лектрический аппарат — это техническое устройство, которое предназначено, в зависимости от предъявляемых к нему требований, для подачи энергии от источника к потребителю; для управления процессами производства, распределения и потребления электроэнергии; для контроля и защиты электроустановок и энергосистем.

По применению высоковольтные аппараты можно подразделить на следующие виды:

1. Коммутационные электрические аппараты предназначены для создания схем выдачи мощности, ее передачи на расстояние и электроснабжения потребителей:

- а) аппараты с токовой коммутацией предназначены для оперативной и аварийной коммутации токов при высоком напряжении:
  - высоковольтный выключатель — для обеспечения защиты оборудования и системы от аварийных режимов, а также коммутации номинального тока;
  - выключатель нагрузки — для оперативной коммутации номинальных токов;
  - высоковольтный предохранитель — для защиты от аварийных режимов;
- б) аппараты с бестоковой коммутацией предназначены для обеспечения ремонтных работ, безопасности персонала, секционирования, переключений и т. п.:
  - разъединитель — для создания видимого разрыва в цепи;
  - заземлитель — для принудительного заземления элементов токопровода высоковольтных аппаратов;
  - отделитель — для быстрого автоматического отключения обесточенных цепей;

— короткозамыкатель — для создания искусственного КЗ на землю.

2. Ограничивающие аппараты предназначены для ограничения воздействия аварийных режимов на систему:

- а) токоограничивающий реактор — для снижения величины ударного тока короткого замыкания и для поддержания напряжения на шинах РУ в аварийном режиме;
- б) разрядник и ОПН — для ограничения перенапряжений в сетях при грозовых и коммутационных явлениях.

3. Измерительные аппараты предназначены для изолирования высоковольтной цепи от цепи измерения, для приведения всех величин первичной цепи к стандартным значениям вторичной цепи и для питания релейной защиты:

- а) трансформатор тока;
- б) трансформатор напряжения.

4. Комплектные распределительные устройства (КРУ) — это целый комплекс электрических аппаратов, расположенных в едином корпусе, который поставляется в готовом виде для обеспечения управления, контроля и защиты в процессе потребления электроэнергии.

## 2.1. Вакуумные выключатели

Вакуум обладает очень высокой дугогасительной способностью вследствие высокой скорости восстановления электрической прочности.

Преимущества вакуумных выключателей: высокое быстродействие; широкий диапазон рабочих температур (от  $-70$  до  $200$  °С); надежность; долговечность; минимальные эксплуатационные затраты; минимальные габаритные размеры; высокая коммутационная износостойкость при номинальных токах; произвольное положение в пространстве вакуумного дугогасительного устройства; устойчивость в вибрациям и ударам; взрыво- и пожаробезопасность; экологичность.

Недостатки: относительно низкая отключающая способность; наличие значительных коммутационных перенапряжений из-за явления токового среза; неремонтопригодность вакуумной камеры; склонность контактов к холодной сварке при глубоком вакууме из-за относитель-

но чистой не окислившейся поверхности контактов; наличие рентгеновского излучения при испытаниях оборудования номинальным напряжением выше 35 кВ и при обычных коммутациях на напряжениях от 100 кВ и выше.

### 2.1.1. Дуга в вакууме

Дуга горит в среде ионизированного газа, но в глубоком вакууме  $1,3 \cdot (10^{-2} \div 10^{-5})$  Па отсутствует достаточное количество «материала» для горения дуги, поэтому она горит за счет материала контактов.

При размыкании контактов происходит снижение числа площадок фактического контактирования и перед моментом окончательного расхождения контакт-деталей на несколько последних контактных площадок приходится весь ток выключателя. Учитывая то, что при размыкании падало контактное нажатие, переходное сопротивление этих площадок относительно высокое. Вышеперечисленные причины приводят к тому, что точки контактирования плавятся. Поскольку процесс размыкания уже инициирован, расплавленные точки контакта не могут удержать его в замкнутом положении, т. е. привести к свариванию. В результате этого расплавленные точки контакта превращаются в жидкометаллические мостики, которые тянутся вслед за отходящим контактом и истончаются все больше. Это еще сильнее увеличивает их сопротивление и нагрев. В итоге происходит взрыв этих мостиков и межконтактный промежуток насыщается парами расплавленного металла. Эти пары ионизируются и в их среде загорается электрическая дуга. По мере разгорания дуги происходит увеличение ее температуры, и затем дуга поддерживает ионизированную среду за счет испарения материала контакта.

Если поступление паров металла в первые моменты времени окажется недостаточным, то дуга погаснет при первом же переходе тока через ноль.

В вакууме дуга может существовать в двух видах:

1. *Рассеянная* или *диффузная* дуга представляет собой несколько параллельных дуг, горящих одновременно, в каждой из них протекает ток от нескольких десятков до сотен ампер.

2. *Концентрированная*, *контрагированная* или *сжатая* дуга образуется, когда несколько параллельных дуг притягиваются друг к другу.

При этом резко повышается нагрев контакта в точке, на которую опирается дуга. Гашение сжатой дуги сильно осложняется, вплоть до выхода из строя вакуумной дугогасительной камеры.

При горении диффузной дуги катодные пятна, которые являются основанием для дуг, отталкиваются и пытаются охватить всю поверхность контакта. С другой стороны, из-за электродинамического взаимодействия дуг между собой имеется тенденция их сближения (токи одного направления притягиваются). Переход дуги из диффузного в сжатое состояние зависит от величины тока, материала контактов, их размеров и формы. Для обычных плоских торцевых контактов величиной пограничного тока образования сжатой дуги является значение  $10 \div 17$  кА, что является сравнительно низкой отключающей способностью.

Одной из основных задач при разработке ВДК на большую отключающую способность является удержание дуги в диффузном состоянии.

### 2.1.2. Срез тока

При отключении на подходе тока к нулю из-за высокой дугогасительной способности вакуума может произойти резкий обрыв тока. Это явление резкого обрыва называется токовым срезом.

При отключении активно-индуктивной цепи, в соответствии со вторым законом Кирхгофа, к контактам приложено напряжение

$$U_{\kappa} = U_0 - Ri - L \frac{di}{dt}.$$

Рассмотрим это уравнение вблизи нуля тока. При подходе тока к нулю слагаемое  $Ri$  тоже стремится к нулю, а слагаемое  $L \cdot di/dt$  зависит от индуктивности отключаемой цепи и скорости изменения тока. Если ток резко уменьшается, то слагаемое  $L \cdot di/dt$  резко возрастает. Поскольку ток уменьшался, то его производная по времени отрицательна, а значит:

$$U_{\kappa} = U_0 - Ri_{\rightarrow 0} - \left( -L \frac{di}{dt} \right) \approx U_0 + L \frac{di}{dt}.$$

Как видно из формулы, перенапряжение тем больше, чем выше индуктивность отключаемой цепи и скорость снижения тока. При токовом срезе скорость изменения тока очень велика.

Для борьбы с токовыми срезами используют контактный материал, в состав которого входят легколетучие компоненты: висмут, сурьма, хром и т. п. С помощью этих компонентов промежутки намеренно насыщаются парами металла, в которых горит дуга, тем самым снижая величину токового среза.

### 2.1.3. Контактные системы вакуумных выключателей

Контактные системы в аппаратах выполняют важные функции: малое переходное сопротивление, обеспечение требуемого раствора для успешного погасания дуги и коммутационную износостойкость. В вакуумных выключателях к перечисленным функциям добавляются еще несколько:

1. Удержание дуги в диффузном виде. Эта проблема решается особой геометрической конфигурацией контактов. Существует два основных направления в конструкциях контактов для ВДК: RMF-контакты и AMF-контакты.

2. Снижение величины токового среза. Контакты насыщают промежутки своими парами.

3. Теплоотведение. Поскольку в вакууме теплоотвод возможен только излучением, существует проблема охлаждения токопровода и контактной зоны не только при коммутациях, но и во включенном состоянии при номинальных токах. Для решения этой проблемы токопровод внутри ВДК и контакты делают довольно массивными для передачи теплоты вдоль них наружу ВДК.

4. Предотвращение явления холодной сварки. Контактный материал должен обладать такими свойствами, чтобы образуемые им сварные швы были хрупкими и не могли привести к привариванию контактов.

**Контакты с радиальным магнитным полем.** Аббревиатура RMF (Radial Magnetic Field) расшифровывается как «радиальное магнитное поле». Такое поле заставляет дугу совершать вращение вокруг оси контакта, по его периметру. При этом дуга постоянно переходит на холодные участки контакта, что положительно сказывается на его износе.

Радиальное поле создается особой геометрией контактного узла. Основными геометрическими формами таких RMF-контактов являются:

- 1) лепестковые или спиралевидные контакты;
- 2) контакты, в разрезе похожие на колпачок, или контакты чашеобразного типа.

На рис. 2.1 представлены контакты с радиальным магнитным полем.

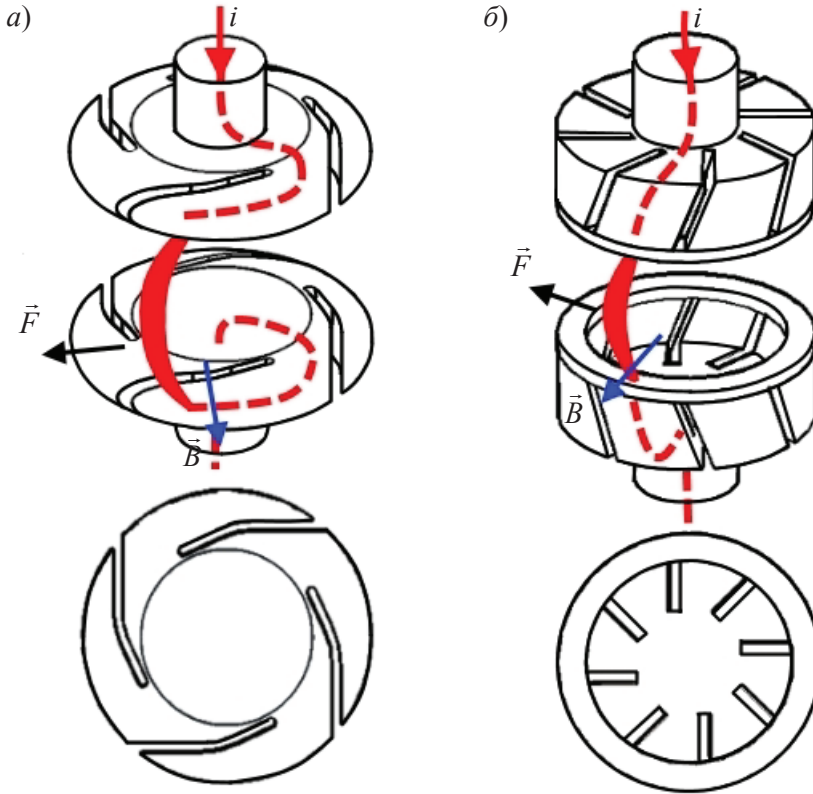


Рис. 2.1. RMF-контактные системы вакуумных выключателей:

а) лепестковая; б) чашеобразная

Лепестковые контакты представляют собой изгибающиеся лепестки, которые отходят от сердцевины токоведущего стержня. Форма лепестков подобрана таким образом, что при протекании тока по ним создается радиальное магнитное поле, которое выталкивает дугу на периферию лепестка. Далее дуга перемещается по лепесткам, переходя через зазоры между ними. На рис. 2.1, а изображен такой контакт.

В чашеобразных контактах радиальное поле создается током в прорезанных под наклоном стенках чаши. Дуга под действием этого поля совершает вращение по периметру чаши.

**Контакты с осевым магнитным полем.** На рис. 2.2 показаны AMF-контактные системы.

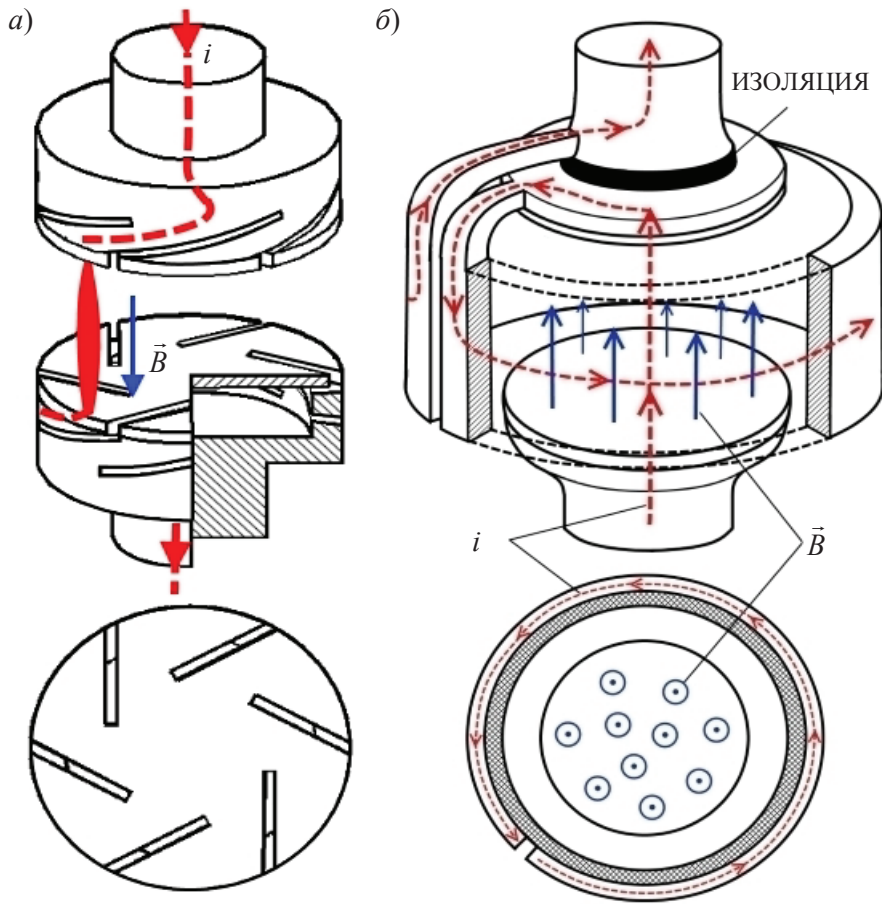


Рис. 2.2. AMF-контактные системы вакуумных выключателей:  
 а) со встроенным в контакты витком; б) с внешним витком

AMF (Axial Magnetic Field) — это осевое (аксиальное) магнитное поле. Если на плазму дуги и заряженные частицы в ней действовать достаточно сильным магнитным полем, которое направлено вдоль оси контакта, то электроны в дуге будут перемещаться вдоль линий магнитного поля. Такая дуга стоит на месте.

Реальная траектория электронов из-за азимутальной составляющей магнитного поля собственного тока (взаимное притяжение дуг) будет спиралевидной, закрученной вокруг оси контакта. Объясняется это действием сил Лоренца на движущийся электрон в магнитном поле.

Конструктивно в AMF-системах создается виток или часть витка, при протекании тока по которому и образуется осевое магнитное поле.

Виток может быть образован элементами контакта или внешними проводниками, охватывающими камеру по периметру.

### 2.1.4. Конструкции вакуумных выключателей

Основной элемент вакуумного выключателя — это вакуумная дугогасительная камера. На рис. 2.3 изображена вакуумная камера на напряжение 10 кВ.

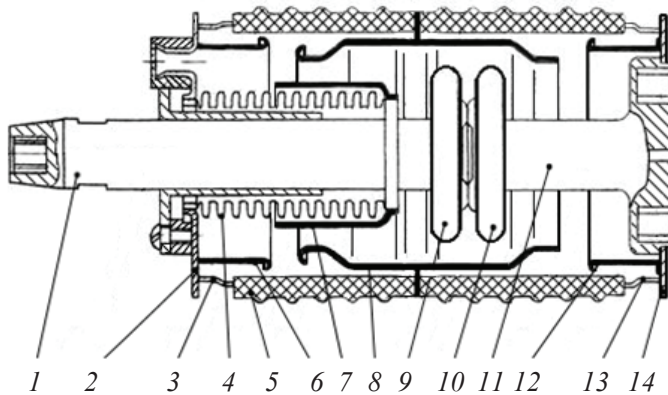


Рис. 2.3. Вакуумная дугогасительная камера на 10 кВ<sup>1</sup>:

1 — подвижный токопровод; 2, 14 — фланцы; 3, 13 — манжеты; 4 — сильфон; 5 — изолятор; 6, 7, 8, 12 — экраны; 9 — контактная деталь; 10 — контакт; 11 — неподвижный токопровод

В конструкцию ВДК входит подвижный токопровод 1 с контактной деталью 9, неподвижный токопровод 11 с контактом 10, керамический изолятор 5, края которого армированы металлическими манжетами 3 и 13, к манжетам приварены фланцы 2 и 14 из нержавеющей стали, для сохранения вакуума внутри ВДК и обеспечения подвижности к контакту приварен металлический сильфон 4, специальные экраны 6, 7, 8 и 12 обеспечивают защиту сильфона от расплавленных капель, предохраняют внутреннюю поверхность изолятора от металлизации и задают распределение потенциала внутри ВДК.

На сегодняшний день вакуумные аппараты составляют конкуренцию элегазовым выключателям в диапазоне напряжений 10–35 кВ.

