

**В.В.Жуков**

**КОРОТКИЕ  
ЗАМЫКАНИЯ  
в электроустановках  
постоянного тока**



Москва

Издательство МЭИ

2005

УДК 621.3.024.064.1.002.5  
ББК 31.27-01  
Ж 86

*Рецензент* докт. техн. наук А.В. Шунтов

**Жуков В.В.**

Ж 86 Короткие замыкания в электроустановках постоянного тока /  
В.В. Жуков. — М.: Издательство МЭИ, 2005. — 160 с., ил.

ISBN 5-7046-1187-7

Приведены методики расчета и экспериментального определения токов короткого замыкания в электроустановках постоянного тока. Описано назначение электроустановок, потребителей и режимы их работы.

На основании экспериментальных исследований показано влияние на ток КЗ аккумуляторных батарей, обратимых двигателей-генераторов, статических преобразователей, а также токоограничивающих факторов, таких как электрическая дуга в месте КЗ, увеличение активного сопротивления проводов и изменение параметров аккумуляторных батарей. Изложены вопросы математического моделирования режимов КЗ в системе постоянного тока.

Приведены методики расчета токов КЗ в электроустановках, получающих питание от аккумуляторных батарей, машин постоянного тока и трехфазных вентильных преобразователей.

Для специалистов-электроэнергетиков, аспирантов и студентов электроэнергетических специальностей высших учебных заведений.

**УДК 621.3.024.064.1.002.5**  
**ББК 31.27-01**

ISBN 5-7046-1187-7

© В.В. Жуков, 2005

## ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>Предисловие</b> .....	5
<b>1. Электроустановки постоянного тока</b> .....	11
1.1. Назначение электроустановок постоянного тока.....	11
1.2. Потребители энергии и режимы работы электроустановок постоянного тока.....	11
1.3. Особенности электрохимических реакций в свинцово- кислотном аккумуляторе.....	14
1.4. Электрические схемы установки постоянного тока.....	22
1.5. Преобразователи энергии.....	29
<b>2. Экспериментальные исследования режимов коротких замыканий     в системе постоянного тока</b> .....	32
2.1. Влияние аккумуляторных батарей, обратимых двигателей- генераторов и статических преобразователей на ток КЗ.....	32
2.2. Короткие замыкания в электроустановках постоянного тока большой мощности.....	39
2.3. Влияние электрической дуги на ток короткого замыкания в системе постоянного тока электростанций и подстанций.....	49
2.4. Увеличение активного сопротивления проводников при коротком замыкании.....	66
2.5. Влияние на ток коротких замыканий изменения параметров аккумуляторных батарей в процессе их эксплуатации.....	71
<b>3. Математические модели режимов КЗ в системе постоянного тока</b> ....	78
3.1. Модель дуговых процессов при КЗ в цепи аккумуляторной батареи.....	78
3.2. Модель расчета токов КЗ с учетом изменения параметров аккумуляторной батареи.....	89
3.3. Модель расчета токов КЗ с учетом нелинейности системы постоянного тока.....	97
<b>4. Расчет токов КЗ в электроустановках постоянного тока</b> .....	112
4.1. Общие положения.....	112
4.2. Расчет токов КЗ в электроустановках, получающих питание от аккумуляторных батарей.....	113
4.3. Расчет токов КЗ при электроснабжении электроустановок от машин постоянного тока.....	120
4.3.1. Характеристики машин постоянного тока.....	120
4.3.2. Методика расчета токов КЗ машин постоянного тока.....	122
4.3.3. Расчет токов КЗ машин постоянного тока.....	127
4.3.4. Расчет короткого замыкания машины постоянного тока.....	133

4.4. Расчет токов КЗ при электроснабжении электроустановок от трехфазных вентильных преобразователей .....	135
4.4.1. Особенности расчета коротких замыканий в электроустановках с вентильными преобразователями .....	135
4.4.2. Расчет токов КЗ трехфазных вентильных преобразователей .....	141
4.5. Расчет токов КЗ в электроустановках, получающих питание одновременно от аккумуляторных батарей, машин постоянного тока и статических преобразователей .....	146
4.6. Практическая методика расчета тока КЗ в электроустановке большой мощности .....	149
<b>Приложение</b> .....	<b>153</b>
<b>Список литературы</b> .....	<b>156</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Электроустановки постоянного тока являются важной составной частью системы электроснабжения различных типов потребителей промышленных предприятий, обеспечивающей управляемость и живучесть электростанций и подстанций. От электроустановок постоянного тока зависит функционирование цепей управления, защиты, контроля и регулирования основного оборудования электростанций и подстанций, устройств сигнализации и связи.

Опыт эксплуатации электроустановок постоянного тока показывает, что одним из наиболее опасных аварийных режимов в них являются короткие замыкания (КЗ), в результате которых возможны разрушения конструкции распределительных устройств, электрических машин, линий передачи электроэнергии. Режим КЗ в значительной степени определяет массу, габаритные размеры, конструкцию электрооборудования, объем и состав защитной аппаратуры автоматики, схемы и правила эксплуатации электроустановок.

При проверке электродинамической стойкости электрических аппаратов и проводников, а также их поддерживающие и опорные конструкции возникает необходимость определения максимально возможных значений токов КЗ. Однако при выборе аппаратов защиты и расчете их чувствительности важным является правильное определение реальных, минимально возможных значений токов КЗ.

Ежегодно в энергосистемах фиксируются случаи несрабатывания или неселективной работы аппаратов защиты при КЗ в электроустановках оперативного постоянного тока. Значительная доля таких случаев сопровождается повреждением высоковольтного оборудования. Анализ проектных материалов и эксперименты на действующих электроустановках позволили установить, что одной из основных причин отказов аппаратов защиты является несовершенство методов расчета процессов возможного изменения токов КЗ. В отраслевых методических указаниях по расчету токов короткого замыкания и выбору аппаратов защиты отсутствуют рекомендации учета многих факторов, действующих на снижение токов КЗ. Значения токов КЗ, полученные по действующим отраслевым методикам, в ряде случаев превышают экспериментальные значения в 2—3 раза, что может быть причиной несрабатывания аппаратов защиты, выбранных с минимальным запасом чувствительности.

К факторам, влияющим на снижение значений токов КЗ и часто не учитываемым в действующих методических указаниях отно-

сятся: влияние активного сопротивления электрической дуги в месте КЗ; тепловой спад тока, вызванный увеличением активного сопротивления проводников вследствие их нагрева током КЗ; переходное сопротивление разъемных контактов; зависимость параметров аккумуляторной батареи от температуры окружающей среды и степени ее разряженности, а также старение аккумуляторных батарей (АБ).

В практике проектирования и эксплуатации электроустановок постоянного тока используют методики расчета токов КЗ применительно к отдельным источникам энергии постоянного тока. Однако многие системы постоянного тока состоят из комплекса различных, параллельно работающих источников, таких как АБ, генераторы постоянного тока и статические преобразователи. В связи с этим возникают особые условия КЗ, связанные с взаимным влиянием на ток КЗ различных источников энергии.

В методиках расчета токов КЗ учитывают, что сопротивление в месте КЗ равно нулю. Из опыта эксплуатации известно, что короткое замыкание в цепях постоянного тока, если оно не подготовлено специально, является дуговым. Опубликованные ранее результаты исследования влияния дуги на ток КЗ относятся к электроустановкам с источниками постоянного тока большой мощности. Токи КЗ при этом достигали 60—120 кА [8].

Экспериментальные исследования особых условий КЗ, характеризующихся влиянием дуги в установках постоянного тока электростанций и подстанций, питающихся от источников малой мощности, например АБ, до настоящего времени не проводились. Сети постоянного тока электростанций и подстанций, как правило, имеют разветвленную конфигурацию, например цепи управления и сигнализации, и содержат значительное количество соединений и коммутационных аппаратов, что определяет высокую вероятность возникновения КЗ. Причины возникновения КЗ различны, они могут быть как результатом ошибочных действий персонала во время ремонтных работ, так и при повреждении изоляции. Кроме того, цепи постоянного тока проложены совместно с цепями переменного тока и не исключена возможность перехода КЗ в цепях переменного тока на цепи постоянного тока. Поэтому актуальными являются экспериментальные и теоретические исследования режимов дуговых КЗ в электроустановках постоянного тока.

Экспериментальные и теоретические исследования, проведенные Майром, Касси, Броном и другими учеными [9—12] развили теорию дуговых процессов. Их работы являются основой современной теории нестационарных режимов электрических дуг.

Сложная взаимосвязь электрических и тепловых процессов в электрической дуге длительное время вынуждала исследователей

рассматривать вопросы электрогазодинамики плазменного потока в различных охлаждающих средах при разных внешних условиях. Это осложняло теоретические исследования и замедляло разработку практических методик расчета.

Разработка расчетных методик и математических моделей ведется, в основном, на базе аналитического описания статических характеристик электрических дуг, статистической обработки экспериментальных данных, эмпирических соотношений режимных параметров. Методики в большинстве случаев имеют узкую область применения, их трудно обобщить, некоторые из них противоречивы. Анализ методик показал, что наиболее полно и точно динамические режимы электрической сети с учетом дуговых явлений можно описать только нелинейными дифференциальными уравнениями. Однако реализация таких математических моделей требует применения сложного математического аппарата и программирования на ЭВМ, что не всегда рационально при ведении практических расчетов. Возникает необходимость разработки простых методик расчета, базирующихся на экспериментальных данных.

При определении минимального значения тока КЗ необходимо учитывать увеличение активного сопротивления проводников от их нагрева током КЗ. В существовавшем ранее методе расчета теплового спада тока КЗ не учитывались возможное изменение начальной температуры проводника или его ток, теплоотдача во внешнюю изоляцию (для кабелей и изолированных проводов), а также взаимное, влияние указанных процессов и характера изменения активного сопротивления дуги при различных условиях КЗ. Достоверные экспериментальные данные по эффекту увеличения сопротивления жил кабелей при КЗ показали, что активное сопротивление может увеличиться к моменту отключения КЗ в 2—3 раза в зависимости от условий КЗ.

В настоящее время для расчета токов КЗ и выбора аппаратов защиты в системе постоянного тока используются методические указания по расчету токов КЗ в сети оперативного постоянного тока, разработанные ОРГРЭС [39, 40]. Более современным нормативным документом является ГОСТ 29176-91 [21], регламентирующий методику расчета тока КЗ с учетом большего числа факторов существенно влияющих на значение тока КЗ. Однако систематизированной и полной методики выбора аппаратов защиты, проверки чувствительности, селективности и резервирования устройств защиты в действующих электроустановках, основанной на нормативных документах пока не существует.

Согласно нормам проектирования и правилам электроустановок [41] при определении чувствительности аппаратов защиты необхо-

димо использовать минимальное значение расчетного тока, которое возможно при разряженной батарее и минимальной температуре электролита. Таким образом, для уточнения расчета тока КЗ кроме токоограничивающих факторов необходимо ввести поправки на температуру окружающей среды и степень разряженности для параметров вольт-амперных характеристик аккумуляторов отечественного и зарубежного производства. Неучет этих факторов при определении тока КЗ в сети с аккумуляторными батареями может привести к неправильным техническим решениям на стадии проектирования, трудностям при выборе аппаратов защиты и согласованию их по селективной работе, а также выполнению требований обеспечения чувствительности.