<sup>1</sup> Новые разработки ВЭИ в области вакуумных дугогасительных камер / Г. С. Белкин, И. А. Лукацкая, А. А. Перцев [и др.] // Электротехника. 2001. № 9. С. 9–15.

На рис. 2.4 изображен общий вид вакуумного выключателя на 110 кВ: 1 и 3 — силовые выводы для подключения аппарата к сети, 2 — изоляционная покрывка с ВДК, 4 — опорная изоляция с изоляционной тягой внутри, 5 — заземленная рама, 6 — привод.

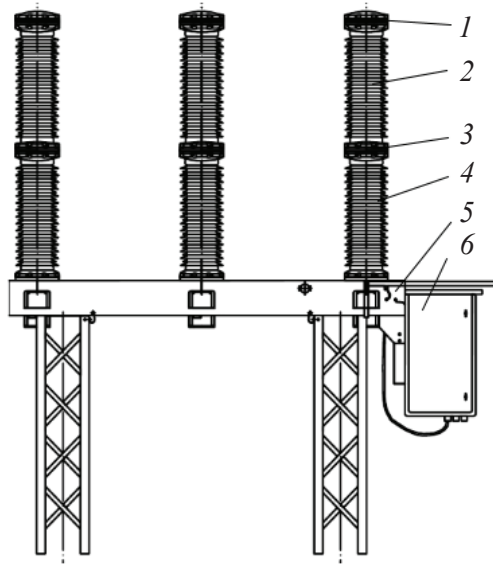


Рис. 2.4. Вакуумный выключатель на 110 кВ типа ВРС-110<sup>2</sup>:

1, 3 — силовые выводы; 2 — изоляционная покрывка с ВДК; 4 — опорная изоляция;  
5 — заземленная рама; 6 — привод

## 2.2. Элегазовые выключатели

---

Для развития коммутационной аппаратуры необходимо искать новые дугогасительные среды, более эффективные, чем воздух и трансформаторное масло. Одной из таких сред является элегаз.

---

<sup>2</sup>НКАИ.670049.042 ТИ. Выключатели вакуумные типа ВРС-110 / Концерн «Высоковольтный союз». 2012. С. 12. URL: <http://energy-npp.ru/files/ВРС-110.pdf> (дата обращения: 23.09.19).

### 2.2.1. Электротехнические свойства элегаза

Слово «элегаз» является акронимом от словосочетания «электротехнический газ».

Электроотрицательность молекул равна сумме потенциала ионизации и сродства к электрону. Сродство к электрону у молекулы  $SF_6$  имеет положительный знак, из-за чего свободный электрон легко захватывается молекулой элегаза с образованием устойчивого отрицательного иона. Высокая электроотрицательность и образование тяжелых, малоподвижных (в сравнении со свободным электроном) отрицательных ионов объясняет высокую электрическую прочность элегаза по сравнению с воздухом и азотом.

Электрическая прочность элегаза  $E_{пр}$  при давлении  $p = 0,3$  МПа в 2,5 раза выше, чем у воздуха, и примерно равна прочности трансформаторного масла. Это положительно сказывается на габаритах элегазового оборудования, они на порядок меньше, чем у оборудования с воздушной изоляцией.

Теплопроводность  $\lambda$  и теплоемкость  $c$  элегаза ниже, чем у воздуха, но из-за более высокой плотности общие теплопередающие свойства оказываются выше. Это позволяет уменьшить сечения токоведущих частей, что снижает расход цветных металлов и уменьшает габариты.

Необходимый объемный расход элегаза для гашения дуги в 2,3 раза ниже, чем для воздуха. Благодаря этому появилась возможность создания мощных автокомпрессионных дугогасительных устройств.

### 2.2.2. Особенности применения элегаза в электрических аппаратах

**Разложение элегаза под действием короны и дуги.** Под действием электрических разрядов происходит разложение элегаза на низшие фториды и свободный фтор. Протекание этих реакций и образующиеся соединения зависят от вида разряда.

В реальных условиях в электрических аппаратах в элегазе присутствуют различные примеси, например: пары воды, минеральных масел, примеси воздуха, пары металлов и других материалов камеры (от воздействия разрядов). Поэтому при погасании дуги продукты разложения элегаза не рекомбинируют полностью. Они вступают в реакцию

с примесями и образуют газообразные и твердые фториды, многие из которых обладают токсичными свойствами.

Химически менее стойкие продукты разложения элегаза при наличии паров воды и кислорода вступают в дальнейшую реакцию между собой. Если концентрация паров воды высока, то результатом химических процессов будет образование серной  $H_2SO_4$  и фтороводородной HF (плавиковой) кислот. Реакции этих кислот с окружающими конструкционными и электротехническими материалами негативно сказываются на состоянии электрического аппарата.

**Эксплуатация элегаза при низких температурах.** При рабочих давлениях, обеспечивающих требуемые изоляционные и дугогасительные свойства элегаза, при низких температурах элегаз переходит из газообразного состояния в жидкое, а при температурах ниже тройной точки ( $-50,8\text{ }^\circ\text{C}$ ) — в твердое состояние. При этом происходит снижение плотности газообразной фазы и ухудшение изоляционных и дугогасительных свойств. Эта проблема может быть решена применением подогрева при низких температурах. Очевидно, что такая мера усложняет и удорожает конструкцию, затрудняет эксплуатацию аппаратов, снижает их общую надежность. Другим способом решения проблемы эксплуатации элегаза при низких температурах является частичное замещение его другим газом, остающимся в газообразном состоянии при более низких температурах. Примером таких замещающих газов являются азот  $N_2$  и тетрафторметан  $CF_4$  (хладон-14).

### 2.2.3. Гашение дуги в элегазовой среде

Высокая дугогасительная способность элегазовых коммутационных аппаратов определяется свойствами элегаза. Принципиально гашение дуги в элегазовых аппаратах организуется путем обдува ее потоком газа, перемещающегося на большой скорости. При этом происходит:

- интенсивный теплоотвод от дугового столба при теплообмене дуги с газовым потоком;
- растягивание и удлинение дуги в пространстве камеры или внутри контактов;
- механическое удаление горячих ионизированных частиц путем выноса их с потоками газа и замещение их холодными неионизированными молекулами.

В коммутационных элегазовых аппаратах элегаз как изолирующая и дугогасящая среда используется при давлениях  $0,15 \div 1,0$  МПа. Такие давления позволяют обеспечить нужную электрическую прочность между электродами при воздействии различных условий в цепи отключения и высокую коммутационную способность дугогасительного устройства.

При высокой температуре происходит термическое разложение элегаза. Разные уровни температур при этом приводят к образованию и концентрации разных компонентов процесса термического разложения.

При температурах около 2500 К появляются свободные электроны, которые тут же присоединяются к атомарному фтору и образуют отрицательные ионы фтора. При 3000 К к продуктам распада начинают добавляться ионы  $S^+$ ,  $F^+$ ,  $F^-$ ,  $S^-$ . При 4000 К удельная электропроводность газа выше нуля и продолжает быстро расти с дальнейшим ростом температуры. Четко выраженный дуговой столб сохраняется и при небольших токах, а малый коэффициент теплопроводности при температурах выше 3000 К вызывает при этом повышенный температурный градиент в радиальном направлении. Это означает интенсивный теплоотвод от сердцевины дугового столба, в которой ионизация наиболее интенсивна, к его периферии, которая тесно взаимодействует с газовым потоком.

Экспериментально доказано, что при подходе тока к нулю в дугогасительных устройствах элегазовых выключателей происходит быстрое рассеивание тепловой энергии остаточного следа дуги. Это благотворно сказывается на ее окончательном погасании.

Для увеличения отключающей способности необходимо интенсифицировать взаимодействие дуги с газовым потоком, что организуется при помощи специальных дутьевых сопел и каналов в дугогасительных устройствах.

#### **2.2.4. Виды дугогасительных устройств элегазовых выключателей**

Наибольшее распространение в элегазовых выключателях получили камеры продольного дутья. Камера продольного дутья организует обдув дуги потоком элегаза, который движется вдоль дугового столба.

В камерах продольного дутья элегазовый поток интенсивно воздействует на ствол электрической дуги, что является наиболее эффективным способом ее гашения. Продольное дутье часто применяется в конструкциях дугогасительных устройств современных элегазовых выключателей переменного тока высокого напряжения. Типичные схемы продольного дутья приведены на рис. 2.5.

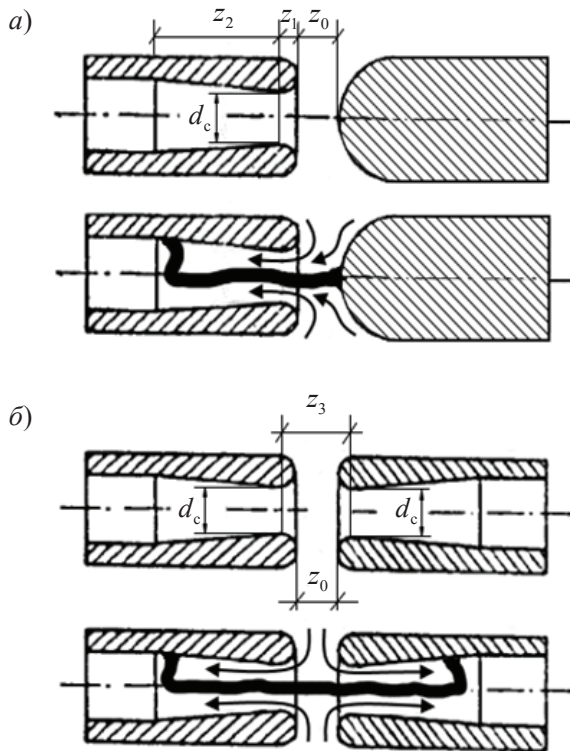


Рис. 2.5. Продольное дутье<sup>3</sup>:  
а) одностороннее, б) двустороннее<sup>4</sup>

Основными конструктивными параметрами таких систем являются: площадь сечения  $S_c$  или диаметр  $d_c$  горловины сопла, относительное расположение, определяемое расстоянием  $z_0$ , размеры элементов вход-

<sup>3</sup> Электрические аппараты высокого напряжения / Г. Н. Александров, А. И. Афанасьев, В. В. Борисов [и др.]; под ред. Г. Н. Александрова. Изд. 2-е, доп. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000. С. 209.

<sup>4</sup> При двустороннем дутье одно из сопел может обладать меньшим диаметром, тогда оно считается вспомогательным, его диаметр —  $d_{вс}$ .

ной части сопла ( $z_1, z_3$ ), а также геометрическая форма и размеры диффузоров  $z_2$ , площадь сечения  $S_{\text{вс}}$  или диаметр  $d_{\text{вс}}$  горловины вспомогательного сопла. Оптимальные условия для гашения дуги в таких системах в основном определяются геометрией дутьевых сопел. Их конструкция должна удовлетворять следующим основным требованиям:

— форма потенциального поля течения газового потока во входной части должна способствовать осевой стабилизации ствола дуги, это позволяет задувать дугу внутрь полости контакта и таким способом удлинять ее;

— в межконтактном промежутке должна быть создана такая форма однородного электрического поля, при которой электрическая прочность промежутка будет наибольшей, поскольку неоднородные поля приводят к снижению прочности элегаза.

**Автокомпрессионное дугогасительное устройство.** На рис. 2.6 изображен общий принцип работы автокомпрессионного ДУ элегазового выключателя. Дугогасительное устройство состоит из неподвижного контакта 1, фторопластового сопла 2, подвижного контакта 3, выпускных клапанов 4, поршня с рабочей областью 5, впускного клапана б.

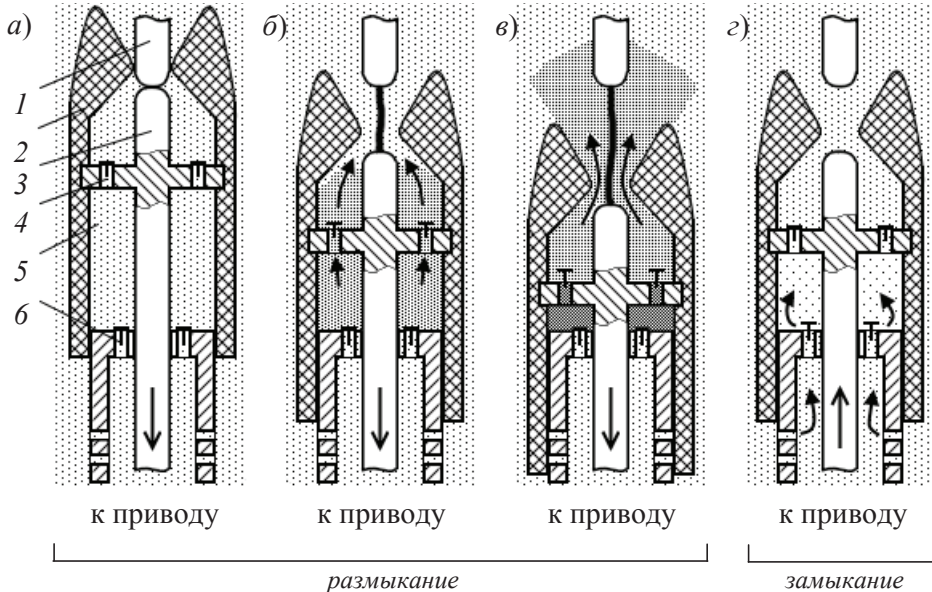


Рис. 2.6. Принцип действия автокомпрессионного ДУ:

а) замкнутое состояние: 1 — неподвижный контакт; 2 — сопло; 3 — подвижный контакт; 4 — выпускные клапаны; 5 — поршень; б — впускной клапан; б) нагнетание давления в подпоршневом объеме; в) гашение дуги потоком элегаза; г) наполнение подпоршневого объема

Автокомпрессионные ДУ устанавливаются в аппараты с одной ступенью давления. В отключенном и включенном состояниях давление во всех объемах одинаковое и больше атмосферного для предотвращения попадания окружающего воздуха внутрь аппарата. Впускные и выпускные клапаны закрыты. Поток элегаза для обдува дуги образуется при отключении, когда движущийся контакт, с которым связан поршень, нагнетает в подпоршневом уменьшающемся объеме необходимое давление. При достижении давлением определенной величины открываются выпускные клапаны и поток элегаза устремляется к дуге. Фторопластовое сопло при взаимодействии с дугой разлагается на газ, что дополнительно повышает успешность гашения дуги.

При включении происходит увеличение подпоршневого объема, что приводит к разрежению газа в нем и падению давления. При этом открываются впускные клапаны для заполнения этого объема элегазом. При уравнивании давлений клапаны закрываются.

Преимущества такого вида дутья: малый расход элегаза; отсутствие компрессионного оборудования для предварительного сжатия.

Недостатки: большая масса подвижной системы с поршнем и соплом, которая растет с ростом номинального тока и напряжения; относительно большой ход контактов; значительное время отключения.

Уменьшения времени срабатывания можно добиться, если при отключении дополнительно организовать встречное к поршню движение нижней части поршневого цилиндра, тогда сокращение подпоршневого объема ускорится, что позволит быстрее достигнуть необходимого для дутья давления. Также можно применять специальные области разрежения (пониженного давления), которые при отключении дополнительно создают перепад давления, что ускоряет поток элегаза.

**Автогенераторное дугогасительное устройство.** Автогенераторные ДУ, как и автокомпрессионные, тоже относятся к конструкции аппаратов с одной ступенью давления.

На рис. 2.7 изображен общий принцип действия такого дугогасительного устройства.

Автогенераторное ДУ состоит из подвижного контакта 1, изоляционного дутьевого сопла 2, неподвижного контакта 3 и специального объема для генерации избыточного давления 4 (зона «Г»).

Во включенном и отключенном состояниях давление во всех областях одинаковое. Давление создается термическим воздействием электрической дуги на дутьевое сопло, при этом происходит его разложе-

ние с образованием газов, и на элегаз. В автогенерирующих устройствах есть специальный объем или зона генерации высокого давления. Этот объем в определенный промежуток времени имеет фиксированный размер и при горении в нем дуги происходит повышение температуры элегаза, что в соответствии с уравнением состояния газа  $pV/T = \text{const}$  вызывает рост давления. К процессу роста давления от температуры добавляется давление газа, генерируемого материалом изоляции.

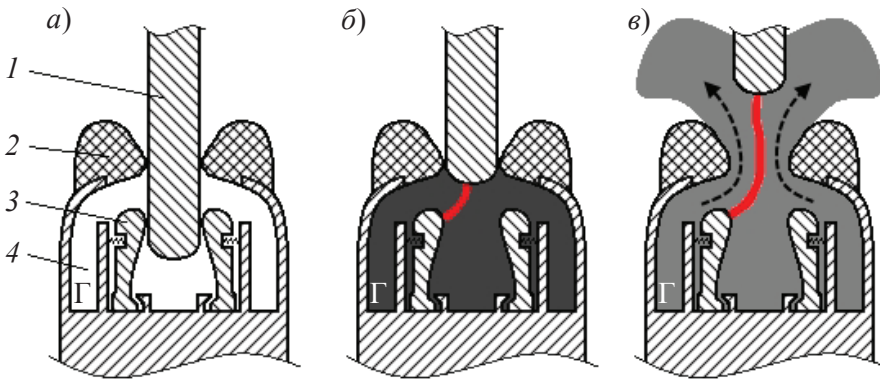


Рис. 2.7. Общий принцип действия автогенерирующего ДУ:

*a)* замкнутое состояние: 1 — подвижный контакт; 2 — сопло; 3 — неподвижный контакт; 4 — объем для генерации избыточного давления; *б)* начало размыкания и генерация давления; *в)* окончание процесса размыкания и гашение дуги

Расстояния движения контакта и конфигурация контактной системы подобраны так, что между моментами зажигания дуги и выходом контакта из сопла тело контакта полностью перекрывает дутьевое отверстие. При этом термическое воздействие дуги на элегаз ограничено объемом генерации, и выделяющаяся энергия в этом объеме приводит к росту давления в нем же, а также к термическому разложению элегаза на составляющие. При открытии контактом сопла запасенная газом энергия расходуется на обдув и охлаждение дуги, что завершается ее погасанием.