При проектировании считалось, что, если сечение кабеля проверено по потерям напряжения при толчковой нагрузке, то проверку на чувствительность аппарата установленного в этой цепи можно не проводить, так как предполагаемый ток КЗ будет превышать ток нагрузки в 5—10 раз в зависимости от внутреннего сопротивления источника тока, если при нормальной нагрузке потери напряжения в кабеле составляют 10 %. Следовательно, при таких условиях коэффициент чувствительности будет равен 2,5—5, что больше принятого и равного 1,5—2. Так как условия толчкового или пускового режима и режима короткого замыкания не совпадают по времени, то это положение было пересмотрено. Короткое замыкание всегда дуговое [13, 14], и приводит почти к двукратному снижению тока и, как следствие, к такому же снижению расчетного коэффициента чувствительности, т.е. значительного запаса по коэффициенту чувствительности у аппаратов защиты практически нет. Это особенно проявляется в силовых цепях, где токи потребления или пусковые токи соизмеримы с токами дугового КЗ. Аппараты защиты в цепях двигателей, мощных приводах выключателей могут оказаться нечувствительны или практически не будут иметь запаса по чувствительности. Поэтому для проверки кабелей используются два условия: коэффициент чувствительности должен быть больше нормируемого и потери напряжения должны составлять менее 5—10 % номинального. При использовании методики расчета в соответствии с ГОСТ [21], где учитываются влияние дуги, сопротивление контактов, тепловой спад тока и другие факторы, существенно влияющие на ток КЗ, первое условие для проверки кабеля часто оказывается более существенным, чем второе. Следовательно, при неучете любого фактора, который приводит к значительному снижению тока КЗ, не будет выполняться требование по чувствительности.

При завышении расчетного значения тока КЗ по сравнению с реальным током может также быть допущена ошибка при проверке



аппаратов защиты на селективность. В основном могут работать не-селективно обратозависимые расцепители. Так, зависимый расцепитель головного автоматического выключателя может быть не селективным по отношению к предохранителю на щите постоянного тока при пересечении их защитных (времятоковых) характеристик.

При выборе аппаратов защиты также решают задачу резервирования, когда длительность КЗ может составлять 6—7 с, что соответствует времени срабатывания обратозависимых расцепителей. При этом происходит спад тока от АБ во времени, что может привести к дополнительному снижению чувствительности аппаратов защиты. Следовательно, в методике расчета тока КЗ должны быть рекомендации по учету степени заряженности и температуры аккумуляторов в пределах от 0 до 25 °С при длительности КЗ до 10 с.

Таким образом, для правильного выбора и настройки аппаратов защиты и оборудования сети постоянного тока необходим расчет тока КЗ с возможно меньшей погрешностью. Завышение расчетного тока ведет к нечувствительному и неселективному действию аппаратов защиты, а занижение расчетного тока — к необоснованному завышению сечений кабелей. Обычно допускается погрешность 10 %. Такая точность расчета может быть достигнута только при учете изменения параметров аккумуляторов в зависимости от степени разряженности и температуры окружающей среды.

Круг вопросов, рассмотренных в книге, ограничен теми, которые способствуют развитию методов расчета и экспериментального определения токов КЗ в электроустановках постоянного тока. Назначение электроустановок постоянного тока, включающих такие источники энергии, как АБ, генераторы постоянного тока, статические преобразователи и их потребители энергии описаны в гл. 1.

Экспериментальные исследования режимов коротких замыканий в системе постоянного тока, дающие наиболее достоверные сведения о влиянии на ток КЗ аккумуляторных батарей, обратимых двигателей-генераторов и статических преобразователей приведены в гл. 2. Особое внимание уделено результатам экспериментальных исследований влияния на ток КЗ таких токоограничивающих факторов как электрическая дуга в месте КЗ, увеличение активного сопротивления проводников, изменение параметров АБ.

Разработке различных математических моделей расчета режимов КЗ в системе постоянного тока посвящена гл. 3. В ней приведены модели дуговых процессов при КЗ в цепи аккумуляторной батареи, расчета токов КЗ с учетом изменения параметров АБ и расчета токов КЗ с учетом нелинейности системы постоянного тока.

В гл. 4 приведены методики расчета токов КЗ в электроустановках постоянного тока, получающих питание от аккумуляторных

батарей, машин постоянного тока и трехфазных вентильных преобразователей. Методики отражают способы учета влияния на ток КЗ электрической дуги в месте КЗ, увеличение активного сопротивления проводников при нагреве их током КЗ с учетом теплоотдачи в изоляцию, внутреннее сопротивление разъемных контактов и изменения параметров аккумуляторной батареи.

В книгу включены результаты исследований автора и сотрудников кафедры «Электрические станции» МЭИ (ТУ) канд. техн. наук Ю.Н. Гусева, Ю.П. Кузнецова, А.М. Полякова.

Автор выражает искреннюю благодарность рецензенту книги доктору техн. наук А.В. Шунтову (ОАО «Мосэнерго»).

Замечания и пожелания направлять по адресу: 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14, Издательство МЭИ.

*Автор*

# 1 ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

---

## 1.1. Назначение электроустановок постоянного тока

Электроустановки постоянного тока являются независимыми от электроэнергетических систем источниками энергии и имеют различное назначение. Так, на электростанциях и подстанциях они предназначены для питания сетей управления, автоматики и сигнализации, а также для освещения станций и электроснабжения электродвигателей некоторых, особо ответственных, рабочих машин при нарушении нормальной работы станции. Установка постоянного тока состоит из одной или нескольких аккумуляторных батарей, преобразователей энергии переменного тока в постоянный и соответствующего распределительного устройства (РУ). Номинальное напряжение установки постоянного тока обычно равно 220 В. В качестве преобразователей используют двигатели-генераторы или статические преобразователи. В отечественных системах применяют батареи из свинцово-кислотных аккумуляторов стационарного типа. Количество батарей и их емкость выбирают в зависимости от типа установки и ожидаемой нагрузки. На тепловых станциях блочного типа устанавливают по одной батарее на каждые два блока и еще одну батарею на главном щите управления. На теплофикационных станциях с поперечными связями, а также на ГЭС ограничиваются одной или двумя батареями, обслуживающими станцию в целом. На крупных подстанциях 220—500 кВ, также устанавливают аккумуляторные батареи. Исключение составляют подстанции 110—220 кВ без выключателей на стороне высшего напряжения. На таких подстанциях обходятся без АБ, а управление осуществляют на переменном оперативном токе. Выключатели среднего и низшего напряжения снабжают пружинными или электромагнитными приводами, питаемыми выпрямленным током.

## 1.2. Потребители энергии и режимы работы электроустановок постоянного тока

Потребители энергии, которые в аварийных условиях получают питание от аккумуляторной батареи, весьма разнообразны по мощности и режимам потребления. Они могут быть разделены на следующие группы [37]:

- аппараты системы управления. К ним относятся многочисленные реле защиты, автоматики, блокировки, телемеханики, электромагниты управления выключателей (кроме электромагнитов включения масляных выключателей), электромагниты контакторов, сигнальные лампы, указатели положения и др. Одни аппараты потребляют энергию кратковременно, другие длительно находятся под током;
- электромагниты включения масляных выключателей. Мощность этих электромагнитов настолько велика, что для их питания целесообразно иметь особую сеть;
- лампы аварийного освещения; в нормальных условиях питаются от особой сети переменного тока 380/220 В; при потере источника энергии переменного тока эта сеть автоматически переключается на питание постоянным током от АБ;
- электродвигатели особо ответственных рабочих машин, например аварийных маслососов систем регулирования, смазки и уплотнений турбоагрегатов и синхронных компенсаторов, электродвигатели-генераторы оперативной связи и др.

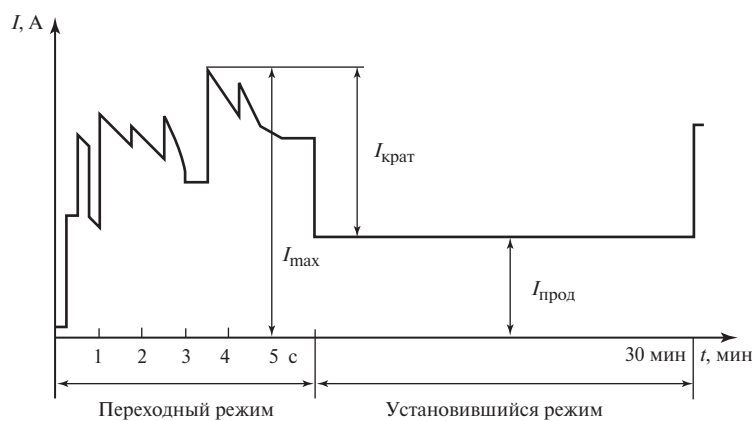
Аварийные маслососы систем регулирования, смазки подшипников и уплотнений турбоагрегатов (с электродвигателями постоянного тока) поддерживают давление масла в соответствующих системах при выбеге агрегата, когда рабочий насос, связанный с валом агрегата, неэффективен, а также при потере напряжения в системе собственных нужд (СН), когда маслосос с электродвигателем переменного тока также неэффективен. Аварийные маслососы относятся к наиболее ответственным рабочим машинам системы СН тепловой станции, так как они обеспечивают сохранность основного оборудования при нарушении нормального режима. Количество аварийных маслососов, их мощность и порядок включения зависят от типа турбоагрегата и его мощности. На ГЭС аварийных маслососов нет.

На АЭС электродвигатели рабочих машин в аварийных условиях должны быть обеспечены энергией от аккумуляторных батарей, значительно большей, чем электродвигатели на тепловых станциях. Для этого необходимы аккумуляторные батареи большей мощности.

**Режимы работы и нагрузки электроустановки постоянного тока.** При нормальной работе станции аккумуляторные батареи и соответствующие преобразователи включены параллельно. Нагрузку сети постоянного тока составляют лишь сигнальные лампы, указатели положения коммутационных аппаратов и реле с подтянутым якорем. Соответствующий этой нагрузке продолжительный ток нормального режима  $I_{\text{норм}}$  воспринимает преобразователь, присоединенный к сети СН переменного тока 380/220 В. Заряженная батарея также является потребителем энергии. В ней проходит небольшой

подзарядный ток, компенсирующий саморазряд. Периодически при срабатывании приводов выключателей продолжительный ток увеличивается за счет больших кратковременных токов, на которые преобразователь не рассчитан. Эти токи воспринимает батарея и переходит в кратковременный режим разряда.

При потере напряжения в системе СН нагрузку потребителей всех групп воспринимает аккумуляторная батарея. Эта нагрузка состоит из продолжительного тока нормального режима  $I_{\text{норм}}$ , продолжительного тока аварийного режима  $I_{\text{ав}}$ , слагающегося из тока аварийного освещения и тока электродвигателей, достигших нормальной частоты вращения, и кратковременного аварийного тока  $I_{\text{крат}}$  который суммируется из переходных составляющих пусковых токов электродвигателей и тока приводов выключателей. Таким образом, продолжительный ток разряда батареи  $I_{\text{прод}} = I_{\text{норм}} + I_{\text{ав}}$ . Этот ток увеличивается за счет кратковременного тока  $I_{\text{крат}}$ . График аварийной нагрузки (рис. 1.1) зависит от состава приемников энергии. Начальная стадия продолжительностью от нескольких секунд до 2 мин характеризуется наложением на продолжительный ток значительных кратковременных токов, вызванных автоматическим пуском электродвигателей и срабатыванием приводов выключателей, участвующих в операциях, необходимых для восстановления электропитания системы СН. После этого нагрузка батареи стабилизируется. В конце аварийного периода возможны повторные кратковременные толчки тока, вызванные включением выключателей. Про-



**Рис. 1.1. Характерный график аварийной нагрузки аккумуляторной батареи тепловой станции**

должительность аварийного режима зависит от типа станции (подстанции), положения ее в системе и ряда других условий. При проектировании аккумуляторной установки продолжительность аварийного режима принимают обычно равной 30 мин.