К преимуществам такого типа гашения можно отнести снижение энергоемкости привода, поскольку теперь не требуется сжимать элегаз до высоких давлений.

В процессе отключения изоляционное сопло контактирует с дугой и потоками элегаза, поэтому со временем происходит абляция (износ под действием излучения или горячего газового потока) его поверхно-

сти. Это приводит к возникновению щели между контактом и соплом в момент генерации давления, из-за чего происходит утечка элегаза из объема генерации и понижение давления, что снижает отключающую способность.

**Комбинация автокомпрессии и автогенерации.** В современных элегазовых выключателях комбинируют автокомпрессионные и автогенерирующие принципы гашения. В дополнение к преимуществам автокомпрессии автогенерация позволяет снизить мощность и габариты привода, локализовать термическое воздействие дуги и использовать его для дополнительного давления и, соответственно, для повышения отключающей способности.

**Электромагнитное дутье.** Успешность гашения зависит от интенсивности взаимодействия дуги с элегазом. Электромагнитное дутье реализует принцип движения не элегаза вдоль дуги, а дуги в элегазе. На рис. 2.8 изображена конструкция такого ДУ. В ее состав входят: обмотка для генерации радиального (по радиусу контакта) магнитного поля  $I$ , неподвижный контакт  $2$ , кольцевой электрод  $3$ , камера  $4$ , подвижный контакт  $5$ .

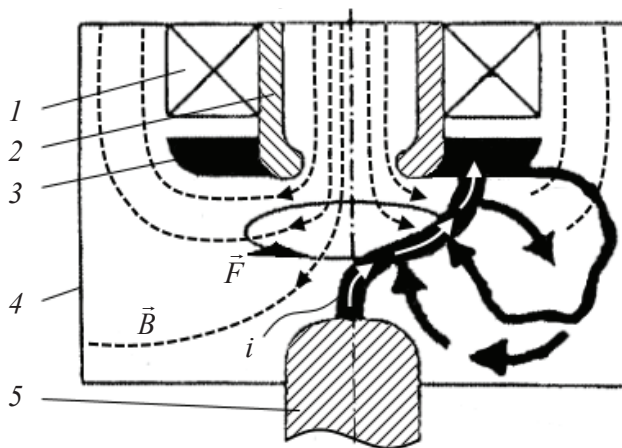


Рис. 2.8. Принцип действия электромагнитного дутья<sup>5</sup>:

1 — обмотка; 2 — неподвижный контакт; 3 — кольцевой электрод; 4 — камера;  
5 — подвижный контакт

<sup>5</sup> Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией / Г. Е. Агафонов, И. В. Бабкин, Б. Е. Берлин [и др.] ; под ред. Ю. И. Вишневского. СПб. : Энергоатомиздат, 2002. С. 90.

При отключении загорается электрическая дуга, специальная обмотка, включенная в токовый контур аппарата, создает магнитное поле. Это поле направлено вдоль радиуса контактов и взаимодействует с током в дуге, при этом образуется электромагнитная сила. Электромагнитная сила направлена так, что заставляет дугу с большой скоростью перемещаться по периметру кольцевого электрода. Эти действия обеспечивают охлаждение дуги, деионизацию и гашение.

Для увеличения отключающей способности камеры электромагнитное дутье можно совмещать с принципом автогенерации.

**Камера продольного дутья с двумя ступенями давления.** Элегазовые выключатели с двумя ступенями давления конструктивно очень похожи на воздушные выключатели, отличием является выхлоп при отключении во внутренние объемы аппарата, а не в окружающую среду.

Продольное дутье создается из резервуара под высоким давлением (ДУ  $0,7 \div 1,5$  МПа) в резервуар с низким давлением (бак  $0,1 \div 0,5$  МПа). После срабатывания компрессионное оборудование перекачивает элегаз обратно в ДУ и сжимает его.

Преимущество таких выключателей — высокая отключающая способность. Недостатком будет наличие компрессорного оборудования для перекачки, перепускных клапанов и необходимость подогрева зоны высокого давления для предотвращения сжижения элегаза и пониженная из-за этого надежность.

На сегодняшний день высокая отключающая способность автокомпрессионных и автогенерирующих выключателей, а также их надежность вытеснили с рынка выключатели с двумя ступенями давления.

### 2.2.5. Конструкции элегазовых выключателей

На сегодняшний день элегазовые выключатели покрывают весь диапазон требуемых номинальных напряжений. В развитых странах они практически вытеснили другие виды коммутационных аппаратов из диапазона напряжений 110 кВ и выше.

Условно все элегазовые коммутационные аппараты по внешнему конструктивному исполнению можно разделить на три вида:

1. Колонковые элегазовые выключатели. На рис. 2.9, а приведен типичный представитель таких выключателей. Обычно в подобных аппаратах коммутационно-дугогасительный модуль поднят над за-

земленной металлической рамой 4 на опорных изоляционных конструкциях 2 и его внешний вид напоминает колонну. Сами контакты и ДУ обычно также располагаются внутри изоляционной покрывки цилиндрической формы 1. Для связи контактов этого модуля с приводным механизмом 3 в опорных изоляционных конструкциях пролегает тяга. Для контроля плотности элегаза аппараты снабжаются специальным датчиком 5. На напряжении 220 кВ и выше в зависимости от конкретной конструкции ДУ такой колонковый выключатель может принимать Т- или Y-образный вид.

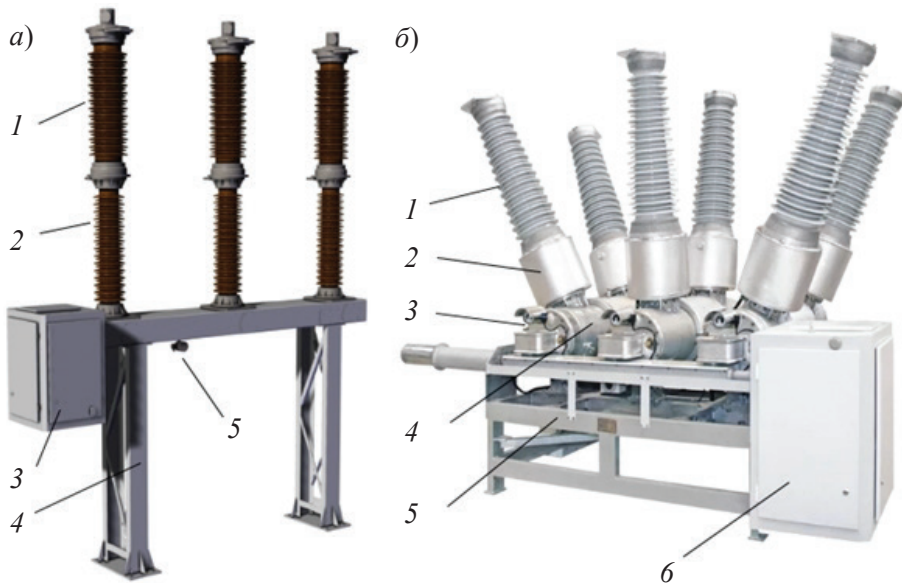


Рис. 2.9. Элегазовые выключатели наружной установки ( $U_n = 100$  кВ,  $I_n = 2500$  А,  $I_{но} = 40$  кА,  $I_{тс} = 40$  кА (при  $t_{тс} = 3$  с),  $I_{дс} = 102$  кА):

а) колонковый выключатель типа ВГТ-110<sup>6</sup>: 1 — изоляционная покрывка; 2 — опорные изоляционные конструкции; 3 — приводной механизм; 4 — заземленная рама; 5 — датчик контроля плотности элегаза; б) баковый выключатель типа ВЭБ-110<sup>7</sup>: 1 — проходные изоляторы; 2 — измерительные трансформаторы тока; 3 — сигнализатор плотности элегаза; 4 — заземленный бак; 5 — рама; 6 — приводной механизм

<sup>6</sup> Выключатель элегазовый колонковый ВГТ-110 (У1, УХЛ1\*) // ООО «Курс» : [сайт]. URL: <http://zaokurs.ru/katalog/elektrotexnicheskoe-oborudovanie/vyisokovoltnoe-oborudovanie/vyiklyuchateli-elegazovyie/vyiklyuchatel-elegazovyyj-kolonkovyyj-vgt-110> (дата обращения: 23.09.19).

<sup>7</sup> Элегазовый выключатель ВЭБ-110 УХЛ1, УХЛ1, У1, Т1 // Международный центр интернет-торговли Allbiz : [сайт]. URL: <https://ru.all.biz/elegazovyyj-vyiklyuchatel-veb-110-uhl1-uhl1-u1-t1-g2244108> (дата обращения: 23.09.19).

2. Баковые элегазовые выключатели, рис. 2.9, б. В них вся контактно-дугогасительная система помещена внутри металлического заземленного бака 4. Элегаз в таких аппаратах выполняет функцию дугогашения, изоляции между контактами в разомкнутом состоянии и изоляции токоведущей системы от заземленного бака. Токоведущие проводники внутри бака подаются через проходные изоляторы 1. Иногда в систему проходных изоляторов встраивают измерительные трансформаторы тока 2. Выключатель располагают на раме 5, там же расположен приводной механизм 6 и сигнализатор плотности элегаза для каждого полюса 3.

3. Элегазовые выключатели, встраиваемые в КРУ и КРУЭ. При напряжении 10–35 кВ из-за малой протяженности изоляционных промежутков и небольшого объема элегаза такие выключатели обычно представляют собой единый трехфазный блок и по габаритам немного уступают вакуумным аппаратам. Выключатели для встраивания в КРУЭ обычно не являются самостоятельными аппаратами и неотделимы от распредустройства.

### 2.3. Измерительные трансформаторы тока

Системы измерения, контроля, управления, защиты и автоматики, как правило, работают на низком напряжении, на небольшой мощности, малом токе, и их связь с контролируемой цепью осуществляется через измерительные трансформаторы тока. Основное их назначение:

- 1) изоляция вторичных цепей и приборов от высокого потенциала;
- 2) преобразование первичного тока любой величины в переменный ток, который приемлем по значению для цепей измерения и релейной защиты.

Классификация трансформаторов тока производится по следующим основным признакам:

- 1) по месту установки: на открытом воздухе; в закрытом помещении; в полостях электрооборудования;
- 2) по способу установки: проходные, используемые в качестве вводов в электроустановку; опорные, устанавливаемые на опорной плоскости; встроенные, размещаемые непосредственно внутри электрооборудования;

- 3) по числу ступеней трансформации: одноступенчатые, каскадные;
- 4) по выполнению первичной обмотки: одновитковые, многovitковые;
- 5) по назначению вторичных обмоток: для измерения, для защиты, для измерения и защиты;
- 6) по числу коэффициентов трансформации: с одним коэффициентом; с несколькими коэффициентами трансформации.

### 2.3.1. Принцип действия трансформатора тока

Трансформатор тока содержит замкнутый магнитопровод с первичной  $w_1$  и вторичной  $w_2$  обмотками. Первичная обмотка обтекается контролируемым током  $I_1$ . Вторичная обмотка является источником энергии (задающей ток  $I_2$ ) для измерительных приборов и реле. Первичный ток  $I_1$  не зависит от вторичной нагрузки и определяется только нагрузкой и параметрами первичной цепи. Отсюда следует, что магнитный поток  $\Phi_1$ , создаваемый током в первичной цепи, тоже не зависит от вторичной нагрузки. Сопротивление вторичной нагрузки и соединительных проводников незначительно, поэтому трансформатор тока работает в режиме, близком к короткому замыканию. Нагрузкой трансформаторов тока является полное сопротивление  $\underline{z}_n$  его внешней вторичной цепи (Ом). Номинальную полную нагрузку можно выражать также через потребляемую ею мощность (В·А):  $\dot{S}_n = \dot{I}_n^2 \cdot \underline{z}_n$ .

На рис. 2.10 изображена схема замещения трансформатора тока. Работа трансформатора тока определяется результирующим намагничивающим потоком  $\Phi_0$ . Намагничивающий поток является результатом суммарного действия магнитных потоков от первичного и вторичного токов. Первичная  $\dot{I}_1 w_1$  и вторичная  $\dot{I}_2 w_2$  магнитодвижущие силы, а также создаваемые ими магнитные потоки  $\dot{\Phi}_1$  и  $\dot{\Phi}_2$ , геометрически складываются, создавая результирующий поток  $\dot{\Phi}_0$  в трансформаторе тока:  $\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1$  и  $\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 = \dot{\Phi}_0$ .

Намагничивающий поток  $\Phi_0$  замкнут через магнитопровод и пронизывает обе обмотки трансформатора, наводя таким образом во вторичной обмотке ЭДС  $E_2$ , которая при замкнутости вторичной цепи

создает ток  $I_2$ . Можно сказать, что намагничивающий поток  $\Phi_0$  создается магнитодвижущей силой  $I_0 w_1$ , где  $I_0$  — это ток намагничивания, являющийся частью первичного тока  $I_1$ . При номинальном первичном токе ток намагничивания составляет всего несколько процентов, справедливо соотношение

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_1}{n_b} - \frac{\dot{I}_0}{n_b},$$

где  $n_b = w_2/w_1$  — витковый коэффициент трансформации трансформатора тока.

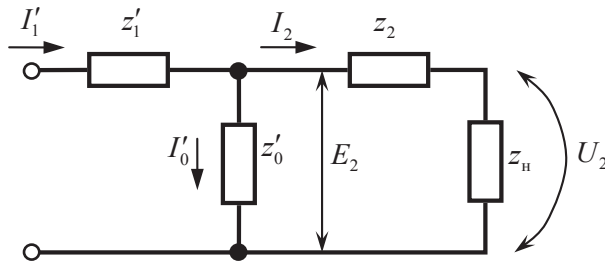


Рис. 2.10. Схема замещения трансформатора тока

Из-за того, что в номинальных режимах работы ток намагничивания незначителен, им можно пренебречь, тогда приблизительный коэффициент трансформации будет определяться выражением

$$n_t = \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

### 2.3.2. Погрешности трансформаторов тока и их коррекция

**Погрешности трансформаторов тока.** Для трансформаторов тока существует три вида погрешностей: токовая, полная и угловая. Для схемы замещения все первичные величины приведены к вторичной стороне трансформатора тока через коэффициент трансформации:  $I'_1 = I_1/n_t$ ,  $I'_0 = I_0/n_t$ .

Приведенные сопротивления первичной обмотки  $z'_1 = z_1/n_t^2$  и ветви намагничивания  $z'_0 = z_0/n_t^2$ . На основе схемы замещения строится век-

торная диаграмма трансформатора тока, которая изображена на рис. 2.11.

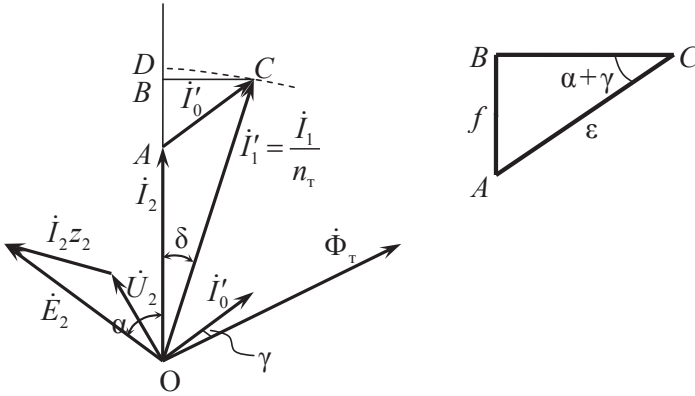


Рис. 2.11. Векторная диаграмма трансформатора тока

Величина  $\Delta I$ , равная арифметической разности между длинами векторов  $\dot{I}'_1$  и  $\dot{I}_2$ , называется токовой погрешностью (отрезок  $AD$  по векторной диаграмме), обозначается  $f_i$  и вычисляется по формуле

$$f_i = \frac{I_2 - I'_1}{I'_1} \cdot 100\% = \frac{I_2 n_T - I_1}{I_1} \cdot 100\%.$$

Угловой погрешностью называют угол  $\delta$  между векторами токов  $\dot{I}_2$  и  $\dot{I}'_1$ .

Абсолютное значение вектора тока намагничивания  $\dot{I}_0$  (равного геометрической разности вектора приведенного первичного тока  $\dot{I}'_1$  и вектора действительного вторичного тока  $\dot{I}_2$ ) называется полной погрешностью, обозначается греческой буквой  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{|\dot{I}_0|}{|\dot{I}'_1|} \cdot 100\%,$$

где  $|\dot{I}_0|$  и  $|\dot{I}'_1|$  — длины векторов тока намагничивания и приведенного первичного тока.

При проектировании трансформатора погрешность может выйти за пределы, установленные стандартами. Если изменение геометрии невозможно, то в этих случаях используются методы уменьшения погрешности, как токовой, так и угловой.

**Витковая коррекция.** Отрицательную токовую погрешность можно уменьшить, отмотав от вторичной обмотки несколько витков. За счет уменьшения числа витков уменьшается МДС вторичной обмотки и, следовательно, поток, который она создает. Отсюда следует, что увеличивается намагничивающий поток  $\Phi_0$ , т. к.  $\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2$  и  $\Phi_1 = \text{const}$ . Увеличение потока намагничивания приводит к увеличению ЭДС вторичной обмотки, а это увеличивает и ток в ней. Витковая коррекция перемещает кривую погрешностей параллельно самой себе, не изменяя ее кривизны.

При большом числе витков вторичной обмотки витковая коррекция дает хорошие результаты. Витковая коррекция не влияет на угловую погрешность.

На рис. 2.12 приведены различные способы реализации метода витковой коррекции, где 1 — первичная обмотка, 2 — магнитопровод, 3 — вторичная обмотка.

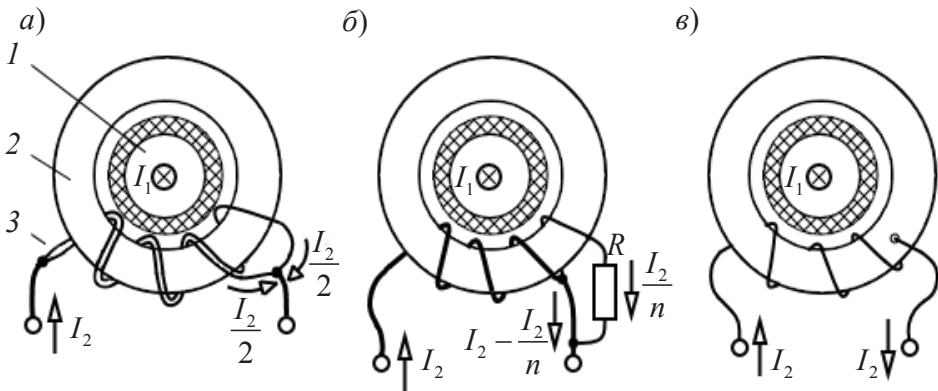


Рис. 2.12. Схемы витковой коррекции:

- а) дробная отмотка витков расщепленным проводом; 1 — первичная обмотка; 2 — магнитопровод; 3 — вторичная обмотка; б) эффект дробной отмотки добавлением витка с другим сопротивлением; в) эффект дробной отмотки с частичным охватом последним витком магнитопровода

Если число витков вторичной обмотки невелико, то повысить эффективность витковой коррекции можно отмотыванием не целого, а дробного числа витков (рис. 2.12, а). Это возможно, если выполнять вторичную обмотку двумя, тремя или четырьмя параллельными проводами.

На рис. 2.12, б изображен способ получения дробного числа витков без расщепления провода. Достигается это путем добавления к основ-

ной вторичной обмотке  $Z$  витка из провода другого материала и сечения  $R$ . Активное сопротивление витка подбирается таким образом, чтобы через него проходила необходимая часть (половина, треть, четверть и т. д. —  $n$ ) всего вторичного тока.

Эффект дробной отмотки витка можно также получить наматыванием последнего витка обмотки на часть магнитопровода. При этом последний виток пронизывается лишь частью магнитного потока (рис. 2.12, в).

**Компенсационные методы.** Основаны на зависимости магнитной проницаемости от магнитной индукции. Можно сказать, что чем меньше проницаемость, тем больше погрешность.

На рис. 2.13 изображены кривая намагничивания и зависимость абсолютной магнитной проницаемости от индукции, где  $a, b$  — зоны нелинейного изменения индукции, а  $c$  — линейного.

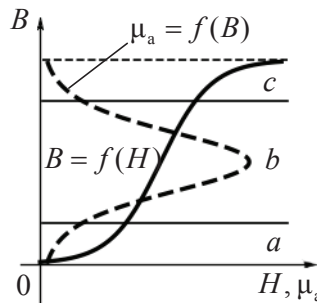


Рис. 2.13. Зависимости  $B = f(H)$  и  $\mu_a = f(B)$

Компенсацию погрешностей можно выполнить следующими способами: спрямлением кривой намагничивания; подмагничиванием магнитопровода; созданием нулевого потока; перераспределением потоков рассеяния.

**Спрявление кривой намагничивания.** На рис. 2.14 изображена реализация этого метода. При малом токе  $I_1$  весь поток сосредоточен в зоне I, поэтому витки I практически не сцепляются с ним. Действует это как витковая коррекция, т. е. погрешность в области малых токов уменьшается.

При большом токе  $I_1$  поток перераспределяется в зонах I и II так, что в зоне I из-за подмагничивающего действия потока  $\Phi_3$  индукция приближается к насыщению (зона c на рис. 2.13), а в зоне II, наобо-

рот, держится на среднем уровне из-за размагничивающего действия потока  $\Phi_3$  (зона  $b$  на рис. 2.13). Поскольку часть намагничивающего потока  $\Phi_0$  сцепляется с корректирующими витками, что увеличивает коэффициент трансформации и, следовательно, увеличивает токовую погрешность. Короткозамкнутый виток  $3$  уменьшает угловую погрешность, поскольку ток в нем сонаправлен с МДС, но увеличивает токовую погрешность.

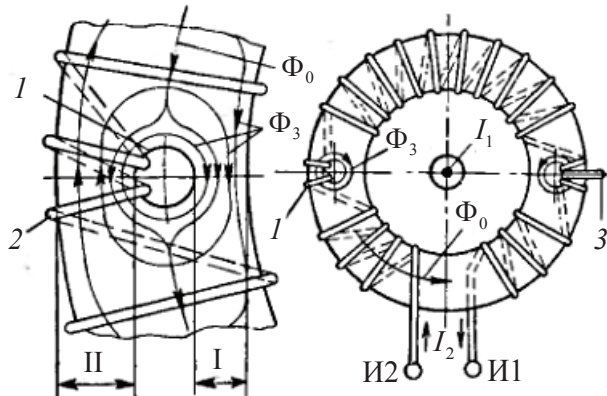


Рис. 2.14. Схема метода спрямления при компенсации погрешности<sup>8</sup>  
(И1, И2 — выводы вторичной обмотки)

**Подмагничивание магнитопровода.** На рис. 2.15 изображены методы компенсации путем подмагничивания. Метод, изображенный на рис. 2.15, *а*, предполагает использование отдельного источника энергии. Дополнительные обмотки  $3$ , создающие потоки  $\Phi_3$ , включены встречно для устранения их влияния на первичную обмотку (с током  $I_1$ ) и вторичную обмотку  $4$ , создающую поток  $\Phi_2$ . Дополнительные обмотки подмагничивают магнитопроводы  $1$  и  $2$  так, что МДС намагничивания в них больше, чем у обычного трансформатора. Это приводит к увеличению индукции до такого значения, при котором проницаемость максимальна, что уменьшает погрешность.

Вместо отдельного источника можно использовать вспомогательный трансформатор тока с вторичной обмоткой  $5$  и магнитопроводом  $б$  (рис. 2.15, *б*). Компенсация противонамагничиванием (рис. 2.15, *в*)

<sup>8</sup> Трансформаторы тока / В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель [и др.]. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат, 1989. С. 49.

не требует отдельных источников, где 7 — вторичная основная и подмагничивающая обмотка, 8 — дополнительная обмотка.

При этом подмагничивающий поток создается частью вторичной обмотки, которая включена согласно основной обмотке, но охватывает только один магнитопровод.

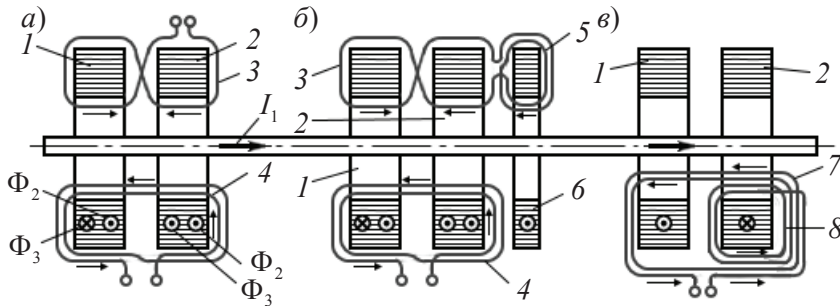


Рис. 2.15. Схемы компенсации с подмагничиванием<sup>9</sup>:

*a* — с дополнительной обмоткой и отдельным источником; *б* — с дополнительной обмоткой и вспомогательным трансформатором тока; *в* — без дополнительного источника и с компенсацией противонамагничиванием: 1, 2 — магнитопроводы; 3, 8 — дополнительные обмотки; 4 — первичная и вторичная обмотки; 5, 6 — вспомогательный трансформатор тока; 7 — вторичная основная и подмагничивающая обмотка

**Создание нулевого потока.** На рис. 2.16 изображен метод компенсации методом нулевого потока. Магнитопровод состоит из двух идентичных частей, которые охватываются вторичной обмоткой. Первый магнитопровод охватывается витками  $w_2$ , второй — витками  $w_3$  вторичной обмотки и витками  $w_4$  компенсационной обмотки. Обмотка  $w_2 + w_3$  подключена к нагрузке  $z_{2н}$ . Обмотка  $w_4$  подключена к регулируемому сопротивлению  $z_3$ . Сечения проводников одинаковы, число витков подобрано так, что  $0,5w_2 = w_3 = w_4$ . Если токи  $I_2 = I_3$  равны, то компенсации не будет, поскольку магнитопровод 1 и 2 будут намагничиваться одинаковыми МДС:  $I_2w_2 = I_2w_3 + I_3w_4 = I_2(w_3 + w_4)$ . Увеличивая  $z_3$ , мы уменьшаем  $I_3$ , что позволяет уменьшить и МДС намагничивания:  $I_2w_3 + I_3w_4$ . Таким образом, увеличивается намаг-

<sup>9</sup> Трансформаторы тока / В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель [и др.]. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1989. С. 50.

ничающий поток во втором магнитопроводе, при этом увеличивается ЭДС на обмотке  $w_3$ . Увеличение индукции в магнитопроводе 2 разгрузит вторичную обмотку и ток в ней вырастет. Это означает уменьшение  $\Phi_0$  в магнитопроводе 1. Увеличением  $z_3$  можно добиться полного размагничивания магнитопровода 1  $\Phi_0 = 0$ , т. е.  $I_1 w_1 = I_2 w_2$  — погрешность равна нулю. Метод используется в лабораторных трансформаторах тока.

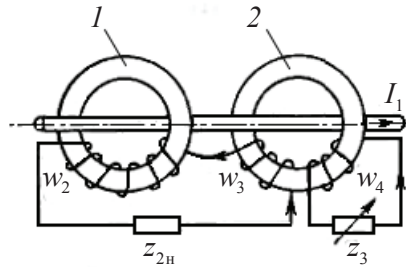


Рис. 2.16. Схема компенсации методом нулевого потока<sup>10</sup>:  
1, 2 — магнитопроводы

**Перераспределение потоков рассеяния.** На рис. 2.17 изображен метод компенсации перераспределением потоков. Вторичная обмотка выполняется составной: состоит из двух обмоток, включенных последовательно и согласованно 1, 3. Это увеличивает поток рассеяния, который они создают. Между сердечниками располагается магнитный шунт 2. Подбирая его параметры, можно регулировать поток рассеяния  $\Phi_s$ . Шунт подобран так, что при малых токах сопротивление участка с потоком  $\Phi_{s1}$  меньше, чем участка с потоком  $\Phi_{s2}$ , поэтому большая часть потока замыкается через шунт, т. е. обмотка  $w'_2$  будет сцепляться с малой частью намагничивающего потока  $\Phi_0$ , что равносильно отмотке витков и уменьшению погрешности. При номинальном токе в первичной обмотке 4 шунт насыщается и компенсация перестает работать.

<sup>10</sup> Трансформаторы тока / В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель [и др.]. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1989. С. 55.

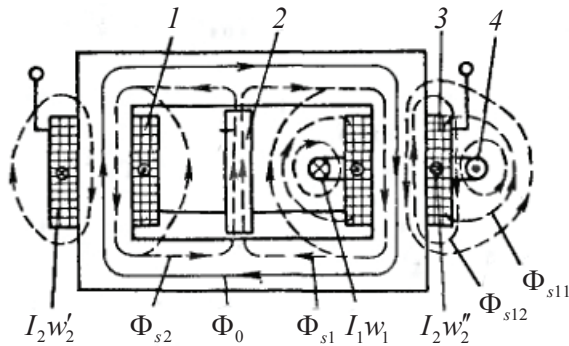


Рис. 2.17. Схема компенсации погрешности потоками рассеяния<sup>11</sup>:  
1, 2 — вторичная обмотка; 3 — магнитный шунт; 4 — первичная обмотка

### 2.3.3. Конструкции трансформаторов тока

Основные элементы электромагнитного трансформатора тока: первичная обмотка 1, магнитопроводы 2, вторичная обмотка 3, изоляционные конструкции 4, опорно-крепежная арматура 5.

На рис. 2.18 изображены представители трансформаторов тока с разными типами внутренней изоляции.

## 2.4. Комплектные распределительные устройства

Комплектные распределительные устройства (КРУ) — это комплекс электрических аппаратов: коммутационных, защитных и измерительных, а также системы управления ими, помещенных в единый корпус, поставляемый в готовом виде. Если основной изоляционной средой является элегаз, то такие КРУ называют КРУЭ.

КРУ — это важная и ответственная часть любой системы электропитания, которая во многом определяет ее надежность. КРУ являются составной частью распределительных устройств (РУ) электростанций и подстанций энергосистем, преобразовательных подстанций, подстанций промышленных предприятий и т. д.

<sup>11</sup> Трансформаторы тока / В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель [и др.]. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1989. С. 54.

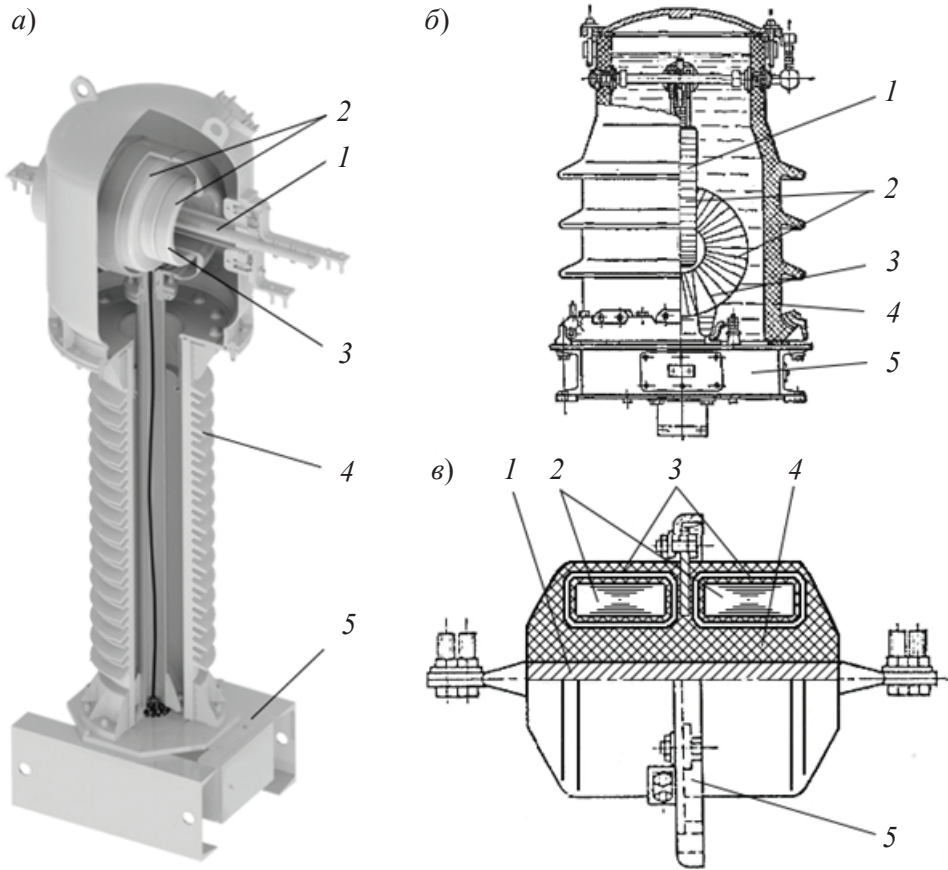


Рис. 2.18. Трансформаторы тока:

а) 110 кВ с элегазовой изоляцией<sup>12</sup>; б) 35 кВ с масляной изоляцией<sup>13</sup>; в) 10 кВ с литой изоляцией<sup>14</sup>; 1 — первичная обмотка; 2 — магнитопродовы; 3 — вторичная обмотка; 4 — изоляционные конструкции; 5 — опорно-крепежная арматура

Чем ниже уровень напряжения в системе, тем больше число и разнообразие задействованного в ней электрооборудования. Все электрооборудование требует электропитание и защиту от аварийных режимов. Для ускорения процесса ввода новых мощностей, повышения

<sup>12</sup> Трансформаторы тока элегазовые ТГФМ-110 // ЭТК «Оникс» : [сайт]. URL: <http://www.etk-oniks.ru/Klass-napryazheniya-TT-110kV-i-vyshe/TGFM-110.html> (дата обращения: 23.09.19).