При внезапной аварийной нагрузке напряжение аккумуляторной батареи снижается. Следует различать напряжение батареи в продолжительном режиме разряда, изменяющееся плавно и напряжение при больших кратковременных токах. Последние вызывают кратковременное снижение напряжения батареи. После ликвидации аварии батарея должна быть заряжена, так как значительная часть запасенной энергии оказывается израсходованной. В процессе заряда напряжение батареи повышается. Емкость аккумуляторов, электрическую схему и сечение кабелей распределительной сети выбирают так, чтобы напряжение приемников энергии при всех режимах (продолжительных и кратковременных) не выходило за пределы, определяемые их работоспособность.

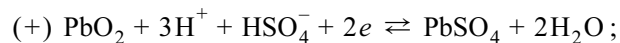
### **1.3. Особенности электрохимических реакций в свинцово-кислотном аккумуляторе**

Особенностью аккумуляторов при проектировании электроустановок, является зависимость электрических характеристик от степени разряженности и температуры окружающей среды. Изменение характеристик аккумуляторов обусловлено электрохимическими процессами в химических источниках тока данного типа.

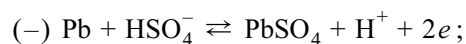
Токообразующие реакции в свинцово-кислотном аккумуляторе возможны при наличии следующих основных реагентов: свинца (Pb), из которого состоит отрицательный электрод аккумулятора и диоксида свинца (PbO<sub>2</sub>), из которого состоит положительный электрод. Электролитом служит раствор серной кислоты H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Диоксид свинца и губчатый свинец имеют кристаллическое строение и непрочны, в современных аккумуляторах они удерживаются на основе в виде пластины или каркаса из свинца с различными добавками, например сурьмой. Положительный и отрицательный электроды разделяются сепараторами.

Токообразующие реакции описываются следующими уравнениями [2]:

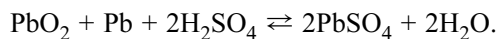
у положительной пластины



у отрицательной пластины



реакция разряда в окончательном виде:



Таким образом, при разряде аккумулятора расходуется серная кислота и на обоих электродах образуется малорастворимый сульфат свинца. Представления о таком механизме были высказаны в 1882 г. Дж. Гладстоном и А. Трайбом в теории «двойной сульфатации».

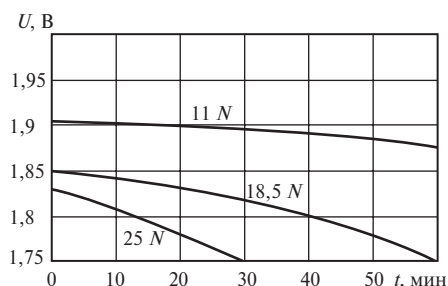
Электродные реакции сопровождаются переходом зарядов через границу раздела электрода с электролитом, при этом устанавливается некоторый гальванопотенциал, — разность потенциалов на границе раздела проводников между любой точкой первого и любой точкой второго проводника, при котором действующие на заряды химические и электрические силы уравниваются. Это означает, что электродная реакция находится в равновесии. Соответствующие значения электродных потенциалов называют равновесными, им соответствует равновесная ЭДС, которую можно определить из уравнения Нернста:

$$E_p = E_0 + \frac{2,3RT}{F} \lg \frac{a_{\text{H}_2\text{SO}_4}}{a_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (1.1)$$

где  $E_0$  — значение ЭДС, т.е. постоянная, соответствующая значениям электродных потенциалов при активностях всех компонентов, равных 1, В;  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж · К<sup>-1</sup> · моль<sup>-1</sup>;  $T$  — температура электролита, К;  $F$  — постоянная Фарадея, Кл · моль<sup>-1</sup>;  $a_{\text{H}_2\text{SO}_4}$  — активность серной кислоты;  $a_{\text{H}_2\text{O}}$  — активность воды.

Если система не равновесная, то напряжение разомкнутой цепи (НРЦ), характеризующее неравновесное состояние электрохимической системы, меньше значения ЭДС. Однако свинцовый аккумулятор является химическим источником тока (ХИТ), для которого НРЦ и значение равновесной ЭДС совпадают.

Важной характеристикой аккумулятора, используемой при проектировании электроустановок, является зависимость напряжения разряда, от времени, т.е. *разрядная характеристика*. По разрядной характеристике определяется обеспечение требуемого уровня напряжения аккумуляторной батареей в определенных условиях разряда. На рис. 1.2 приведены разрядные характеристики свинцово-кислотного аккумулятора типа СК при различных токах разряда. Эти характеристики могут быть определены только экспериментально. В первые десятки секунд разряда напряжение резко уменьшается из-за недостатка центров кристаллизации. Потом характеристика стано-



**Рис. 1.2.** Разрядные характеристики аккумулятора типа СК:

разряд продолжительным током 11, 18,5 и 25 А;  $N$  — номер аккумулятора

вится пологой. На характеристиках, приведенных на рисунке, не показаны начальные резко изменяющиеся участки. В конце разряда напряжение начинает снижаться быстрее. Чем больше ток, тем короче разряд и тем ниже расположена характеристика. Во избежание повреждения пластин из-за коробления и усадки активной массы разряд аккумулятора должен быть прерван при некотором предельном напряжении, оговоренном в технических условиях.

Причинами изменения напряжения при прохождении тока являются поляризация электродов и омическое падение напряжения на внутреннем сопротивлении аккумулятора.

*Поляризация* — это процесс изменения потенциала электродов при прохождении тока от исходного равновесного до нового определенного значения. Мерой поляризации служит ЭДС поляризации, причем она положительна при заряде и отрицательна при разряде. Этой ЭДС соответствует сопротивление поляризации. Полное внутреннее сопротивление аккумулятора складывается из сопротивления поляризации и активного сопротивления электролита, пластин и сепараторов. Внутренним сопротивлением аккумулятора является только активная составляющая без учета поляризационной составляющей, которая отдельно учитывается ЭДС поляризации.

Разделяют концентрационную и электрохимическую поляризацию. Изменения концентрации раствора вблизи поверхности электрода, возникающие при прохождении тока, вызывают изменения электродного потенциала (1.1). Чем больше концентрационные изменения, тем больше отклонение электродного потенциала от равновесного.

При прохождении тока через границу электрод — электролит может нарушиться равновесие между химическими и электрическими воздействиями на свободные заряды в поверхностном слое. Чем труднее протекает электродная реакция, тем большее изменение потенциала необходимо для прохождения заданного тока. В этом случае происходит электрохимическая поляризация. Кристаллизационная поляризация связана с образованием зародышей кристаллов в начале разряда. В системе с распределенными параметрами могут возникать «эффекты выравнивания». Сущность этого процесса



заключается в том, что рост поляризации, обусловленный увеличением тока, приводит к выравниванию плотности тока в пространстве между электродами, т.е. суммарное сопротивление поляризации уменьшается [3]. Эти виды поляризации менее значимы и, как правило, ими пренебрегают при моделировании процесса разряда аккумулятора.

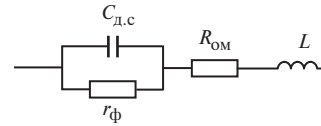


Рис. 1.3. Схема замещения, определяющая внутреннее сопротивление аккумулятора

*Внутреннее сопротивление аккумулятора.* На рис. 1.3 представлена распространенная электрическая схема замещения, определяющая внутреннее сопротивление аккумулятора [2, 6]. Под омической составляющей внутреннего сопротивления аккумулятора  $R_{ом}$  понимают сумму сопротивлений электролита, сепараторов, каркаса пластин и активной массы. Емкостная составляющая  $C_{д.с}$  внутреннего сопротивления является следствием наличия двойного электрического слоя на границе раздела электролита и пластин электродов. Образованию двойного электрического слоя соответствует также сопротивление границы раздела электролита и пластин, т.е. сопротивление фазового перехода  $r_{\phi}$ . Разряд емкости двойного слоя на сопротивлении фазового перехода обуславливает быстрый переходный процесс в начале разряда аккумулятора с постоянной времени до долей миллисекунды. Индуктивная составляющая внутреннего сопротивления  $L$  обусловлена поверхностным эффектом при прохождении тока через массивные детали аккумулятора. В основном индуктивная составляющая проявляется в источниках тока большой разрядной мощности. Для стационарных аккумуляторов большой емкости характерно активно-индуктивное сопротивление.

Сильное влияние на внутреннее сопротивление оказывают температура и концентрация электролита, поскольку значительная доля внутреннего сопротивления приходится на электролит, сепаратор, пропитанный электролитом, а также сопротивление фазового перехода ( $R_{вт} = R_{ом} + r_{\phi}$ ). На рис. 1.4 приведены зависимости удельной проводимости электролита от плотности электролита от плотности

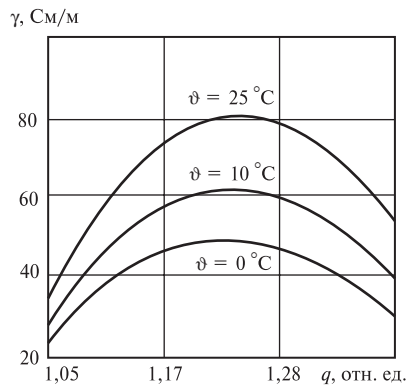


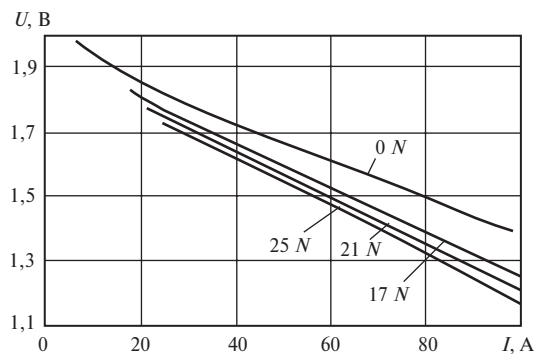
Рис. 1.4. Зависимости удельной проводимости электролита ( $q$ ) от плотности электролита ( $\gamma$ ) при различных значениях температуры ( $\vartheta$ )

электролита при различных температурах. При снижении температуры электролита на 25 °С его проводимость уменьшается практически в 1,5 раза, что приводит к увеличению внутреннего сопротивления. Сопротивление аккумулятора зависит также от плотности электролита, заряженного аккумулятора, составляющей, например, при температуре 25 °С 1,18—1,28 г/см<sup>3</sup>, что соответствует практически максимальному значению проводимости раствора серной кислоты. Соблюдение этих условий необходимо для того, чтобы аккумулятор имел минимальное сопротивление в течение разряда. Для аккумуляторов с небольшим запасом электролита плотность соответствует верхней границы. Высокая плотность электролита способствует ускоренному старению аккумулятора, например стационарные аккумуляторы имеют большой запас электролита невысокой плотности, что способствует увеличению срока службы аккумулятора до 10—15 и более лет.

Анализ процесса разряда, протекающего на пористом электроде, показывает существенное изменение фазового состава электродной основы, обусловленное частичным превращением электропроводящего материала в соединение, не обладающее заметной проводимостью (проводимость сульфата свинца менее 10<sup>-6</sup> см/м).

При разряде электродов свинцового аккумулятора на стенках пор образуется слой сульфата свинца. Это приводит к уменьшению изменения структуры и диаметра пор электрода. Потребление серной кислоты при разряде и препятствие диффузии вследствие сужения пор ведет к снижению концентрации электролита в порах аккумуляторных пластин. Образование сульфата свинца приводит, кроме того, к изолированию части активной поверхности электродов. Уменьшение пористости пластин, снижение концентрации электролита и образование сульфата свинца увеличивают внутреннее сопротивление аккумулятора. Таким образом, аккумуляторные электроды при разряде представляют собой нестационарные системы, все основные свойства которых изменяются во времени. Это обстоятельство не позволяет количественно оценить рассматриваемое явление [4].

Важной характеристикой аккумулятора является его вольт-амперная характеристика, используемая при выборе аккумуляторной батареи, так как при разряде стационарной батареи в аварийных условиях длительный ток аварийного режима увеличивается за счет толковых токов. При этом максимальный ток разряда может значительно превосходить ток длительного разряда (см. рис. 1.1). Чтобы обеспечить в этих условиях требуемое напряжение у зажимов приемников энергии, необходимо соответствующим образом рассчитать емкость аккумуляторов и их количество. Для этого недостаточно иметь разрядные характеристики аккумулятора. Необходимы вольт-амперные



**Рис. 1.5.** Вольт-амперные характеристики аккумулятора типа СК:

разряд предварительным током разряда 0, 17, 21 и 25 А;  $N$  — номер аккумулятора

характеристики, позволяющие определить напряжение аккумулятора при увеличении длительного тока аварийного режима за счет толчков токов. На рис. 1.5 приведены вольт-амперные характеристики аккумулятора типа СК в зависимости от предварительного тока разряда в течение 30 мин, при длительности толчкового тока 5 с. По характеристикам, зная максимальный ток из графика нагрузки, определяют напряжение на аккумуляторе. Если напряжение на аккумуляторе больше минимально допустимого, то выбранную батарею устанавливают, если нет, то увеличивают емкость батареи или количество аккумуляторов. Минимально допустимое напряжение определяется потребителями с учетом потерь напряжения в кабеле.

Ток короткого замыкания в сети постоянного тока может рассматриваться как ток разряда, значительно превышающий нормальные токи разряда, как и толчковые токи. В этом случае для определения тока КЗ необходимы соответствующие вольт-амперные характеристики аккумулятора.

Вольт-амперные характеристики обусловлены ЭДС и внутренним сопротивлением аккумулятора. Поскольку ЭДС обычно при разряде уменьшается на 5—10 % и слабо зависит от температуры электролита, то в большей степени вольт-амперные характеристики зависят от внутреннего сопротивления аккумулятора, что также определяет их зависимость от температуры и степени разряженности аккумулятора.

Характерной величиной аккумулятора является его *емкость* или количество электричества в ампер-часах, которое аккумулятор способен отдать при разряде от начального до конечного напряжения при определенном режиме разряда. Емкость аккумулятора определя-

ется разрядной характеристикой. Но на практике широко применяется именно понятие «емкость», так как эта величина имеет универсальный характер. Значение емкости используется при выборе аккумуляторов, сравнении основных параметров химических источников тока и т.д. Емкость аккумулятора, как и разрядная характеристика, зависит от типа пластин, их размера и количества, плотности и объема электролита, а также от условий работы. Аккумулятор характеризуется номинальной емкостью, которая указывается заводом-изготовителем. Номинальная емкость зависит от тока разряда при конечном напряжении. Обычно это десятичасовой ток разряда при конечном напряжении 1,8 В.

Зависимость емкости аккумулятора от тока разряда объясняется тем, что чем больше ток разряда, тем ближе к поверхности образуется сульфат свинца, ведущий к закупорке пор [4]. Сужение пор препятствует диффузии электролита и ведет к увеличению сопротивления аккумулятора. При разряде меньшими токами сульфат свинца образуется не только в устьях пор, но и по длине поры, что способствует диффузии электролита в поры, т.е. аккумулятор при меньшем токе может разряжаться более длительное время, что влияет на емкость аккумулятора и его разрядные характеристики. Так для аккумулятора СК-1 при токе 3,6 А емкость составляет 3,6 А · ч, при токе 25 А — 12,5 А · ч.

Емкость и разрядные характеристики аккумулятора зависят от температуры. При уменьшении температуры снижается скорость диффузии, что приводит к более быстрому снижению концентрации в порах пластин, т.е. увеличению ЭДС поляризации. При снижении температуры увеличивается также и сопротивление аккумулятора. Эти причины приводят к более быстрому достижению конечного напряжения, т.е. снижению емкости. На рис. 1.6 показана зависимость тока получасового разряда от температуры [5]. При снижении температуры необходимо уменьшить ток разряда, чтобы напряжение на аккумуляторе достигло конечного напряжения не раньше, чем через заданное время разряда.

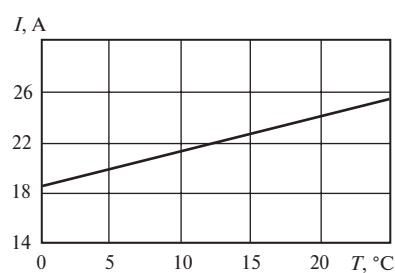


Рис. 1.6. Зависимость допустимого тока получасового разряда от температуры

При снижении температуры необходимо уменьшить ток разряда, чтобы напряжение на аккумуляторе достигло конечного напряжения не раньше, чем через заданное время разряда.

Емкость изменяется в течение срока службы аккумулятора. Она имеет максимальное значение в начале эксплуатации после нескольких циклов разряд-заряд. При правильной эксплуатации аккумулятора емкость удерживается близкой к максимальной в течение боль-

шой части срока службы, постепенно уменьшаясь. Таким образом, в процессе эксплуатации аккумулятора его разрядные и вольт-амперные характеристики ухудшаются. Причиной этого является естественное старение аккумулятора и, во многих случаях, не соблюдение правил эксплуатации. Последний фактор имеет случайный характер, что делает невозможным теоретический прогноз состояния аккумулятора.

Существуют несколько причин старения аккумулятора, которые приводят к ухудшению его характеристик в течение срока службы. Коррозия решетки положительного электрода обусловлена термодинамической неустойчивостью свинца при соединении с диоксидом свинца и усугубляется анодной поляризацией электрода на стадии заряда. Коррозия положительных решеток приводит к уменьшению сечения их жилок и увеличению омического сопротивления, а также к снижению емкости, осыпанию активной массы и выходу аккумулятора из строя.

Осыпание активной массы положительного электрода заключается в постепенном переходе с его поверхности в электролит мельчайших кристаллов и зерен диоксида свинца. Осыпание происходит в конце заряда под действием выделяющегося кислорода и в начале разряда из-за деформации поверхностного слоя в результате фазовых превращений [2]. Осыпание активной массы ведет к увеличению омического сопротивления аккумулятора. В аккумулятор активная масса складывается с запасом, поэтому ее осыпание слабо влияет на емкость, если срок службы аккумулятора не продолжительный.

При хранении свинцового аккумулятора в разряженном состоянии и систематических недозарядах на электродах происходит сульфатация — постепенный переход мелкокристаллического сульфата свинца в плотный твердый слой крупнокристаллического сульфата. Сульфат свинца является плохо проводящим соединением, изолирующим часть поверхности пластин, что приводит к увеличению сопротивления аккумулятора и потере емкости.

Помимо приведенных естественных причин старения аккумулятора его работоспособное состояние снижается из-за ошибок эксплуатационного персонала, нарушения правил технической эксплуатации, неудовлетворительной работы подзарядных агрегатов и т.п. Такие причины могут приводить к развитию процессов старения. Анализ причин старения аккумуляторов показал, что снижение емкости сопровождается увеличением внутреннего сопротивления. Такая зависимость обуславливает возможность использования внутреннего сопротивления в качестве диагностического параметра состояния аккумуляторных батарей.

#### 1.4. Электрические схемы установки постоянного тока

В СССР до 1940-х годов аккумуляторные батареи эксплуатировались в режиме «заряд-разряд», при котором батарея в течение длительного времени воспринимала постоянную нагрузку сети. При этом она постепенно разряжалась. Чтобы обеспечить работоспособность батареи при аварии, ее заряд выполняли ежедневно. Такой метод использования аккумуляторной батареи с периодическими зарядами имел существенные недостатки. При частых зарядах, уменьшался срок службы аккумуляторов, что затрудняло эксплуатацию и уход за батареей. В начале 40-х годов аккумуляторные батареи были переведены из режима «заряд-разряд» в режим постоянного подзаряда. В этом режиме подзарядное устройство несет постоянную нагрузку и также подзаряжает аккумуляторную батарею для компенсации саморазряда. Перевод аккумуляторных батарей в режим постоянного подзаряда способствовал улучшению работы и увеличению срока эксплуатации аккумуляторов. Эксплуатация установки упростилась и стала более экономичной.

Существуют две основные схемы включения аккумуляторной батареи в сеть постоянного тока: с элементарным коммутатором и без элементарного коммутатора, но с ответвлениями от батареи.

Схема установки постоянного тока с элементарным коммутатором приведена на рис. 1.7. Коммутатор условно показан с двумя рядами пластин 1. Батарея 2 присоединена к сборным шинам через разрядную шину коммутатора. Генератор 3 с помощью двухполюсного переключателя 4 присоединен к сборным шинам или зарядной шине коммутатора. Защита ветвей осуществляется с помощью плавких предохранителей, кроме ветви генератора, где предусмотрен автоматический выключатель максимального и обратного тока 5. Последний защищает генератор от коротких замыканий, а также от аномальной работы в режиме двигателя при питании от батареи, что может произойти при исчезновении переменного тока. Для кон-

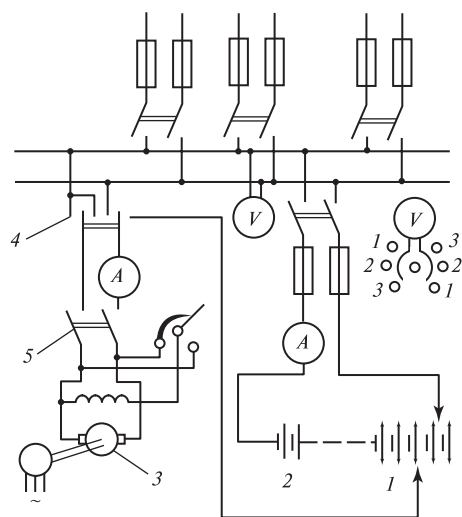


Рис. 1.7. Схема аккумуляторной установки с элементарным коммутатором

тактике переключателя 4 присоединен к сборным шинам или зарядной шине коммутатора. Защита ветвей осуществляется с помощью плавких предохранителей, кроме ветви генератора, где предусмотрен автоматический выключатель максимального и обратного тока 5. Последний защищает генератор от коротких замыканий, а также от аномальной работы в режиме двигателя при питании от батареи, что может произойти при исчезновении переменного тока. Для кон-

троля за работой батареи и зарядного агрегата используют измерительные приборы.