<sup>13</sup> Чунихин А. А., Жаворонков М. А. Аппараты высокого напряжения : учеб. пособие. М. : Энергоатомиздат, 1985. С. 291.

<sup>14</sup> Там же. С. 289.

безопасности и удобства работы и применяются готовые комплектные распределительные устройства, для ведения в эксплуатацию которых в основном требуется только настройка.

В настоящее время КРУ пользуется устойчивым спросом по трем причинам:

- 1) необходимость замены морально и технически устаревших ячеек;
- 2) ввод новых пунктов производства и распределения электроэнергии;
- 3) рост потребляемой мощности и замена текущего оборудования на новое с более высокими номинальными данными.

Все комплектные распределительные устройства можно классифицировать:

1) по конструктивному исполнению основного коммутационного аппарата: выдвигного (выкатного) типа (основной коммутационный аппарат размещен на тележке); стационарные (основной коммутационный аппарат неподвижно размещен в корпусе шкафа);

2) по типу основного коммутационного аппарата: вакуумный, маломасляный, элегазовый;

3) по условиям окружающей среды: внутренней или наружной установки;

4) по климатическим условиям: для умеренного, тропического или холодного климата;

5) по условиям обслуживания: одностороннего обслуживания (ставятся вплотную к стене); двухстороннего обслуживания (на определенном расстоянии от стены, которое образует технический проход);

6) по расположению сборных шин: верхнее, нижнее;

7) по конструкции линейного вывода: с кабельными, с воздушными выводами;

8) по роду оперативного тока: на постоянном токе, на переменном токе;

9) по условиям эксплуатации: пылезащищенные, герметичные, взрывозащищенные, влагозащищенные.

Комплектные устройства подразделяются также по номинальному напряжению, номинальному току, по схеме главных и вспомогательных соединений и по расположению выкатного элемента (наличие/отсутствие).

### 2.4.1. Устройство КРУ

Тип исполнения камер КРУ определяется номинальными параметрами входящей в них аппаратуры и схемой главных цепей. По согласованию с заводом-изготовителем допускается изготовление шкафов КРУ по схемам заказчика. На рис. 2.19 изображена схема соединений и общий вид КРУ, где Р — разъединитель, ТТ — трансформатор тока, В — высоковольтный выключатель.

Как правило, шкаф КРУ разделен на несколько отсеков. Такое разделение по функционально изолированным друг от друга отсекам служит для безопасности, т. к. обычно отсеки разделяются несгораемыми перегородками, содержат оптоволоконную систему дуговой защиты и аварийные клапаны сброса давления.

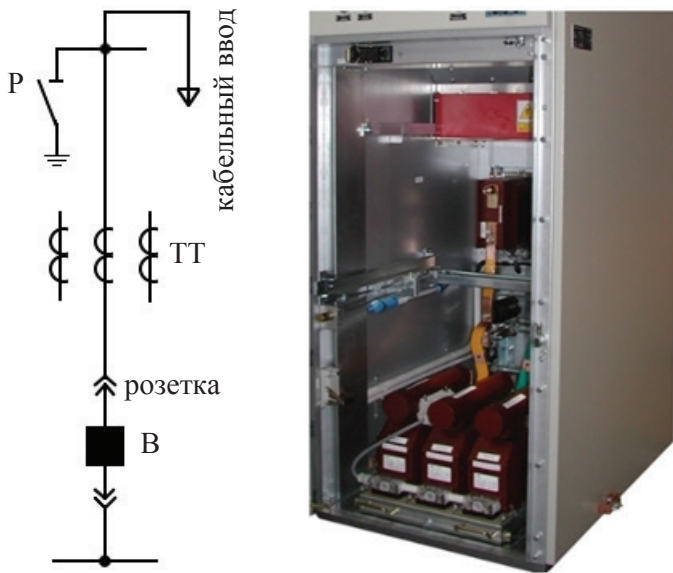


Рис. 2.19. Однолинейная схема КРУ и общий вид (без выключателя)<sup>15</sup>

На рис. 2.20 изображено внутреннее устройство КРУ.

1. В отсеке сборных шин располагаются силовые шины, соединяющие шкафы секции РУ между собой и системой электроснабжения.

<sup>15</sup> КРУ «Классика» D-12PT // KRU10.RU : [сайт]. URL: <https://kru10.ru/equipment/d12pt/> (дата обращения: 23.09.19).

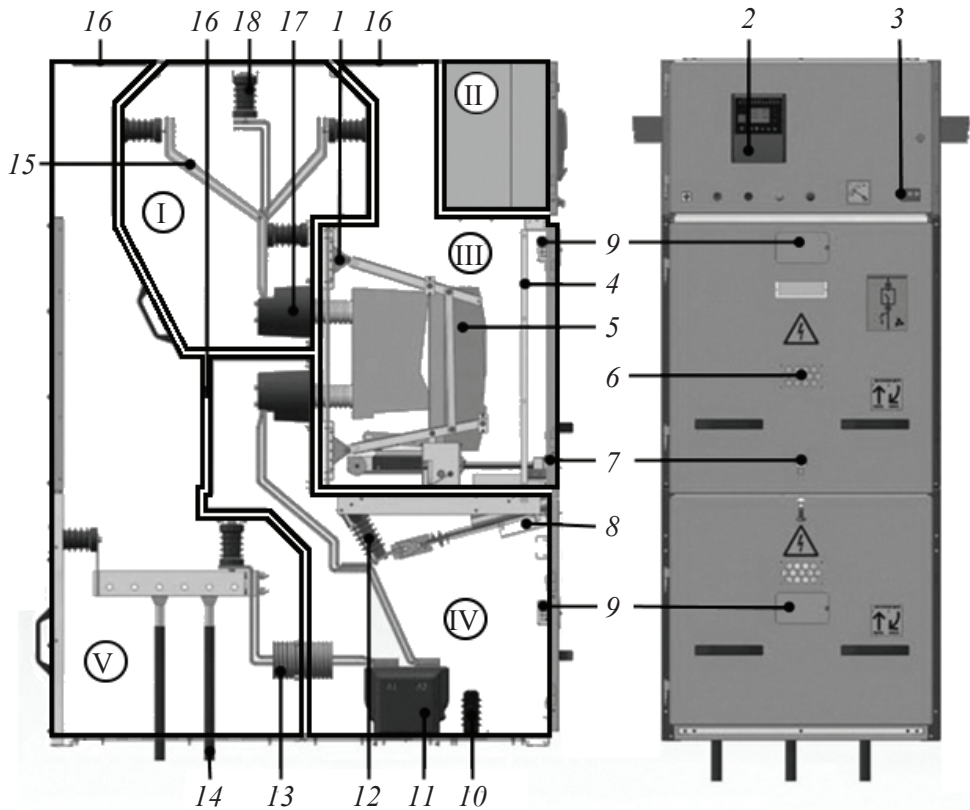


Рис. 2.20. Внутреннее устройство КРУ и его деление на отсеки<sup>16</sup>:

I — отсек сборных шин; II — отсек РЗиА (вторичных цепей); III — отсек выключателя;  
IV — высоковольтный отсек; V — отсек кабельных присоединений:

1 — шторки блокировки доступа к силовым контактам; 2 — РЗиА; 3 — индикатор напряжения; 4 — шина заземления; 5 — высоковольтный выключатель; 6 — смотровое окно;  
7 — механизм выкатного элемента; 8 — заземлитель; 9 — лампа освещения;  
10 — ограничитель перенапряжений; 11 — трансформатор тока; 12 — емкостный делитель;  
13 — проходной изолятор; 14 — кабельное присоединение; 15 — сборная шина;  
16 — клапан сброса давления при КЗ; 17 — втычной розеточный контакт;  
18 — опорный изолятор

II. В релейном отсеке располагается низковольтное оборудование: устройства релейной защиты и автоматики, переключатели, рубильники. На двери релейного отсека, как правило, располагаются свето-

<sup>16</sup> БЭМП. Комплектное распределительное устройство КРУ-70 «Клен» // МК «Линейщик» : [сайт]. URL: <http://lineischik.ru/wp-content/uploads/2016/03/Каталог-КРУ-70-6-10 кВ-Клён.pdf> (дата обращения: 23.09.19).

сигнальная арматура, устройства учета и измерения электроэнергии, элементы управления ячейкой.

III. В отсеке выключателя располагается силовой выключатель или другое высоковольтное оборудование (разъединительные контакты, предохранители, ТН). Чаще всего в КРУ это оборудование размещается на выкатном или выдвижном элементе.

IV. Высоковольтный отсек служит для размещения прочего высоковольтного оборудования КРУ: измерительных трансформаторов тока, трансформаторов напряжения, ОПН и т. д.

V. Отсек кабельных присоединений содержит кабельную разделку для соединения КРУ с системой электроснабжения.

В случае возникновения дуги внутри отсеков КРУ сброс избыточного давления и продуктов горения происходит в окружающую среду через разгрузочные клапаны в корпусе ячейки.

Клапаны сброса избыточного давления всех отсеков КРУ могут быть оборудованы концевыми выключателями для сигнализации системе защиты в случае короткого замыкания в любом из отсеков. Независимо от наличия концевых выключателей предусмотрена возможность установки оптической дуговой защиты, реагирующей на световой поток от дугового разряда.

КРУ может содержать нагревательные элементы, необходимые для предупреждения образования конденсата и обеспечения нормальной работы электронных компонентов шкафа КРУ.

Блокировка КРУ — устройство КРУ, предназначенное для предотвращения или ограничения выполнения операций одними частями КРУ при определенных состояниях или положениях других частей КРУ в целях предупреждения возникновения в нем недопустимых состояний или исключения доступа к его частям, находящимся под напряжением.

### 2.4.2. Конструкции КРУ

На рис. 2.21 изображены примеры выкатных элементов КРУ. Для удобства монтажа, ремонта и обслуживания высоковольтного выключателя в КРУ его располагают на специальном подвижном элементе — выкатной тележке.

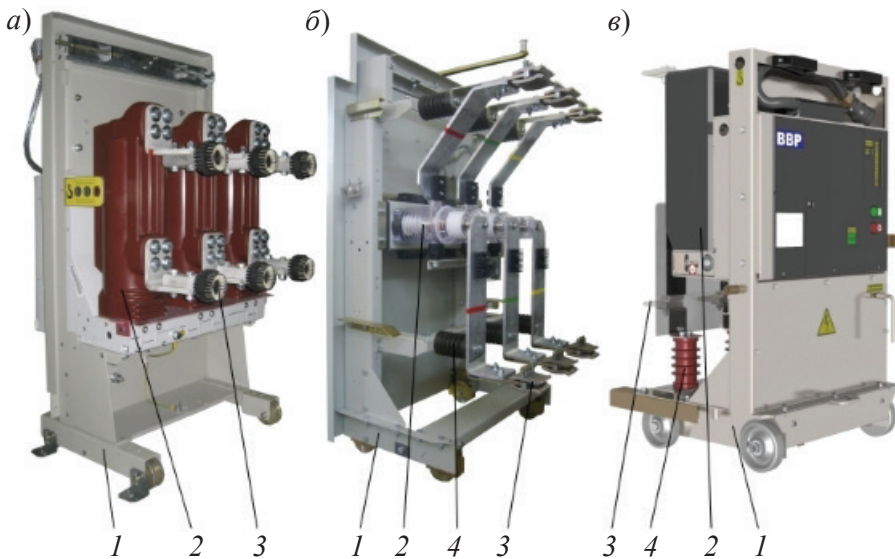


Рис. 2.21. Выкатные элементы КРУ:

а) ВР — 6 кВ<sup>17</sup>; б) ВВ-TEL — 10 кВ<sup>18</sup>; в) ВВР — 10 кВ<sup>19</sup>:

1 — тележка; 2 — высоковольтный выключатель; 3 — втычной контакт; 4 — опорная изоляция

Подключение выключателя в токоведущую систему КРУ может осуществляться через контакты втычного типа или жестким креплением к шинам.

На рис. 2.22 можно увидеть реализацию ячеек с выдвигным и выкатным исполнением выключателей.

При использовании вакуумных выключателей в КРУ для наиболее выгодного расположения аппарата с точки зрения занимаемого места можно воспользоваться одним из их преимуществ: произвольное расположение выключателя в пространстве.

<sup>17</sup> Выкатные элементы К-47, К-49, К-59, К-104, КМ-1 // ГК «РУЭЛТА». Брянский электротехнический завод: [сайт]. URL: [http://bryansky-etz.ruelta.ru/produkcija/vykatnye\\_elementy\\_ve1/k-47\\_k-49\\_k-59\\_k-104\\_km-1f\\_krun-6\\_10\\_km-1\\_km-1m/](http://bryansky-etz.ruelta.ru/produkcija/vykatnye_elementy_ve1/k-47_k-49_k-59_k-104_km-1f_krun-6_10_km-1_km-1m/) (дата обращения: 23.09.19).

<sup>18</sup> Выкатные элементы К-12/К-26 // DME ENERGY: [сайт]. URL: <http://dme.by/category/default/detail?id=21> (дата обращения: 23.09.19).

<sup>19</sup> Tiu.ru: [сайт]. URL: <https://tiu.ru/p12869557-vykatnoj-element-vbch.html> (дата обращения: 23.09.19).

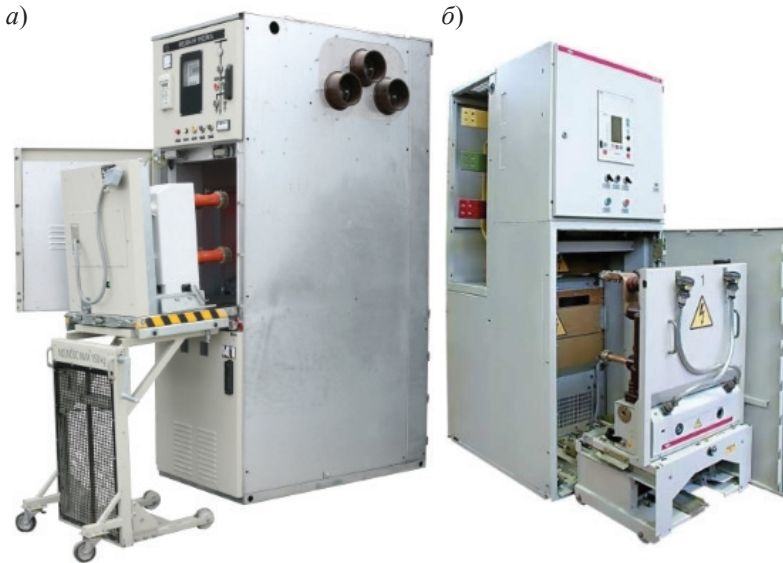


Рис. 2.22. Ячейки КРУ:

а) с выдвигным размещением выключателя<sup>20</sup>; б) с выкатным размещением выключателя<sup>21</sup>

Основные области применения КРУЭ определяются общими экономическими соображениями, это: крупные города из-за плотности застройки и большой стоимости земли; труднодоступные районы; объекты с сильно загрязненной атмосферой; береговые районы с солевыми туманами.

## 2.5. Механизмы высоковольтных выключателей

Механическая система выключателей предназначена для перемещения подвижных контактных частей при включении и отключении с заданной скоростью на определенном ходе. Она включает в себя элек-

<sup>20</sup> КРУ серии D12 PB // Электрические сети : [сайт]. URL: <https://leg.co.ua/info/podstancii/d12-rv-kru.html> (дата обращения: 23.09.19).

<sup>21</sup> Комплексные распределительные устройства серии Вертикаль: КСО или КРУ? Испытания на локализационную способность // Таврида Электрик Украина : [сайт]. URL: [http://tavrida-ua.com/articles/komplektnye\\_raspredelitelnye\\_ustroystva\\_serii\\_vertikal\\_kso\\_ili\\_kru\\_ispytaniya\\_na\\_lokalizatsionnuyu\\_sposobnost.html](http://tavrida-ua.com/articles/komplektnye_raspredelitelnye_ustroystva_serii_vertikal_kso_ili_kru_ispytaniya_na_lokalizatsionnuyu_sposobnost.html) (дата обращения: 23.09.19).

тромагнитный или пневматический привод с механизмом свободного расцепления, передаточный механизм, выпрямляющий механизм, отключающие пружины и буферные устройства. В данном разделе описаны характеристики выпрямляющих механизмов, которые преобразуют вращательное движение вала выключателя в поступательное движение подвижных контактов.

Различают три группы выпрямляющих механизмов:

- 1) механизмы с прямолинейными направляющими;
- 2) механизмы без прямолинейных направляющих;
- 3) механизмы смешанного типа.

Эти механизмы, как правило, выполняются рычажно-шарнирными.

Конструкции выпрямляющих механизмов характеризуются длиной хода подвижных частей, углом поворота ведущего вала и наличием «мертвого» положения.

Значение «мертвого» положения видно на примере четырехзвенного шарнирно-рычажного механизма, представленного на рис. 2.23 и 2.24.