Разрядную щетку коммутатора устанавливают всегда так, чтобы обеспечить напряжение на сборных шинах, например 230 В. При разряде батареи в нормальном режиме ток нагрузки мал и напряжение аккумулятора составляет 2,0—1,95 В. Следовательно, к сборным шинам должно быть присоединено 115—118 аккумуляторов. В аварийном режиме, когда батарея разряжается большим током, количество аккумуляторов увеличивается соответствующим перемещением разрядной щетки. В конце разряда все аккумуляторы включены.

Для заряда батареи разрядную щетку коммутатора ставят в крайнее положение, при котором все аккумуляторы включены, переключатель генератора ставят в положение «заряд», пускают зарядный агрегат и включают автомат. При заряде напряжение аккумуляторов повышается и разрядную щетку постепенно перемещают в сторону уменьшения количества аккумуляторов, присоединенных к сборным шинам. В конце заряда разрядная щетка должна стоять на пластине 85.

Как видно из схемы, при заряде батареи часть тока генератора ответвляется в сеть и через крайние аккумуляторы, включенные между зарядной и разрядной щетками коммутатора, проходит больший ток, чем через остальные аккумуляторы. Следовательно, крайние аккумуляторы зарядятся быстрее основных. Во избежание перезаряда крайних аккумуляторов необходимо постепенно их отключать, перемещая разрядную щетку в сторону уменьшения количества аккумуляторов. По окончании заряда зарядный агрегат отключают и батарея опять воспринимает нагрузку сети.

Так как напряжение аккумуляторов при этом снижается, разрядную щетку перемещают в направлении увеличения количества аккумуляторов до 115.

Описанный метод использования аккумуляторной батареи с периодическими зарядами и соответствующая схема имеют следующие существенные недостатки. Батарея подвергается частым зарядам, что уменьшает срок службы аккумуляторов. Количество аккумуляторов, участвующих в работе изменяется при разряде и заряде. Следовательно, аккумуляторы всегда находятся на разных стадиях разряда или заряда, что затрудняет наблюдение и уход за ними. Крайние аккумуляторы обычно перезаряжаются, износ их заметно больше остальных. Таким образом, эксплуатация батареи по методу «заряд-разряд» оказывается неэкономичной.

**Аккумуляторная батарея в режиме постоянного подзаряда. Схема с коммутатором.** При переводе из режима «заряд-разряд» в режим постоянного подзаряда была сохранена первоначальная схема (см. рис. 1.7) с батарейным коммутатором для регулирования

напряжения на сборных шинах при переходе батареи из нормального режима подзаряда в аварийный режим разряда или послеаварийный режим заряда.

В отличие от режима «заряд-разряд» зарядный агрегат работает постоянно. Он присоединен к сборным шинам, несет постоянную нагрузку и подзаряжает батарею. Разрядная щетка коммутатора (через нее теперь проходит подзарядный ток) должна быть установлена так, чтобы на каждый аккумулятор приходилось примерно 2,2 В. Следовательно, при напряжении 230 В к сборным шинам должно быть присоединено  $230/2,2 = 105$  аккумуляторов. Через них проходит небольшой подзарядный ток. Остальные аккумуляторы с порядковыми номерами от 106 до 125 не подзаряжаются. Они используются только при исчезновении напряжения в системе СН, когда батарея переходит в состояние разряда и напряжение понижается. При заряде батареи напряжение повышается и разрядная щетка коммутатора должна быть перемещена в сторону уменьшения количества аккумуляторов.

При нормальном режиме кратковременные толчки тока воспринимаются совместно батареей и преобразователем. Распределение тока между ними зависит от внешних характеристик. Если преобразователем служит двигатель-генератор небольшой мощности, большую часть тока принимает на себя батарея, внешняя характеристика которой относительно пологая. Преобразователь с полупроводниковыми вентилями способен принять большой ток. Энергия, израсходованная батареей при кратковременном разряде, невелика и быстро восполняется из системы через преобразователь.

Перевод аккумуляторных батарей в режим постоянного подзаряда способствовал улучшению условий работы большей части аккумуляторов (105 из 125). Отпала необходимость ежедневных зарядов и эксплуатация установки упростилась. Однако схема с батарейным коммутатором обладает следующими недостатками.

1. Батарея разделена на две части, которые находятся не в одинаковых условиях. Основная часть аккумуляторов (105 элементов) подзаряжается и, таким образом, поддерживается в заряженном состоянии. Остальные 20 аккумуляторов не подзаряжаются и вследствие саморазряда постепенно теряют запасенную в них энергию. Периодический заряд этих аккумуляторов с помощью основного зарядного агрегата связан с нарушением режима основной части батареи.

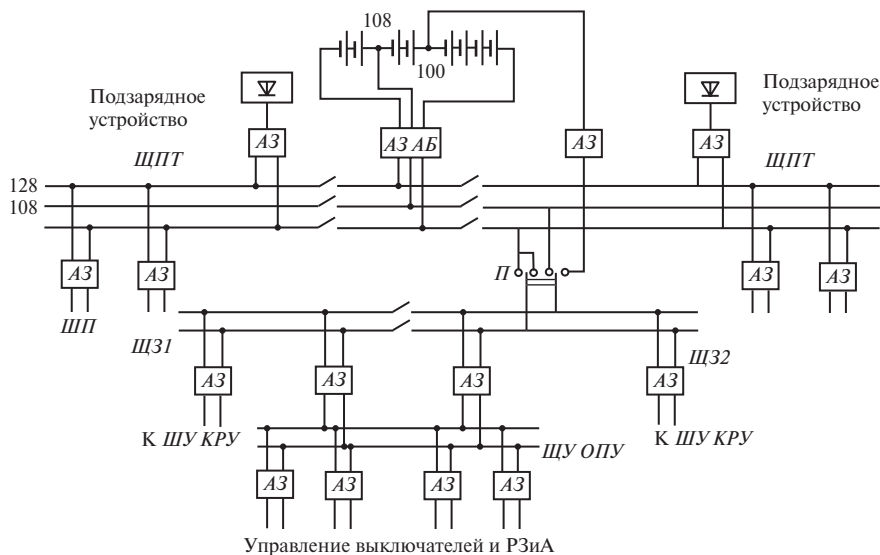
2. При нормальной работе станции к сборным шинам присоединена только основная часть батареи из 105 аккумуляторов (вместо 115—118 аккумуляторов при эксплуатации батареи по методу «заряд-разряд»), следовательно, при той же емкости аккумуляторов напряжение батареи при коротких разрядах ниже, чем при эксплуа-



тации ее по методу «заряд-разряд». При исчезновении переменного тока батарея переходит в состояние разряда большим током (продолжительным и кратковременным) и напряжение ее резко снижается. Включение в работу крайних 20 аккумуляторов с помощью коммутатора происходит слишком медленно. При недостаточной емкости аккумуляторов это может привести к отказу приводов выключателей в самый ответственный момент. Несмотря на указанные недостатки схемы, аккумуляторные установки с батарейным коммутатором широко применяются на станциях. В настоящее время, с развитием полупроводниковой импульсной техники, применяется не механический элементный коммутатор, а специальный преобразователь, с подключенной к нему аккумуляторной батареей, который поддерживает напряжение на шинах независимо от заряда батареи.

**Схема без коммутатора, но с ответвлениями от батареи для обеспечения энергией потребителей с различными требованиями к напряжению** (рис. 1.8) применяется на подстанциях [6].

Установки постоянного тока на подстанциях отличаются от установок на станциях тем, что продолжительный ток нормальной и аварийной нагрузок невелик (25—50 А на подстанциях 330 кВ и 60—100 А на подстанциях 500 кВ). Кратковременные токи приводов выключателей достигают сотен ампер. В этих условиях экономиче-



**Рис. 1.8. Фрагмент схемы с фиксированными ответвлениями от аккумуляторной батареи**

ски целесообразно иметь батарею, состоящую из 120, 128 и 140 аккумуляторов, в зависимости от кратковременного тока. Напряжение на сборных шинах составляет при нормальной работе соответственно 258, 275 и 301 В. Чтобы обеспечить питание продолжительной аварийной нагрузки и сети управления при напряжении приблизительно 230 В, предусмотрено ответвление от батареи у аккумулятора с порядковым номером 108.

Заряд батареи осуществляют при напряжении, не превышающем 2,35 В на один аккумулятор. При этом напряжение на сборных шинах повышается соответственно до 282, 301 и 329 В. Такое высокое напряжение не опасно для мощных приводов выключателей, так как при срабатывании привода батарея мгновенно переходит в состояние разряда и напряжение резко снижается.

Типовая схема электроустановки оперативного постоянного тока (рис. 1.8) имеет один канал питания, т.е. батарея подключается к секции щита постоянного тока *ЩПТ* через один головной аппарат защиты *АЗ АБ* с одним каналом питания. От щита постоянного тока осуществляется связь со щитами защит *ЩЗ1* и *ЩЗ2* для питания устройств релейной защиты и автоматики *РЗА* и шин щита управления оперативного питания цепей управления выключателей *ЩУ ОПУ*, а также питания других потребителей. Количество секций щита управления зависит от пиковой нагрузки одновременно отключаемых выключателей. Количество секций шинок щита защиты, необходимых для питания устройств релейной защиты и автоматики, определяется надежностью их функционирования. От щита постоянного тока также питаются шины питания *ШП* соленоидов включения выключателей. Чтобы чрезмерно не увеличивать напряжение на шинах управления, предусмотрено дополнительное ответвление от аккумулятора с порядковым номером 100 и соответствующий переключатель *П*.

Схема обеспечивает приемлемые напряжения для приемников энергии всех видов при нормальном и аварийном режимах, но имеет следующие недостатки. Батарея разделена на части, находящиеся не в одинаковых условиях при нормальной работе, разряде и заряде. Цепи устройств релейной защиты и автоматики с малыми токами потребления и малыми сечениями кабелей питаются через один и тот же головной автомат, что и силовоточные цепи приводов выключателей. Это приводит к тому, что при отключении головного автомата, например в случае его неселективного действия, отключаются силовоточные цепи шин питания и шины управления, питающие устройства релейной защиты и автоматики. Также при коротком замыкании на силовых цепях обесточиваются цепи защит. На шинах питания сложно обеспечить резервирование аппаратов защиты сту-

пению ниже, и тяжело обеспечить чувствительность аппаратов защиты в основной зоне защиты при соблюдении селективности и, наоборот, при соблюдении требований по чувствительности не обеспечивается селективность. Это особенно актуально при замкнутых кольцах шин питания. Переключатель со 108 на 100-й аккумулятор является крайне ненадежным элементом.

В настоящее время ведутся работы по модификации схемы с фиксированными ответвлениями. На рис. 1.9 представлен фрагмент схемы с двумя каналами питания. Отличие от предыдущей схемы состоит в том, что потребители постоянного тока разделены на две части и питаются через два разных головных автомата (*A31* и *A32*). При этом, основная и резервные защиты линий подключены к разным каналам, питающим разные секции щита релейной защиты. После головных автоматов связи между каналами нет. С одной стороны, такая схема увеличивает надежность системы оперативного постоянного тока, так как при отключении одного из головных автоматов теряется только часть потребителей. С другой стороны, схема приобретает конструктивный недостаток. Так, для того, чтобы аккумуляторную батарею подключить к двум автоматам, необходима дополнительная ошиновка, которая увеличивает вероятность возникновения КЗ на незащищенном участке до головных автоматов.

На рис. 1.10 представлен фрагмент схемы с фиксированными ответвлениями. В такой схеме устройства релейной защиты и автоматики питаются отдельно от цепей питания приводов выключателей через свой автомат или предохранитель от 104 аккумулятора батареи. При этом можно снизить требования к селективности аппаратов защиты шин питания, так как отключение аппарата защиты в этих цепях не приводит к потере цепей шин управления. Для этого необходимо соблюдать требования к времени действия защит и, как след-

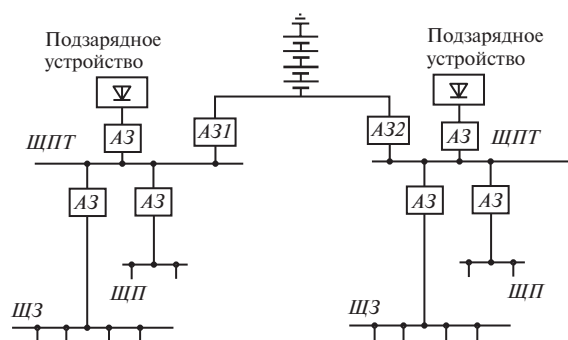


Рис. 1.9. Фрагмент схемы с двумя головными аппаратами защиты



## 1.5. Преобразователи энергии

Преобразователи энергии переменного тока в постоянный служат для питания сети постоянного тока при нормальном режиме, для подзаряда аккумуляторной батареи, периодических уравнивающих зарядов, заряда батареи после аварийного разряда. Количество преобразователей, их мощность и напряжение выбирают в соответствии с электрической схемой установки, нагрузкой и требованиями к надежности. В качестве преобразователей применяются двигатели-генераторы и статические преобразователи с кремниевыми вентилями.

Двигатели-генераторы состоят из трехфазных синхронных электродвигателей и генераторов постоянного тока с параллельным возбуждением. Достоинство синхронных электродвигателей заключается в постоянстве частоты вращения и, следовательно, постоянстве ЭДС генераторов. Генераторы нормальной серии, предназначенные для заряда аккумуляторных батарей, имеют мощность 7,2—100 кВт и рассчитаны для работы при напряжении 220—320 В. Регулирование напряжения осуществляют с помощью шунтового реостата. Генераторы этой серии могут быть также использованы для постоянного подзаряда батареи при условии автоматического регулирования напряжения.

Генератор с параллельным возбуждением имеет падающую внешнюю характеристику. Напряжение такого генератора, установленное при некоторой нагрузке, изменяется при изменении нагрузки. Если нагрузка уменьшается, напряжение повысится и ток заряда может чрезмерно увеличиться, что вредно для батареи. При увеличении нагрузки напряжение понижается и ток заряда может оказаться недостаточным для компенсации саморазряда. Ручное регулирование возбуждения генератора затруднительно из-за замедленной реакции батареи на всякое изменение напряжения. Поэтому генераторы, предназначенные для постоянного подзаряда аккумуляторных батарей, должны быть снабжены автоматическими регуляторами напряжения для поддержания заданного напряжения. Отклонение от заданного значения не должно превосходить  $\pm 2\%$ .

Статические преобразователи состоят из трансформатора, комплекта вентиля и вспомогательных аппаратов для регулирования и защиты. Трансформатор служит для изменения напряжения сети переменного тока до значения, соответствующего заданному выпрямленному напряжению, а в некоторых случаях для регулирования напряжения изменением числа витков. Трансформатор предназначен для исключения электрической связи сети постоянного тока с сетью переменного тока. Электрическая связь сетей, которая могла

бы иметь место при включении преобразователя без трансформатора или через автотрансформатор, не допускается во избежание опасных напряжений, которые могут возникнуть при однофазном замыкании, вследствие суммирования напряжения сети переменного тока и напряжения аккумуляторной батареи. Кроме того, при наличии электрической связи сетей двух родов тока увеличивается вероятность неправильного действия защиты и автоматики, возможного при однофазном замыкании в сети. Тип трансформаторов и схему соединения обмоток выбирают в зависимости от мощности преобразователя и типа вентилях. Потери в трансформаторе должны быть учтены при определении коэффициента полезного действия агрегата в целом.

Преобразователи включают управляемые кремниевые вентили, большой мощности и высокой надежности, а также устройства для стабилизации выпрямленного напряжения или тока в определенных пределах с точностью  $\pm 2\%$ . Стабилизация напряжения необходима при нормальной работе установки, а также на второй стадии заряда батареи. Устройство для стабилизации тока используют на первой стадии заряда. Достоинство статических преобразователей по сравнению с двигателями-генераторами заключается в простоте обслуживания, более высоком коэффициенте полезного действия и большом сроке службы.

Мощность преобразователя зависит от его назначения, емкости батареи и нагрузки нормального режима. Мощность, необходимая для подзаряда батареи, можно определить, исходя из значения тока подзаряда  $0,03N$ , А, и соответствующего напряжения, В, равного  $(2,15—2,20)n$ , где  $N$  — типовой номер аккумуляторов,  $n$  — их количество.

Мощность, необходимую для заряда батареи, можно определить, исходя из условий ее заряда в течение одной смены. Определяющим является ток на первой стадии заряда, который может быть принят равным  $(5—9)N$ . Максимальное напряжение при заряде, В, не должно превышать  $(2,3—2,35)n$ .

Если преобразователь предназначен только для питания сети при нормальной работе и подзаряда батареи, мощность его может быть определена из выражения

$$P = (I_{\text{норм}} + 0,03N)2,2n,$$

где  $I_{\text{норм}}$  — продолжительный ток нагрузки нормального режима.

Обычно мощность преобразователя выбирают с некоторым запасом, так как ток нагрузки нормального режима не может быть точно определен. Необходимо также учитывать временное увеличение тока заряда после срабатывания приводов выключателей.

Если преобразователь используется также для заряда батареи, мощность его может быть определена из выражения

$$P = [I_{\text{норм}} + (5-9)N]2,35n.$$

Мощность преобразователя, предназначенного для заряда батареи, значительно больше мощности преобразователя, применяемого для питания сети при нормальном режиме. Первый работает относительно редко — в течение нескольких часов, второй работает постоянно. Если в качестве преобразователей используют двигатели-генераторы, предусматривают обычно один агрегат небольшой мощности для постоянной работы и второй агрегат (большей мощности) для заряда батареи. При применении выпрямителей такое разделение функций нецелесообразно.

## **2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В СИСТЕМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

---

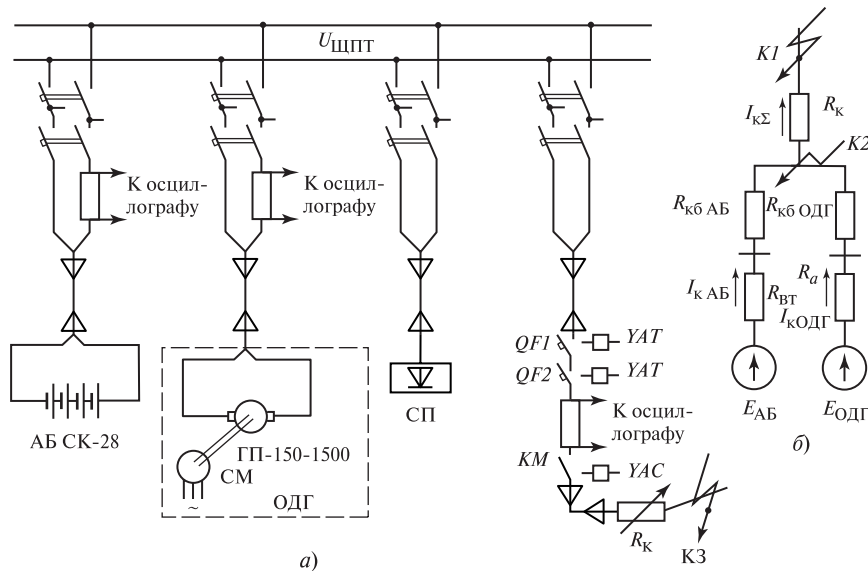
### **2.1. Влияние аккумуляторных батарей, обратимых двигателей-генераторов и статических преобразователей на ток КЗ**

В электроустановках постоянного тока, в качестве источников часто применяют параллельно включенные аккумуляторные батареи, двигатели-генераторы и статические преобразователи. Так, в системах постоянного тока некоторых отечественных тепловых и атомных электростанций, наряду с аккумуляторными батареями и статическими преобразователями используются обратимые двигатели-генераторы (ОДГ) ОП-150-У4, предназначенные для питания потребителей системы надежного питания электростанций в аварийных режимах. В нормальном режиме ОДГ подключен к сборке надежного питания и работает в режиме преобразования переменного тока 380 В, 50 Гц в постоянный ток для питания двигательных или статических потребителей, одновременно заряжая или подзаряжая аккумуляторную батарею. На стороне постоянного тока ОДГ установлен генератор постоянного тока ГП-150-1500 мощностью 150 кВт, регулирующий напряжение 220—320 В. Ниже приводится описание экспериментального исследования на АЭС влияния на ток КЗ аккумуляторной батареи, двигателя-генератора и статических преобразователей [7]. Целью исследования являлось определение взаимного влияния в режиме КЗ. В системе собственных нужд электростанции за каждым из выбранных присоединений проводились опыты КЗ в следующем сочетании источников:

- при работе одной аккумуляторной батареи;
- при работе обратимого двигателя-генератора;
- при работе аккумуляторной батареи параллельно с обратимым двигателем-генератором;
- при работе аккумуляторной батареи параллельно со статическим преобразователем.

Опыты металлических КЗ проводились с помощью специальной установки, позволяющей изменять общее сопротивление короткозамкнутой цепи и выполнять операцию автоматического отключения КЗ через установленный интервал времени. Принципиальная электрическая схема установки и расчетная схема замещения исследуе-





**Рис. 2.1. Электрическая схема проведения натуральных опытов КЗ (а) и расчетная схема замещения системы постоянного тока (б):**

$QF1$  и  $QF2$  — автоматические выключатели;  $КМ$  — контактор;  $YAT$  — электромагнит отключения;  $YAC$  — электромагнит включения;  $R_{вт}$  — внутреннее сопротивление аккумулятора;  $R_a$  — сопротивление обмоток якорной цепи ОДГ;  $R_{кб\ AB}$  — сопротивление кабеля в цепи АБ;  $R_{кб\ ОДГ}$  — сопротивление кабеля в цепи ОДГ;  $R_k$  — сопротивление цепи КЗ

мой системы приведена на рис. 2.1. Изменение сопротивления цепи короткого замыкания  $R_k$  достигалось комбинированным включением в нее резисторов СН-28 и отрезков разной длины кабелей марки КРПТ сечением жил  $95\text{ мм}^2$ . Продолжительность КЗ ( $t_k = 0,1\text{ с}$ ) была выбрана исходя из условий получения установившегося режима КЗ и ограничения возможных повреждений вследствие КЗ. В каждом из проведенных опытов выполнялось осциллографирование следующих параметров КЗ (рис. 2.1, б): суммарного тока вместе КЗ ( $I_{к\Sigma}$ ); составляющей тока КЗ от аккумуляторных батарей ( $I_{к\ AB}$ ); составляющей тока КЗ от статического преобразователя (на рис. 2.1, б не указано); составляющей тока КЗ от обратимого двигателя-генератора ( $I_{к\ ОДГ}$ ); напряжения на шинах щита постоянного тока ( $U_{ЩПТ}$ ); напряжения на выводах статического преобразователя ( $U_{СП}$ ); напряжения на выводах обратимого двигателя-генератора ( $U_{ОДГ}$ ).