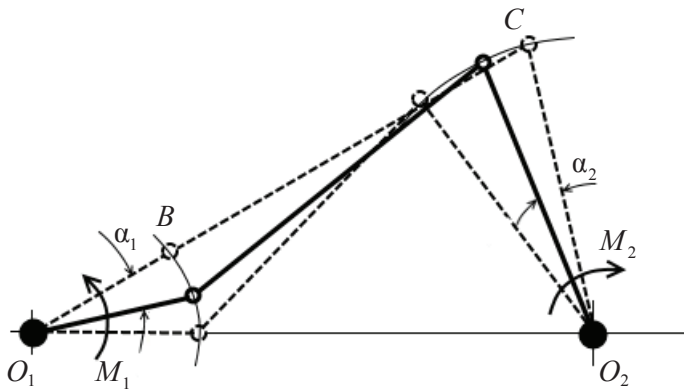


Рис. 2.23. Четырехзвенный механизм

Механизм состоит из двух рычагов, вращающихся вокруг неподвижных центров  $O_1$  и  $O_2$ . Концы рычагов соединены тягой  $BC$ . Рычаг  $O_1B$  является ведущим, а рычаг  $O_2C$  — ведомым. «Мертвым» положением механизма является положение, изображенное на рис. 2.24 штрихпунктиром, при нем оси шарниров  $O_1$ ,  $B$  и  $C$  находятся на одной прямой. Если не учитывать трение, то из условия равенства мгновенных работ на ведущем и ведомом валах для любого положения четырехзвенника момент  $M_1$  определяется соотношением

$$M_1 = M_2 \frac{d\alpha_1}{d\alpha_2},$$

где  $M_1$  и  $M_2$  — моменты вращения соответствующих валов,  $d\alpha_1$  и  $d\alpha_2$  — бесконечно малые углы поворота при перемещении рычагов  $O_1B$  и  $O_2C$ .

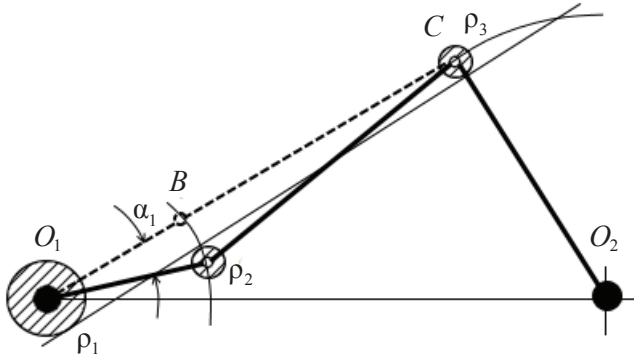


Рис. 2.24. Графическое определение «мертвой» зоны

Для уменьшения момента на ведущем валу при одновременной необходимости получения большого момента на ведомом валу производная угла поворота должна быть как можно меньше. Как видно из рис. 2.24, в положении механизма, близком к «мертвому», значение  $d\alpha_1/d\alpha_2$  резко уменьшается, а в «мертвом» положении стремится к нулю. Поэтому в аппаратах, имеющих на определенных участках работы возрастание усилий, преодолеваемых приводом (например, в положении, близком к включенному, когда имеет место максимальное сжатие контактных и отключающих пружин), механизмы на этих участках стремятся приблизить к «мертвому» положению.

Другой важной особенностью «мертвых» положений или близких к ним является то, что большим изменениям угла поворота ведущего вала при этом соответствуют малые изменения угла поворота ведомого вала. В связи с этим положение ведомого органа в конце хода относительно мало зависит от неточностей положения ведущего рычага, то есть аппарат имеет относительную нечувствительность к возможным технологическим погрешностям. В «мертвом» положении звеньев механизма любой момент  $M_2$ , приложенный к ведомому валу, не может вызвать его движения, так как момент ведущего вала  $M_0 = 0$ , и ведомый орган механизма оказывается запертым. Это обстоятель-

ство используется в различных механизмах аппаратов, однако доводить механизм до «мертвого» положения не всегда целесообразно, так как при этом затрудняется отключение аппарата.

Необходимо отметить, что трение, возникающее при вращении вала в опоре, расширяет понятие «мертвой» точки до понятия «мертвой» зоны, величина которой определяется радиусом круга трения  $\rho = r \sin \varphi$ , где  $r$  — радиус вала,  $\varphi$  — угол трения. Вследствие малой величины углов  $\varphi$  можно принять в общем случае  $\rho = r \operatorname{tg} \varphi = r f_{\text{тр}}$ , где  $f_{\text{тр}}$  — коэффициент трения. «Мертвая» зона определяется углом  $\alpha$ , графическое определение которого дано на рис. 2.24.

### Контрольные вопросы

---

---

1. За счет чего в вакууме горит дуга, если вакуум — это отсутствие среды?
2. Что такое токовый срез и чем он опасен при коммутациях?
3. Как бороться со срезами тока?
4. Как удержать дугу в диффузном виде при коммутациях?
5. Какие функции выполняют экраны внутри вакуумной камеры?
6. В чем состоит преимущество элегаза над другими дугогасительными средами?
7. В чем состоят основы гашения дуги в элегазовой среде?
8. Перечислите основные разновидности ДУ элегазовых аппаратов.
9. Каких видов бывают конструкции элегазовых выключателей?
10. В чем состоит назначение измерительных трансформаторов тока?
11. Как осуществить приведение величин первичной стороны трансформатора к вторичной?
12. Что обозначают сосредоточенные элементы схемы замещения трансформатора тока?
13. Какие бывают виды погрешностей трансформатора тока?
14. Как бороться с токовыми погрешностями?
15. В чем состоит назначение комплектных распределительных устройств?

16. Для чего внутренний объем КРУ делят на изолированные отсеки?
17. К чему может привести КЗ в отсеке КРУ и как предотвратить это?
18. Для чего и какие виды блокировок существуют в КРУ?
19. Что такое «мертвая» зона в механизме выключателя?
20. Какую функцию выполняют выпрямляющие механизмы?

## Глава 3.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

---

---

### 3.1. Исследование характеристик теплового нагрева токоведущей системы высоковольтного коммутационного аппарата

---

---

**Ц**ель исследования: изучение температурного режима высоковольтного выключателя и методики определения температуры различных его частей.

#### **Предмет и алгоритм исследования**

Объектом исследования является полюс маломасляного выключателя подвешенного типа с номинальным напряжением 10 кВ, номинальным током 1600 А и номинальным током отключения 31,5 кА. Контактная система с токовым контуром, дугогасительное устройство и механизм, преобразующий вращательное движение рычагов управления в поступательное движение контактов, смонтированы в виде единого блока полюса. В продолжительном режиме нагрузки аппарата рост температуры до установившегося состояния может продолжаться несколько часов (например, ВМП-10 до 6 ч). Для определения основных параметров кривой нагрева — постоянной времени  $T_t$  и установившегося перегрева  $\tau_y$  — возможно ограничиться измерением нескольких точек кривой нагрева в ее начальной части. Считая, что процесс нагрева описывается уравнением

$$\tau(t) = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_t}} \right),$$

можно получить  $\tau = \tau_y - T_t \cdot d\tau/dt$ , что в координатах  $\tau$  и  $d\tau/dt$  представляет собой прямую линию, отсекающую на осях отрезки  $\tau_y$  и  $\tau_y/T_t$ . Методика построения экстраполяционной прямой по нескольким точ-

кам начальной части кривой нагрева приведено на рис. 3.1; построением определяются параметры  $\tau$  и  $d\tau/dt$ , а по последнему и  $T_T$ .

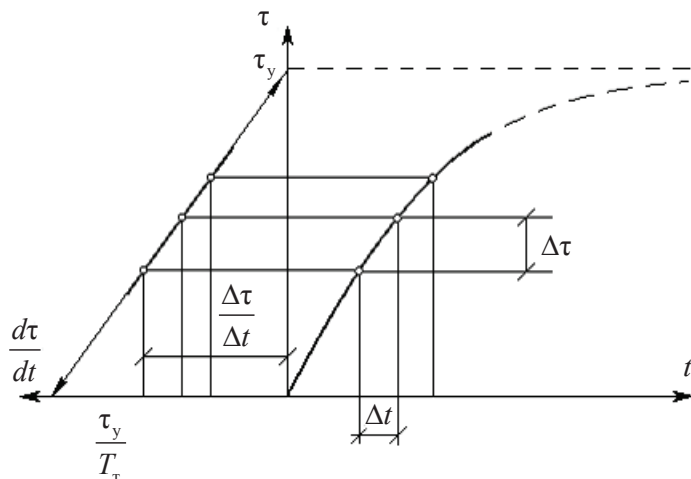


Рис. 3.1. Кривая частичного нагрева

Электрическая схема установки со схематическим эскизом полюса выключателя и указанием мест закрепления термодпар приведена на рис. 3.2, где Т1 — ЛАТР, Т2 — нагрузочный трансформатор, РА — амперметр, ТА — трансформатор тока. Места присоединения термодпар: 1 — трансформаторное масло возле свечи подвижного контакта, 2 — воздух внутри полюса возле подвижного контакта, 3 — часть подвижного контакта, находящаяся в воздухе, 4 — часть подвижного контакта в среде трансформаторного масла, 5 — розеточный контакт возле зоны контактного перехода, 6 — часть подвижного контакта, охватываемая дугогасительным устройством, 7 — трансформаторное масло возле розетки, 8 — часть подвижного контакта возле зоны контактного перехода, 9 — внешний металлический корпус со стороны роликового токосъема, 10 — внешний металлический корпус со стороны розеточного контакта.

В установке используются термодпары типа хромель-копель с достаточно высокой чувствительностью ( $E_T = 0,06\tau$ ) и линейностью характеристики, обеспечивающие необходимый диапазон измеряемых температур (до  $600^\circ\text{C}$ ). «Горячие» спаи термодпар углублены в тело контролируемых деталей на  $2 \div 4$  мм и зачеканены. При измерении каждый из них может поочередно соединяться галетным переключателем

с единственным «холодным» спаем, который помещается в заполненный трансформаторным маслом сосуд, расположенный на достаточном удалении от нагреваемых частей аппарата. Этим обеспечивается постоянство опорной температуры, равной температуре воздуха в помещении (последняя должна непрерывно контролироваться градусником). При градуировке измерительной части «холодный» спай помещается в нагреваемый сосуд с водой (обращается в нагреваемый), а опорную функцию выполняет один из спаев в «холодном» выключателе.

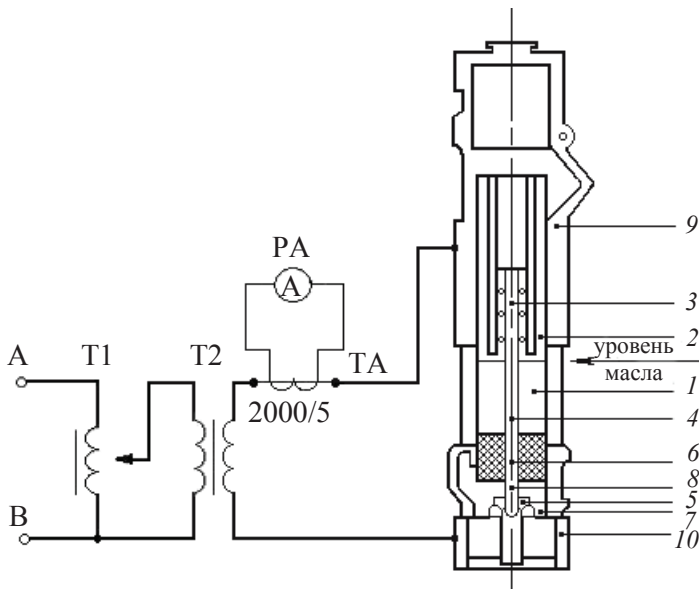


Рис. 3.2. Схема испытательной установки:

1, 7 — трансформаторное масло; 2 — воздух; 3, 4, 6, 8 — подвижный контакт;  
5 — розеточный контакт; 9, 10 — внешний металлический корпус

Токовый контур полюса выключателя — нижняя крышка полюса, розеточный контакт, подвижный контакт (свеча), роликовое токосъемное устройство, средний вывод полюса — мощным шинопроводом включен в цепь многоамперного регулируемого источника предельно низкого напряжения (менее 10 В). Полное электрическое сопротивление токоведущего контура полюса с учетом сопротивления соединительной медной шины составляет приблизительно 0,35 мОм.

Все подвижные части выключателя закреплены во включенном положении; выключатель отключаться не может. Установка допускает

лишь изучение тепловых процессов, обусловленных выделением джоулева тепла в замкнутом токовом контуре. На эти процессы заметное влияние оказывает дугогасительная камера продольно-поперечного дутья, представляющая изоляционную конструкцию, охватывающую свечу подвижного контакта и трансформаторное масло, используемое в качестве дугогасящей среды.

### **Задание**

1. Ознакомиться с расположением элементов установки на стенде; собрать электрическую схему.

2. Не включая питание силовой части установки, провести градуировку термопар (до температуры  $80 \div 90$  °С). Построить график  $E_T = f(\tau)$ , нанести на него прямую  $E_T = 0,06\tau$ , сравнить результаты.

3. Снять и построить кривые нагрева всех деталей выключателя, в которых установлены термопары. Замеры производить через 20 мин не менее шести раз.

Величина тока нагрузки принимается по указанию руководителя в пределах  $1000 \div 2000$  А.

4. Для всех последовательных точек контура тока построить кривые нагрева  $\tau = f(t)$ . Определить установившиеся значения перегрева  $\tau_y$  и постоянные времени нагрева  $T_T$  методом экстраполяции и  $\tau_y$ . Построить график  $\tau_y = f(\ell)$  по длине полюса. Сравнить полученные значения с нормами ГОСТ 8024–84.

5. По формуле Ньютона для теплоотдачи определить среднее значение  $\tau$  для наружной поверхности. Полученное значение сравнить с экспериментальными данными для  $\tau_y$ .

### **Контрольные вопросы**

1. Какое влияние на нагрев узлов аппарата оказывает электрическая изоляция? Как учитывается это влияние в расчетах?
2. В чем суть метода экстраполяции оценки параметров кривой нагрева?
3. Какие физические процессы не учитывает формула Ньютона в применении к рассматриваемому случаю многоамперного выключателя?

## 3.2. Исследование характеристик механизмов коммутационных аппаратов

Цель исследования: изучение конструкции и кинематических характеристик выпрямляющих механизмов высоковольтных выключателей.

### Предмет и алгоритм исследования

Объектами исследования являются механизмы двух типов.

1. Приближенное эллиптическое прямиле (рис. 3.3).

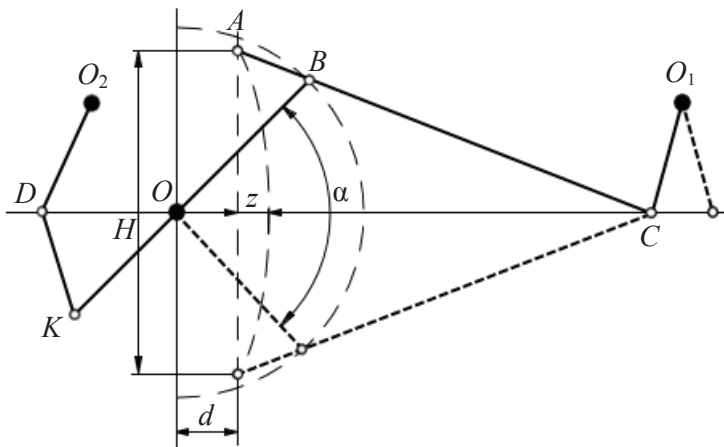


Рис. 3.3. Приближенное эллиптическое прямиле

Механизм состоит из коромысла  $AC$ , рычага  $KOB$  и подвеса  $O_1C$ . «Мертвая» точка создается с помощью дополнительного вала  $O_2$  и рычага  $O_2D$ . Точка  $A$  (место подвеса штанги с подвижными контактами) движется в таком прямиле не по прямой, а несколько отклоняясь от нее на величину  $z$ . Это отклонение незначительно и составляет  $1 \div 2$  мм. Полный угол поворота рычага  $OB\alpha \approx 60^\circ$ . Дезаксиал  $d$  невелик, он определяется из конструктивных соображений.

Приближенное эллиптическое прямиле имеет более простую по сравнению с другими видами прямиле конструкцию, повышенную механическую прочность и поэтому широко применяется в масляных баковых выключателях на напряжения  $35 \div 220$  кВ.

2. Выпрямляющий механизм смешанного типа (рис. 3.4).