Для определения степени влияния ОДГ, на ток КЗ в системе, где основным источником энергии является аккумуляторная батарея, было проведено 12 опытов КЗ. Сопротивление цепи короткого замыкания при этом изменялось от 20 до 960 мОм. Суммарный ток КЗ достигал 5680 А. Результаты опытов КЗ при исследовании влияния двигателя-генератора на ток КЗ приведены в таб. 2.1. На рис. 2.2 и 2.3 представлены осциллограммы токов при КЗ за внешним сопротивлением  $R_k = 20$  мОм и  $R_k = 113$  мОм. На рис. 2.2, а и 2.3, а показаны осциллограммы токов при КЗ в системе, содержащей аккумуляторную батарею СК-28, состоящую из 113 элементов (банок), а на рис. 2.2, б и 2.3, б — осциллограммы токов КЗ при параллельном включении аккумуляторной батареи и двигателя-генератора.

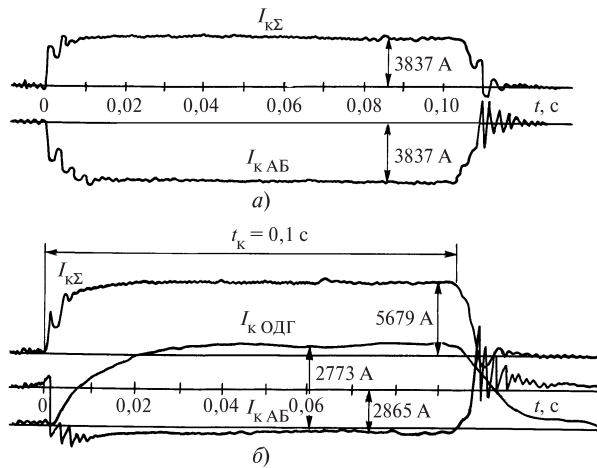
Анализ полученных результатов показывает, что к моменту отключения КЗ ( $t_k = 0,1$  с) процесс КЗ является установившимся. Результирующее значение тока в месте КЗ при работе аккумуляторной батареи и ОДГ является суммой их токов КЗ, хотя составляющая от АБ значительно снижена. Так, при КЗ за внешним сопротивлением  $R_k = 20$  мОм ток в месте КЗ при параллельной работы источников АБ и ОДГ больше в 1,48, чем ток КЗ при работе одной АБ.

Из осциллограмм также видно, что в начальный момент КЗ ток от аккумуляторной батареи нарастает мгновенно, а затем снижается до значения тока установившегося режима КЗ. Такое изменение кривой

Таблица 2.1

Результаты опытов КЗ

Номер опыта	$R_k$ , мОм	$I_{k\Sigma}$ , А	$I_{kАБ}$ , А	$I_{k ОДГ}$ , А	$U_{АБ}$ , В
1	20	3837	3837	—	76
2	20	5680	2855	2773	170
3	79	2278	2278	—	—
4	79	2634	1297	1550	205
5	113	1374	1374	—	—
6	113	1519	540	1015	221
7	190	1013	1013	—	—
8	190	1161	300	1108	229
9	370	616	616	—	—
10	370	660	100	720	230
11	960	215	215	—	—
12	960	224	50	273	240



**Рис. 2.2. Осциллограммы токов при КЗ за  $R_k = 20$  мОм в системе с АБ СК-28 (а) и при параллельной работе АБ СК-28 с ОДГ ГП-150-1500 (б)**

тока КЗ от АБ, зависит от характера кривой ОДГ. Ток КЗ ОДГ нарастает мгновенно в зависимости от значения постоянной времени цепи якоря. Так, при  $R_k = 20$  мОм ток КЗ, достигает установившегося значения при  $t_k = 0,04$  с, при  $R_k = 113$  мОм при  $t_k = 0,07$  с.

Приведенные данные в табл. 2.1 показывают, что при увеличении внешнего сопротивления цепи КЗ доля тока подпитки от ОДГ значительно возрастает, а ток КЗ аккумуляторной батареи уменьшается. При больших значениях внешнего сопротивления ток  $I_{kАБ}$  может изменить свое направление, что указывает на переход АБ в режим заряда. Так, при  $R_k = 960$  мОм ток  $I_{kАБ}$  в режиме КЗ равен  $I_{kАБ} = -50$  А.

Для определения тока КЗ от отдельно работающего генератора ГП-150-1500 была выполнена серия опытов КЗ на отключенном от сети ОДГ (табл. 2.2). Значения включаемых в цепь КЗ внешних сопротивлений подобраны таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение данных внешней характеристики генератора ГП-150-1500 в диапазоне токов от 200 до 2600 А в течение 0,1 с. Начальное значение напряжения якоря генератора составляло 242 В, что соответствовало напряжению на шинах щита постоянного тока при подключенной АБ, состоящей из 113 элементов. В соответствии с техническими условиями предельный ток машины постоянного тока составлял 2200 А в течение 3 с. При протекании большего тока возможно возникновение кругового огня на коллекторе генератора,

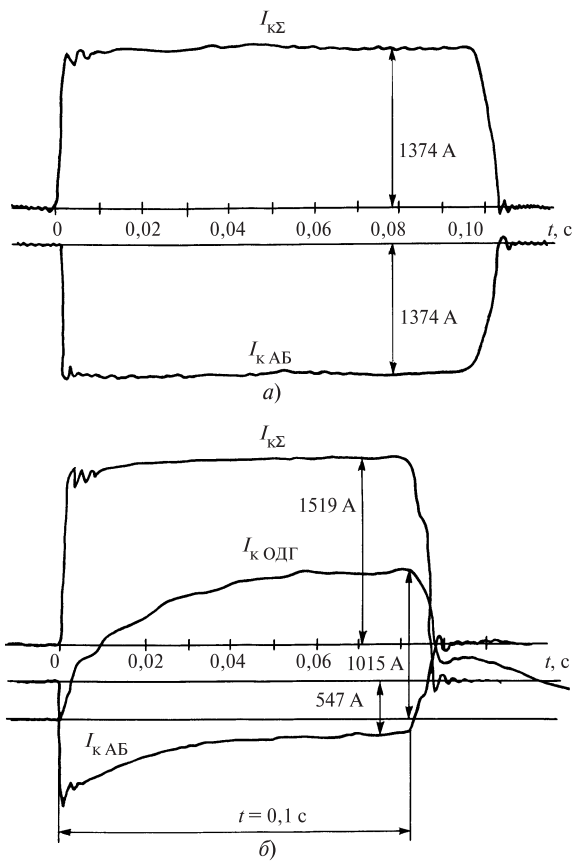


Рис. 2.3. Осциллограммы токов при КЗ за  $R_k = 113 \text{ мОм}$  в системе с АБ СК-28 (а) и при параллельной работе АБ СК-28 с ОДГ ГП-150-1500 (б)

Таблица 2.2

Результаты опытов КЗ в цепи ОДГ

$I_{kОДГ}, \text{ А}$	205	474	800	1186	1360	1913	2062	2611
$U_{ОДГ}, \text{ В}$	240	214	211	211	192	177	162	144
$R_k, \text{ мОм}$	1170	450	250	180	140	90	79	60

который может препятствовать дальнейшую подпитку генератором места КЗ.

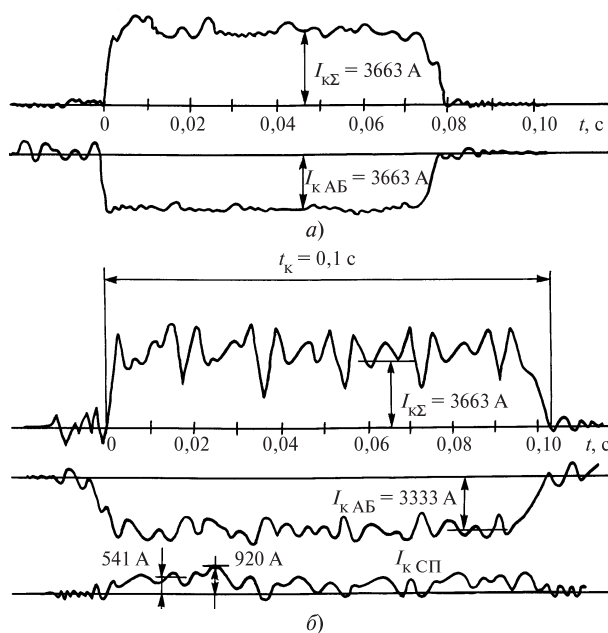
Однако в проведенных опытах ток генератора значительно превышал допустимые значения и достигал 2600—2773 А без возникновения кругового огня на коллекторе, что объяснялось небольшой продолжительностью КЗ ( $t_k = 0,1$  с), а также тем, что в реальных условиях ток, при котором возникает круговой огонь в большей степени зависит от состояния коллектора и щеточного аппарата машины, и, следовательно, имеет вероятностные отклонения от допустимого значения. В обычных условиях эксплуатации ток в цепи якоря, превышающий 2200 А, должен отключаться при срабатывании расцепителя аппарата защиты цепи якоря. При этом, в течение времени срабатывания расцепителя, возможно протекание повышенного тока (2700 А) в цепи КЗ и подпитка этим током места КЗ.

При исследовании влияния статических преобразователей на ток КЗ системы постоянного тока были выполнены опыты КЗ в соответствии со схемой рис. 2.1. Приведенные в табл. 2.3 результаты имеют приближенный характер вследствие невозможности более точной обработки осциллограмм. Погрешность вызвана чрезмерными импульсными колебаниями тока в короткозамкнутой цепи (рис. 2.4), что характерно при работе выпрямителя на нагрузку с противоЭДС. Анализ результатов опытов КЗ показывает, что влияние статического преобразователя на ток КЗ ограничивается уставкой по току перегрузки или уставкой ограничения тока. Это объясняется тем, что на

Таблица 2.3

Результаты опытов КЗ при параллельной работе АБ и СП

Номер опыта	$R_k$ , мОм	$I_{к\Sigma}$ , А	$I_{к СП}$ , А	$I_{к АБ}$ , А
1	1120	205	171	56
2	1120	205	—	205
3	394	549	250	399
4	394	532	—	532
5	215	979	451	633
6	215	923	—	923
7	157	1219	675	1052
8	157	1220	—	1220
9	34,4	3663	541	3333
10	34,4	3663	—	3663



**Рис. 2.4. Осциллограммы токов при КЗ за  $R_k = 34,4$  мОм в системе с АБ СК-28 (а) и при параллельной работе АБ СК-28 с СП (б)**

электростанциях в качестве зарядно-подзарядных агрегатов используются полупроводниковые регулируемые выпрямители. Внешняя вольт-амперная характеристика большинства агрегатов имеет два участка: на первом участке, в диапазоне рабочих токов, регулятор поддерживает на заданном уровне напряжение, а на втором — осуществляется ограничение тока. При КЗ зарядно-подзарядный агрегат работает на втором участке вольт-амперной характеристики. Так, максимальное значение тока КЗ статического преобразователя, определенное при условиях  $R_k = 157$  мОм, составляло приблизительно 675 А. Максимальный ток в месте КЗ при параллельной работе преобразователя и АБ был равен 3663 А при напряжении на выводах статического преобразователя 141 В.