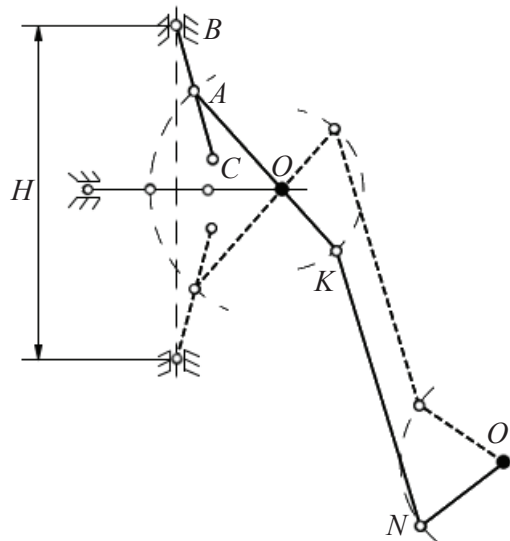


Рис. 3.4. Выпрямляющий механизм смешанного типа

Механизм состоит из рычагов  $AO$ ,  $BAC$ , снабжен вертикальными направляющими и ловителями — горизонтальными направляющими. Механизм выполнен по принципу совместного использования с направляющими типа «коромысло с серьгой» и прямилы типа «приближенное эллиптическое прямиле с горизонтальными направляющими». На рисунке сплошной линией изображено верхнее крайнее положение механизма. При повороте рычага  $OA$  против часовой стрелки на угол  $\alpha = 0 \div 50^\circ$  механизм будет работать как коромысло с серьгой. При подходе к среднему положению, когда конец  $C$  рычага  $BAC$  входит в горизонтальные направляющие, механизм начинает работать как приближенное эллиптическое прямиле. При подходе к крайнему нижнему положению, когда угол  $\alpha = 110 \div 160^\circ$ , механизм опять начинает работать как коромысло с серьгой. Преимущества такого механизма: значительно больший ход подвижных контактов при одной и той же длине ведущего рычага  $OA$ , чем в приближенном эллиптическом прямиле, наличие «мертвой» точки в самом механизме в двух его крайних положениях, компактность всего устройства. Такие механизмы находят применение в малообъемных масляных выключателях. При выполнении лабораторной работы должны быть исследованы основные механические характеристики выпрямляющих механизмов.

*Кинематическая характеристика* — зависимость величины хода  $H$  подвижных контактов от угла поворота главного вала  $\alpha$ , то есть  $H = f(\alpha)$ .

По экспериментально полученной кинематической характеристике можно графически определить  $dH/d\alpha = f(H)$ , имеющую важное значение для определения работоспособности механизма, так как

$$M_0 = \frac{F_n}{\eta} \cdot \frac{dH}{d\alpha},$$

где  $F_n$  — сила, передаваемая на подвижные контакты;  $\eta$  — КПД механизма;  $M_0$  — значение вращающего момента на валу выключателя.

*Статическая характеристика* — зависимость силы сопротивления движению  $F_c$  или момента  $M_{oc}$  на главном валу выключателя от хода или угла поворота вала в статическом режиме, то есть

$$F_c = f(H, \alpha), \quad M_{oc} = f(H, \alpha).$$

Статические характеристики могут определяться при включении и отключении выключателя. В первом случае определяются силы сопротивления включению, а во втором, при медленном отключении, — удерживающие выключатель, то есть препятствующие его отключению.

Определение статической характеристики выпрямляющего механизма возможно при приложении в точке подвеса траверсы постоянной силы сопротивления включению. Полученные экспериментально статическая и кинематическая характеристики позволяют определить КПД механизма:

$$\eta = \frac{F_c}{M_{oc}} \cdot \frac{dH}{d\alpha},$$

где  $dH/d\alpha = C$  — передаточное число механизма.

### **Задание**

1. Ознакомиться с механической системой выключателя ВМП-10 с приводом ПЭ-11, указать назначение и характер движения элементов механической системы.

2. Ознакомиться с исследуемыми выпрямляющими механизмами, снять основные размеры и зарисовать их кинематические схемы, обратить внимание на приспособления, обеспечивающие необходимый недоход до «мертвого» положения. Определить экспериментально ми-

нимально допустимый угол недохода до «мертвого» положения. Схемы испытания приведены на рис. 3.5 и 3.6.

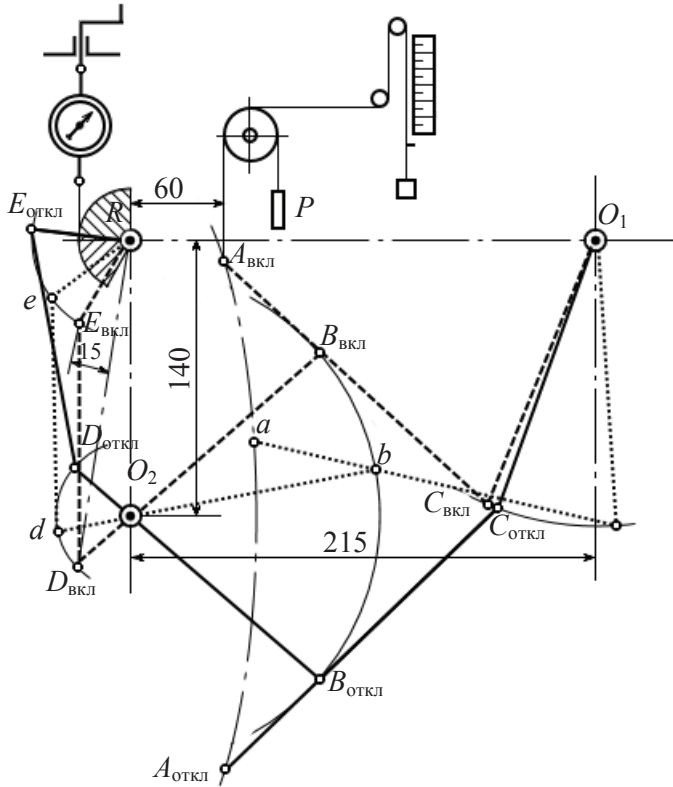


Рис. 3.5. Схема испытания механизма выключателя 110 кВ

3. Определить кинематические характеристики приближенного эллиптического прямилла и механизма смешанного типа  $H = f(\alpha)$ . Графически определить изменение передаточного числа  $C = dH/d\alpha = f(H)$ .

Определение углов и хода подвижных контактов осуществляется с помощью транспортеров и линеек, которыми оборудованы механизмы.

4. Определить статическую характеристику сопротивления включению для обоих механизмов. По полученной зависимости  $M_{oc} = f(H)$  при  $F = \text{const}$  рассчитать и построить зависимости изменения КПД  $\eta = f(H)$ . Измерения проводить с подвешенным грузом.

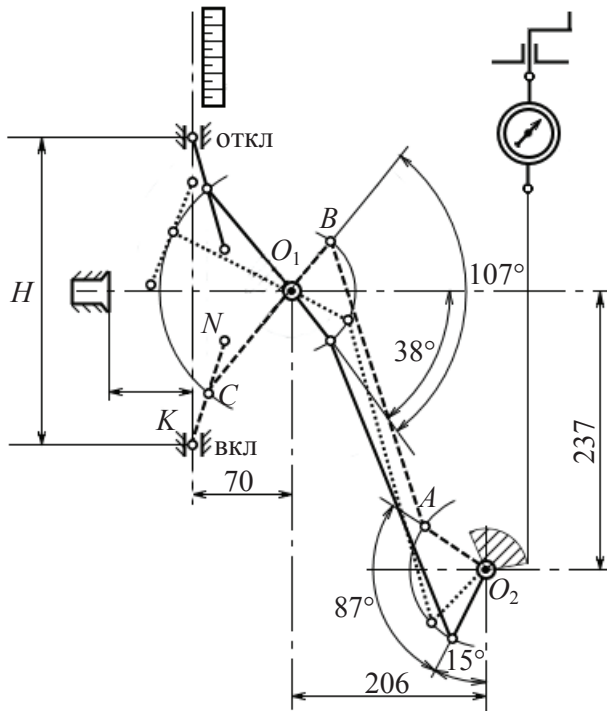


Рис. 3.6. Схема испытаний механизма выключателя ВМП-10

Величина  $M_{oc}$  определяется при статическом включении с помощью динамометров, замеряющих  $F_{oc}$  на постоянном плече  $\ell_{зам}$  относительно оси вала выключателя  $M_{oc} = F_{oc} \cdot \ell_{зам}$ .

### Контрольные вопросы

1. Каково назначение и конструкция выпрямляющих механизмов?
2. Что такое «мертвое» положение механизма?
3. Что такое приближенное эллиптическое прямилло? Каковы достоинства и область применения данного механизма?
4. Что такое выпрямляющий механизм смешанного типа? Каковы достоинства и область применения этого механизма?
5. Что такое кинематическая характеристика механизма?
6. Что такое статическая характеристика механизма?
7. Как определяется КПД механизма?

### 3.3. Исследование характеристик генераторного элегазового высоковольтного аппарата

Цель исследования: ознакомиться с конструкцией и принципом действия автокомпрессионного элегазового выключателя. Провести измерение его параметров и характеристик.

#### Предмет и алгоритм исследования

Предметом исследования является генераторный элегазовый выключатель НГИ-2 от АВВ. Аппарат предназначен для внутренней установки. Тип привода — пружинно-гидравлический.

Основные параметры аппарата:  $U_{\text{ном}} = 17,5 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{ном}} = 6300 \text{ А}$ ,  $I_{\text{о.ном}} = 50 \text{ кА}$ ,  $I_{\text{тс}} = 50 \text{ кА}$ ,  $I_{\text{дс}} = 138 \text{ кА}$ .

На рис. 3.7 показано общее устройство аппарата.

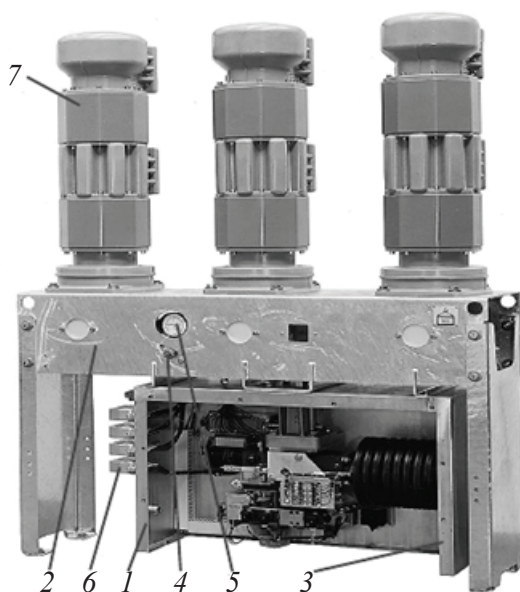


Рис. 3.7. Общее устройство элегазового генераторного выключателя НГИ-2<sup>22</sup>:

- 1 — рама привода; 2 — рама выключателя; 3 — опоры; 4 — газовые соединения;  
5 — манометр; 6 — штепсельные разъемы; 7 — полюс

<sup>22</sup> Генераторный выключатель типа НГИ. Описание и технические характеристики / АВВ High Voltage Technologies Ltd. С. 4.

На рис. 3.8 изображено устройство полюса выключателя. ДУ данного выключателя комбинирует в себе принцип автокомпрессии и автогенерирования. Предварительное повышение давления автогенерацией в объеме нагревания 7 позволяет уменьшить усилие привода для осуществления функции автокомпрессии 6.

Для повышения коммутационной износостойкости контакты этого выключателя разделены по функциональному признаку. Главные контакты 2, 3 предназначены для проведения тока и имеют малое переходное сопротивление, но не стойки к воздействию дуги, поэтому при коммутациях процесс горения дуги происходит на дугогасительных контактах. Дугогасительные контакты 4, 5 предназначены для выдерживания термического воздействия дуги при коммутациях. Для поглощения продуктов разложения элегаза предусмотрен адсорбент 9.

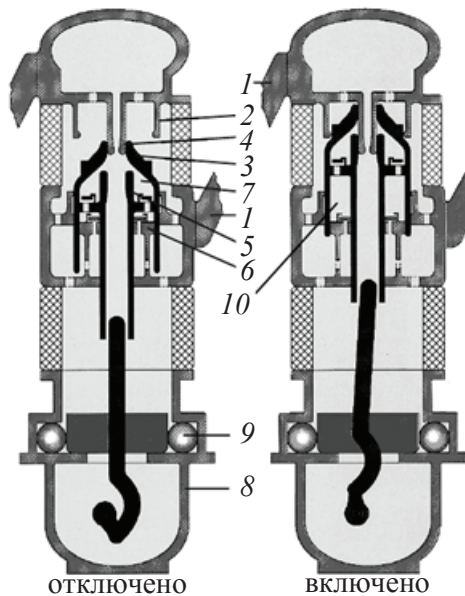


Рис. 3.8. Устройство полюса выключателя HGI-2<sup>23</sup>:

- 1 — выводы; 2 — неподвижный главный контакт; 3 — подвижный главный контакт;  
 4 — неподвижный дугогасительный контакт; 5 — подвижный дугогасительный контакт;  
 6 — компрессионное устройство; 7 — объем нагревания; 8 — картер; 9 — адсорбент;  
 10 — подпоршневой объем

<sup>23</sup> Генераторный выключатель типа HGI. Описание и технические характеристики / ABB High Voltage Technologies Ltd. С. 2.

На рис. 3.9 изображен пружинно-гидравлический привод выключателя.

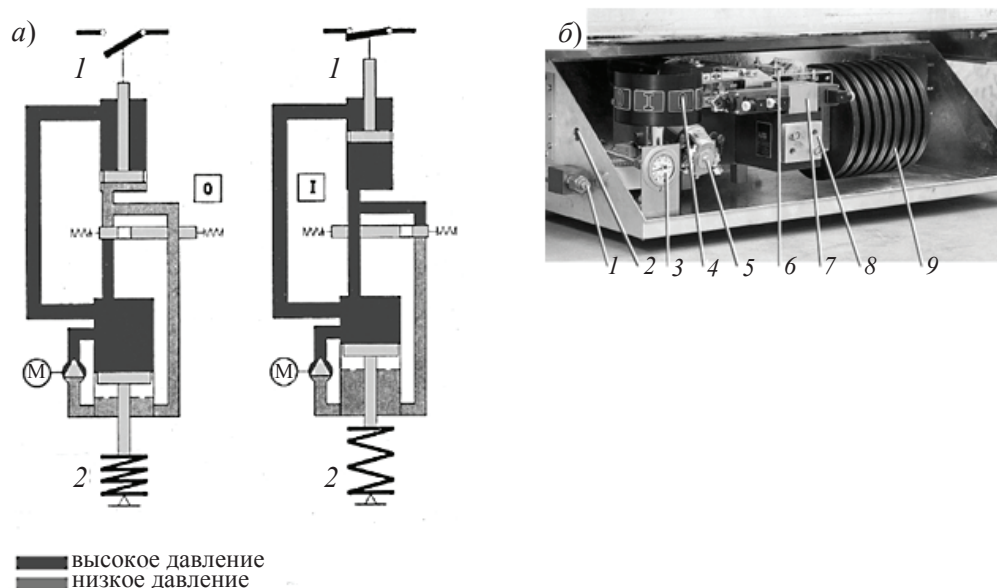


Рис. 3.9. Привод выключателя НГИ-2<sup>24</sup>.

*а)* принцип работы: 1 — тяга; 2 — пружина; *б)* конструкция: 1 — наполнительный клапан для ; 2 — отверстие для рукоятки ручного взвода пружины; 3 — манометр для ; 4 — механический индикатор положения; 5 — двигатель гидравлического насоса; 6 — переключатель конечного положения пружины; 7 — модуль контроля состояния; 8 — модуль двигателя; 9 — тарельчатая пружина

Насос М нужен для перекачивания масла из камеры низкого давления в камеру высокого давления, при этом происходит сжатие тарельчатой пружины и накопление ею механической энергии для коммутации контактов. Взведенное состояние тарельчатой пружины контролируется через тягу, она управляет контактами для включения двигателя насоса М, который восполняет использованное масло.

С тягой связан предохранительный клапан, который служит для предотвращения появления избыточного давления в системе привода и сжатия тарельчатой пружины выше допустимого уровня в случае неостановки перекачивающего насоса.

<sup>24</sup> Генераторный выключатель типа НГИ. Описание и технические характеристики / ABB High Voltage Technologies Ltd. С. 3—4.

### **Задание**

1. Разобрать общий принцип работы выключателя НГИ-2.
2. Разобрать работу смешанного дугогасительного устройства с автокомпрессионным и автогенераторным принципом.
3. Изучить и понять состав привода и принцип его работы. Зарисовать эскиз схемы работы привода.
5. Произвести включение и отключение элегазового выключателя как дистанционно, так и в ручном режиме.
6. Произвести замеры собственных времен включения и отключения.
7. Произвести замеры скорости и ускорений при включении и отключении аппарата в зависимости от времени и хода контактов. Построить характеристики скорости и ускорения  $v = f(t)$ ,  $v = f(H)$ ,  $a = f(t)$ ,  $a = f(H)$ .
8. Рассчитать усилие, развиваемое приводом при включении и отключении.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие типы приводов бывают у элегазовых выключателей?
2. Как и по каким путям осуществляется наполнение подпоршневого объема в дугогасительном устройстве?
3. В какой последовательности замыкаются или размыкаются контакты выключателя при коммутациях?
4. Как выключатель должен реагировать на падение давления элегаза?

### **3.4. Исследование характеристик теплового нагрева токоведущих систем сильноточных комплектных распределительных устройств**

---

Цель исследования: изучение токоведущей системы КРУ, переходного процесса ее нагрева и знакомство с методами измерения температуры токоведущих частей.

#### **Предмет и алгоритм исследования**

Исследуется процесс нагрева ТВС КРУ серии FLUOKIT M24, общий вид которого изображен на рис. 3.10.



Рис. 3.10. Общий вид КРУ FLUOKIT M24<sup>25</sup>

КРУ серии FLUOKIT предназначено для приема и распределения электроэнергии трехфазного переменного тока частотой 50 Гц в сетях 6 (10) кВ с изолированной или заземленной через дугогасительный реактор или резистор нейтралью.

В каждом шкафу КРУ находятся аппараты одного присоединения к сборным шинам. Корпус шкафа изготовлен из стального листа с алюминированным антикоррозийным покрытием. Наружные поверхности корпуса (двери, боковые панели и др.) покрыты полимерной порошковой краской.

Конструктивно шкаф имеет три отсека: отсек сборных шин, высоковольтный отсек, отсек вспомогательных цепей.

Для исследования нагрева ТВС в данной работе используется *метод термонар*. Этот метод основан на измерении величины термо-

<sup>25</sup> FLUOKIT M24 // Pars Tableau : [сайт]. URL: <http://parstableau.com/wp-content/uploads/2018/02/Fluokit-.pdf> (дата обращения: 23.09.19).

электродвижущей силы  $E_T$ , которая возникает в точке спая разнородных металлов. Термо-ЭДС является следствием термоэлектрических явлений в металлах, обусловленных их абсолютной температурой  $T$ , К.

Для измерения температуры проводника методом термопар на нем в средней его части установлены три термопары, каждая из которых имеет свой «холодный» спай. Измерение величины термо-ЭДС производится специальным гальванометром. Градуировка термопар производится нагревом «холодного» спая каждой термопары в сосуде с подогреваемой водой. При этом для каждой термопары строится градуировочная кривая (зависимость показания гальванометра от температуры термопары, измеряемой погруженным в воду другим прибором для измерения температуры). Функции «холодного» спая при градуировке выполняют термопары на проводнике (их температура до нагрузки проводника током остается равной температуре окружающей среды).

Во время нагрева проводника «холодные» спаи термопары помещаются в стеклянный сосуд объемом около  $200 \text{ см}^3$ , до половины наполненный трансформаторным маслом для исключения влияния локальных колебаний температуры окружающей среды возле «холодного» спая.

Температура окружающей среды измеряется термометром, установленным на расстоянии  $1 \div 2 \text{ м}$  от проводника в месте, защищенном от тепловых излучений и посторонних воздушных течений.

Изменение перегрева (превышения температуры над окружающей средой) однородного проводника во времени, начиная с момента протекания по нему тока, описывается уравнением

$$\tau(t) = \frac{P_0}{k_T S_0} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_T}} \right),$$

где  $\tau$  — перегрев проводника по отношению к окружающей среде, °С;  $P_0 = I^2 r$  — мощность, выделяемая в единице длины проводника, Вт;  $S_0$  — поверхность охлаждения единицы длины проводника,  $\text{м}^2$ ;  $k_T$  — коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ ;  $T_T = \frac{mc}{k_T S_0}$  — постоянная времени

нагрева проводника — время, в течение которого проводник нагревается до установившейся температуры при отсутствии

теплоотдачи в окружающую среду,  $c$ ;  $m$  — масса единицы длины проводника, кг;  $c$  — удельная теплоемкость материала проводника, Дж/(кг·°С).

При этом предполагается, что теплоемкость и удельное сопротивление проводника не меняются с изменением температуры. Установившийся перегрев проводника при длительном протекании тока

$$\tau_y = \frac{P_0}{k_r S_0}.$$

С целью определения установившегося превышения температуры при заданном токе испытание на нагревание продолжается до тех пор, пока температура испытуемого аппарата или образца в течение часа изменяется не более чем на 1 °С. Во многих случаях для определения установившейся величины перегрева требуется проводить опыт в течение длительного промежутка времени (10 ÷ 20 часов). Это сопряжено с рядом затруднений и не всегда может быть выполнено. Однако значение установившегося перегрева может быть определено на основе результатов частичного нагрева объекта.

Так, по одному из методов для этого достаточно экспериментально определить три значения превышения температуры  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  через равные промежутки времени, тогда  $\tau_y = \frac{\tau_2^2 - \tau_1 \tau_3}{2\tau_2 - \tau_1 - \tau_3}$ .

Это выражение тем точнее, чем больше отличаются между собой  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ , то есть чем дольше производится опыт.

Схема установки приведена на рис. 3.11. Замкнутая цепь нагреваемого проводника с термопарами 1, 2, 3 образует вторичную обмотку нагрузочного трансформатора Т1. В цепь нагрузки включен также измерительный трансформатор тока ТА. Величина тока регулируется автотрансформатором Т2.

**Внимание! Без присоединения амперметра к трансформатору тока включать питание запрещается.**

### Задание

1. Измерить температуру окружающей среды  $\vartheta_{oc}$ , °С.
2. Собрать схему градуировки трех термопар одним термометром, используя спаи исследуемого проводника в функции «холодного» спаи. Включить питание градуировочного сосуда. Проградуировать термо-

пары до  $80 \div 90 \text{ }^\circ\text{C}$  (через каждые десять градусов питание нагреваемого сосуда отключается и при неизменной величине температуры записываются показания гальванометра для каждой термопары).

Построить градуировочные кривые  $E_\tau = f(\tau)$ .

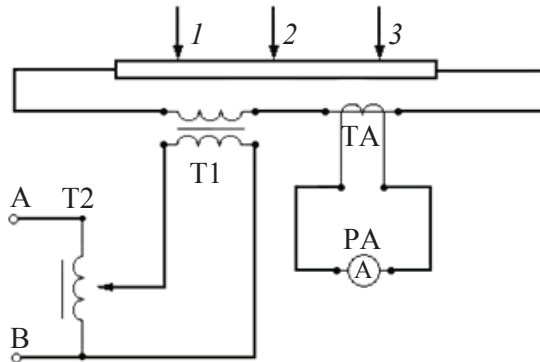


Рис. 3.11. Электрическая схема установки:

$1, 2, 3$  — термопары

3. Собрать электрическую схему установки (рис. 3.10). Оценить показания амперметра РА при токе нагрузки  $I = 100 \text{ A}$  (по коэффициенту трансформации). Записать начальные показания гальванометра для всех термопар. Получить разрешение преподавателя на проведение опытов.

Включить установку на заданную величину тока нагрузки  $100 \div 630 \text{ A}$  (по указанию преподавателя). Через каждые 3 мин регистрировать показания гальванометра в каждой термопаре. Нагрев продолжить до установившегося состояния.

Построить кривую нагрева  $\tau_n = f(t)$  для выделенных точек проводника. Графически определить постоянную времени нагрева  $T_{\text{тн}}$ . Оценить однородность проводника.

4. Снять кривую охлаждения проводника из установившегося нагрева по условиям пункта 3. Отключить установку; через каждые три минуты фиксируются показания гальванометра до полного охлаждения проводника.

Построить кривые охлаждения  $\tau_o = f(t)$ . Определить постоянную времени охлаждения  $T_{\text{то}}$ .

5. Рассчитать параметры нагрева исследуемого проводника аналитически. Сравнить расчетные значения  $T_\tau$  и  $\tau_y$  с экспериментальными.

6. Экспериментально снять три точки кривой нагрева при аварийном токе с интервалом одна минута и по ним рассчитать установившуюся температуру перегрева проводника.

7. Рассчитать перегрев проводника при аварийном токе из пункта 6 через две минуты после включения (постоянную времени принимать по данным пункта 5).

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое перегрев и чем определяется допустимая величина перегрева изолированных и неизолированных проводников?
2. Почему кривые нагрева различаются по характеру изменения температуры во времени?
3. Что такое постоянные времени нагрева и охлаждения проводника? При каких условиях они будут одинаковы?
4. Как градуируются термопары? Какая температура измеряется термопарой?

### **3.5. Исследование характеристик высоковольтного трансформатора тока**

---

Цель исследования: изучить назначение, устройство и принцип действия измерительного трансформатора тока. Ознакомиться с методиками измерения погрешности и оценки технического состояния трансформатора по паспортным и экспериментальным данным.

#### **Предмет и алгоритм исследования**

Предметом исследования является маломасляный измерительный трансформатор тока типа IMB 145 от АВВ.

На рис. 3.12 изображен трансформатор тока IMB.

Конструкция данного трансформатора состоит из U-образной первичной обмотки. Обмотка расположена внутри изоляционной крышки, которая заполнена кварцевым песком, пропитанным маслом, это обеспечивает достаточное качество изоляции при сниженном объеме масла.

Первичная обмотка может содержать от одного до нескольких параллельных алюминиевых или медных проводников U-образной фор-

мы. Для выравнивания напряженности электрического поля на изоляции применяются емкостные обкладки. Изоляция первичной обмотки выполнена специальной бумагой.

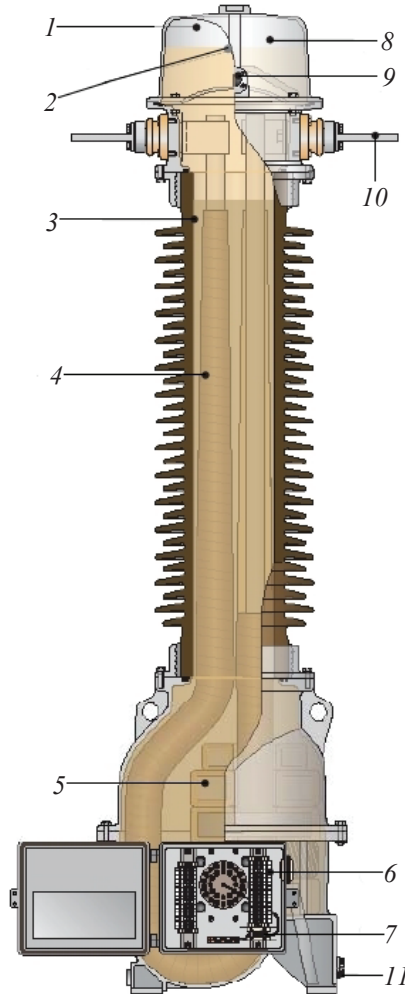


Рис. 3.12. Трансформатор тока типа IMB<sup>26</sup>:

- 1 — газовая подушка; 2 — крышка отверстия для заливки масла; 3 — кварцевый песок; 4 — первичная U-образная обмотка с бумажной изоляцией; 5 — сердечники вторичных обмоток; 6 — коробка вторичных выводов; 7 — емкостный вывод (опционно); 8 — расширительная система; 9 — указатель уровня масла; 10 — вывод первичной обмотки; 11 — заземляющий вывод

<sup>26</sup> Измерительные трансформаторы наружной установки. Справочник покупателя / АВВ. Высоковольтные продукты. 2014. С. 9.

Сердечники для измерительных обмоток выполняются из сплава никеля, характеризующегося малыми потерями (уменьшается погрешность измерений) и низким порогом насыщения. Сердечники для обмоток, питающих релейную защиту, выполнены из стали с магнитоориентированной структурой.

Вторичные обмотки выполнены из меди и изолированы эмалевой изоляцией.

В основании трансформатора расположен алюминиевый бак, внутрь которого заходит первичная обмотка, также там расположены сердечники и вторичные обмотки. Изоляционная крышка выполняется из глазурированного фарфора.

Данный трансформатор, как и все масляное оборудование, снабжен расширительной системой, которая устанавливается сверху изоляционной крышки. Расширительная система содержит газовый объем, заполненный азотом, так называемая азотная подушка. Эта система защищает трансформатор от избыточного давления, вызванного изменением объема масла из-за температуры.

Правильную маркировку выводов трансформатора тока можно произвести по схеме на рис. 3.13, где ТТ — трансформатор тока, Л1 и Л2 — выводы первичной обмотки, И1 и И2 — выводы вторичной обмотки. При соблюдении всех полярностей подключения стрелка амперметра отклонится вправо.

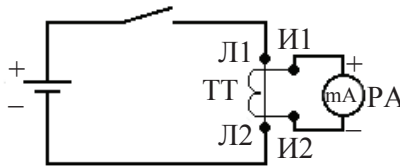


Рис. 3.13. Схема испытаний ТТ при проверке полярности выводов

Измерить коэффициент трансформации трансформатора тока можно по схеме на рис. 3.14, где Т1 — нагрузочный трансформатор, Т2 — ЛАТР, РА1 и РА2 — амперметры. ТТ1 — испытуемый трансформатор тока, ТТ2 — трансформатор тока с известным коэффициентом трансформации. Если позволяют параметры оборудования, то амперметр РА2 может быть включен непосредственно в первичную цепь. Требуется сделать 5–6 замеров при разных токах от нуля до номинала.

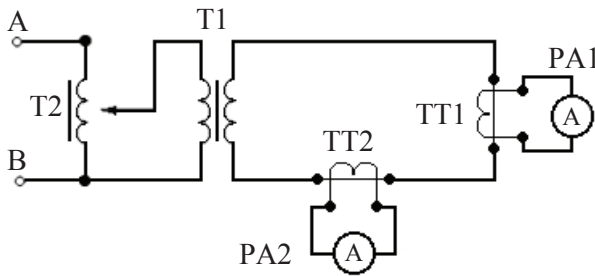


Рис. 3.14. Схема для проверки коэффициента трансформации

Снять вольтамперную характеристику трансформатора тока можно схеме на рис. 3.15. Амперметр РА должен иметь предел измерений, соответствующий номинальному вторичному току трансформатора. Для исключения влияния возможной остаточной намагниченности на ВАХ необходимо проводить процедуру размагничивания магнитопровода. Для этого после включения ЛАТРома несколько раз напряжение плавно поднимается и опускается до нуля. При этом показания амперметра РА не должны превышать номинальный вторичный ток данного трансформатора.

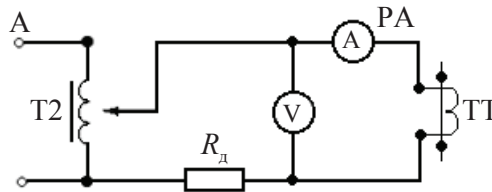


Рис. 3.15. Схема для снятия характеристики намагничивания

После размагничивания производится снятие ВАХ, следует произвести 6–8 измерений, регулируя напряжение на ЛАТРе от 0 до такого, при котором ток во вторичной обмотке не превышает номинальный. Затем строится график полученной вольтамперной характеристики  $U_2 = f(I_0)$ .

### Задание

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, необходимым для выполнения работы.
2. Осмотреть трансформатор тока и измерить сопротивление изоляции мегаомметром: между обмотками, между обмотками и корпусом.

3. Проверить правильность разметки зажимов.
4. Определить коэффициент трансформации трансформатора тока.
5. Снять вольтамперную характеристику ТТ.

### **Контрольные вопросы**

1. В чем опасность размыкания вторичных цепей работающего трансформатора тока?
2. Какие виды погрешностей существуют у трансформаторов тока?
3. Что называется током намагничивания трансформатора тока?
4. Какие существуют методы коррекции погрешностей трансформатора тока?
5. Что такое класс точности и в каких пределах по нагрузке он должен выдерживаться?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

---

---

1. Основы теории электрических аппаратов : учебник / И. С. Таев, Б. К. Буль, А. Г. Годжелло [и др.] ; под ред. И. С. Таева. — Москва : Высшая школа, 1987. — 352 с.
2. Кукеков Г. А. Выключатели переменного тока высокого напряжения / Г. А. Кукеков. — Изд. 2-е, перераб. — Ленинград : Энергия, 1972. — 336 с.
3. Трансформаторы тока / В. В. Афанасьев, Н. М. Адоньев, В. М. Кибель [и др.]. — Изд. 2-е, перераб. и доп. — Ленинград : Энергоатомиздат, 1989. — 415 с. — ISBN 5-283-04444-0.
4. Электрические аппараты высокого напряжения с элегазовой изоляцией / Г. Е. Агафонов, И. В. Бабкин, Б. Е. Берлин [и др.] ; под ред. Ю. И. Вишневого. — Санкт-Петербург : Энергоатомиздат, 2002. — 728 с. — ISBN 5-283-04753-9.
5. Электрические аппараты высокого напряжения / Г. Н. Александров, А. И. Афанасьев, В. В. Борисов [и др.] ; под ред. Г. Н. Александрова. — Изд. 2-е, доп. — Санкт-Петербург : Изд-во СПбГТУ, 2000. — 503 с. — ISBN 5-7422-0115-X.
6. Электрические и электронные аппараты : учебник : в 2 томах. Т. 1 : Электромеханические аппараты / Е. Г. Акимов, Г. С. Белкин, А. П. Бурман [и др.] ; под ред. А. Г. Годжелло, Ю. К. Розанова. — Москва : Академия, 2010. — 352 с. — ISBN 978-5-7695-6253-2.
7. Чунихин А. А. Аппараты высокого напряжения : учебное пособие / А. А. Чунихин, М. А. Жаворонков. — Москва : Энергоатомиздат, 1985. — 432 с.

*Учебное издание*

**Лузгин Владислав Игоревич**  
**Лопатин Иван Евгеньевич**  
**Рудный Виктор Владимирович**  
**Яковенко Светлана Равилевна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Редактор *Т. Е. Мери*  
Верстка *О. П. Игнатъевой*

Подписано в печать 02.10.2020. Формат 70×100/16.  
Бумага офсетная. Цифровая печать. Усл. печ. л. 7,4.  
Уч.-изд. л. 4,6. Тираж 100 экз. Заказ 185.

Издательство Уральского университета  
Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ  
620049, Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 5  
Тел.: +7 (343) 375-48-25, 375-46-85, 374-19-41  
E-mail: rio@urfu.ru

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре УрФУ  
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13  
Факс: +7 (343) 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>