Результаты натурального эксперимента КЗ при разных сочетаниях источников постоянного тока учитывались для правильного выбора уставок срабатывания аппаратов защиты АЭС, проверки ее чувствительности и селективности. На базе этих исследований была разработана инженерная методика [7] определения тока подпитки от гене-

ратора постоянного тока в режиме КЗ при параллельной работе с аккумуляторной батареей.

Таким образом, при КЗ за общим сопротивлением для комплекса разных источников питания, степень их влияния на ток КЗ зависит не только от значения этого сопротивления, но также от параметров источников и цепей их подключения к сборным шинам. При продолжительных КЗ (несколько секунд) возможно увеличение активного сопротивления короткозамкнутых цепей вследствие нагрева жил кабелей, приводящее к изменению степени влияния источников на ток КЗ.

## 2.2. Короткие замыкания в электроустановках постоянного тока большой мощности

Токи коротких замыканий в мощных электроустановках достигают 60—120 кА. Последствием КЗ являются разрушения конструкций распределительных устройств, электрических машин и аппаратов, линий передачи электроэнергии. В результате действия электродинамических сил и пожаров, сопровождающих КЗ, электроустановки надолго выходят из строя.

Ниже приводятся результаты исследований режимов КЗ в мощных электроустановках постоянного тока, проведенные на основе анализа экспериментальных материалов по КЗ [8, 10, 11].

Основные результаты исследований были получены при проведении опытов в электроустановке имеющей следующие характеристики:

ЭДС источника, В .....	240—110
Сопротивление короткозамкнутой цепи, мОм .....	3—12
Индуктивность цепи, мкГн .....	10—60
Материал электродов .....	медь, железо
Площадь поперечного сечения плавкой вставки из меди, мм <sup>2</sup> .....	0,1—0,3
Размер дугового промежутка, см .....	0,5—5,0
Диэлектрик в дуговом промежутке .....	воздух, гетинакс, резина

В опытах использовались различные способы образования металлических и дуговых КЗ.

### **Возникновение и протекание режима короткого замыкания.**

Как показывает опыт эксплуатации электроустановок постоянного тока КЗ может возникать в якорных обмотках электрических машин, в обмотках полюсов, уравнительных соединений, на коллекторах, шинах распределительных щитов и на шинпроводах, в местах подсоединения кабельных трасс к шинным сборкам, в местах прохода

кабелей через переборки, в автоматических выключателях, в местах подсоединения к силовым трассам цепей измерений и защит.

Наиболее частыми причинами КЗ могут быть: попадание посторонних предметов на оголенные токоведущие части, механические деформации токоведущих элементов (например, при монтаже), нарушение изоляции под действием неблагоприятных внешних условий или перенапряжений (например, при отключении), ошибочные соединения при монтаже элементов разной полярности и т.д.

Возникает КЗ либо через дугу, либо как металлическое. Дуговое КЗ возникает в том случае, если происходит постепенное нарушение изоляции, при этом ток утечки скачком переходит в ток дугового разряда. Металлическое КЗ возникает в случае, если токоведущие элементы (полюса) соединяются металлической перемычкой. Далее такое КЗ может существовать длительно или через некоторое время перейти в КЗ через дугу. Длительное существование металлического КЗ возможно в случаях:

- достаточного нажатия на контакты, обеспечивающего противостоение электродинамическим силам отталкивания, возникающим при КЗ;
- интенсивного отвода тепла от места КЗ, чтобы не происходило расплавление металла.

При больших токах КЗ такие условия трудно создать даже искусственным путем, а в условиях реальных КЗ, как показывает опыт эксплуатации, появление их хотя и не исключено, но маловероятно.

В случае если не обеспечивается первое условие, происходит разброс электродов или отброс плавкой вставки и КЗ чаще всего имеет характер кратковременного импульса тока. На рис. 2.5, *а* приведена осциллограмма КЗ в цепи с расчетным током КЗ 68 кА. Замыкание в цепи осуществлялось стальным бруском массой 3 кг положенным на две медные шины (рис. 2.5, *б*). При КЗ брусок был сброшен, КЗ имело характер кратковременного импульса тока в 19,1 кА.

Если не обеспечивается отвод тепла, в месте КЗ, как правило, происходит расплавление металла, последующее его испарение и возникает дуга. Если представить эквивалентную площадь касания электродов в виде перемычки определенного поперечного сечения, можно определить время, которое потребуется на расплавление и испарение металла перемычки. На рис. 2.6 приведены расчетные зависимости времени испарения перемычки из меди от поперечного сечения вставки при характерных в мощных электроустановках значениях постоянных времени цепи  $T$  и максимальных расчетных токов металлического КЗ  $I_m$ . Расчеты произведены в соответствии с [9]. Из рисунка видно, что при  $I_m = 100$  кА и  $T = 10$  мс вставка сечением



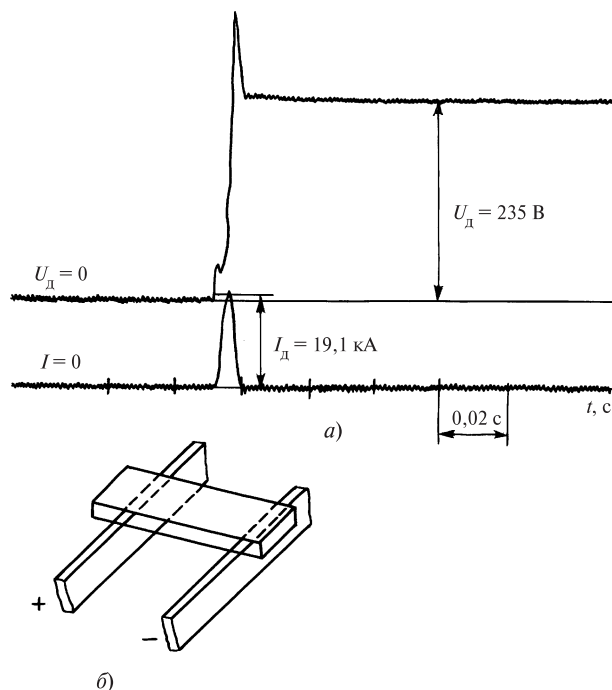


Рис. 2.5. Осциллограмма короткого замыкания, создаваемого посредством свободно лежащего стального бруска

5 мм<sup>2</sup> перегорит за 4 мс, т.е. раньше, чем ток достигнет максимального расчетного значения.

Если не обеспечиваются условия нажатия на контакты и отвода тепла, то разброс электродов, расплавление и испарение металла в месте КЗ происходят одновременно и КЗ через дугу возникает практически с самого начала. С уменьшением поперечного сечения плавкой вставки время разброса почти не изменяется, а время испарения уменьшается по линейной зависимости.

При очень малом поперечном сечении (менее 0,01 мм<sup>2</sup>)

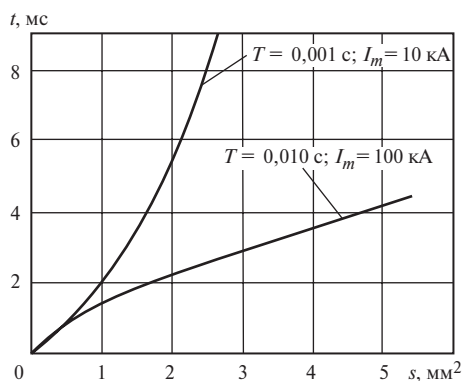


Рис. 2.6. Зависимости времени испарения плавкой вставки из меди от площади поперечного сечения вставки

вставка испаряется, практически не начиная двигаться, однако паров меди, образующихся в дуговом промежутке, уже недостаточно для возникновения дуги.

Оценивая приведенные выше случаи возникновения и развития КЗ, можно заключить, что наиболее вероятным является КЗ через дугу, возникающую, как правило, до того, как ток достигнет своего максимального расчетного значения. Менее вероятны случаи длительного металлического КЗ и КЗ в виде одиночного кратковременного импульса.

При больших токах КЗ горение дуги сопровождается колебаниями тока и напряжения. Объясняется это тем, что на дугу действуют электродинамические силы, заставляя ее перемещаться и изменять свою форму и сопротивление. На рис. 2.7, а показана зависимость сил, действующих на дугу, от тока КЗ. При расстоянии между электродами 20 мм и толщине электродов 5 мм на дугу действуют силы, составляющие при больших токах десятки и сотни килограммов.

Рассмотрим характер горения дуги при возбуждении ее между двумя параллельно расположенными электродами, например при расположении электродов в соответствии с рис. 2.7, б. После возникновения дуга перемещается к свободным концам электродов и, остановившись на концах, начнет растягиваться, при этом напряжение дуги  $U_d$  увеличивается. Если  $U_d$  будет расти медленнее, чем напря-

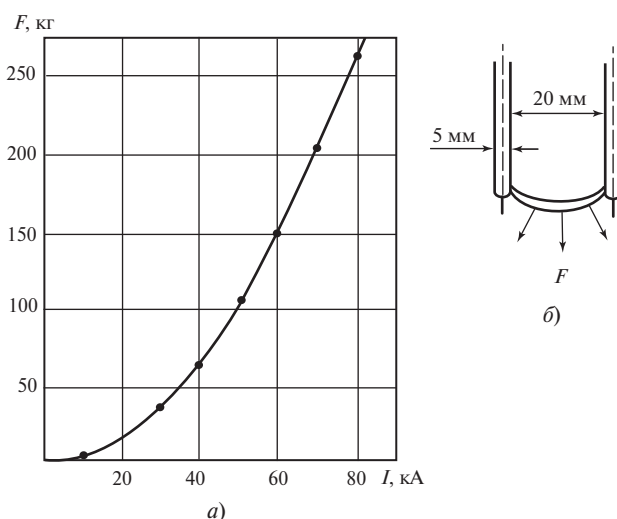


Рис. 2.7. Зависимость сил действующих на дугу, от тока КЗ (а) и схема создания дугового КЗ (б)

жение пробоя промежутка между электродами (потенциал повторного зажигания  $U_{п.з}$ ); т.е.  $dU_{д}/dt < dU_{п.з}/dt$ , то при растягивании дуги будет происходить увеличение ее сопротивления, ток будет уменьшаться и дуга погаснет. Так как скорость движения дуги по электродам и ее растягивания очень высоки (превышают несколько десятков метров в секунду [10]), то КЗ в этом случае имеет, как правило, характер кратковременного импульса (см. рис. 2.5). Если напряжение на дуге будет расти быстрее напряжения пробоя в дуговом промежутке на конце электродов ( $dU_{д}/dt > dU_{п.з}/dt$ ), то в тот момент, когда напряжение на дуге достигнет напряжения пробоя, промежуток пробьется и возникнет новая дуга, которая зашунтирует ранее возникшую. Возникшая дуга начинает опять вытягиваться и процесс зажигания может многократно повторяться. При этом условии  $dU_{д}/dt < dU_{п.з}/dt$  можно рассматривать как необходимое для обеспечения динамической устойчивости горения дуги.

Таким образом создается тепловой гистерезис, вследствие которого амплитуда напряжения на дуге будет возрастать, а ток постепенно уменьшится (рис. 2.8). В тот момент, когда  $dU_{п.з}/dt$  станет больше  $dU_{д}/dt$ , произойдет погасание дуги. При неизменных значениях ЭДС источника и дугового промежутка процесс динамического горения дуги не может продолжаться бесконечно. Для того чтобы поддерживать дугу, следует постоянно уменьшать дуговой промежу-

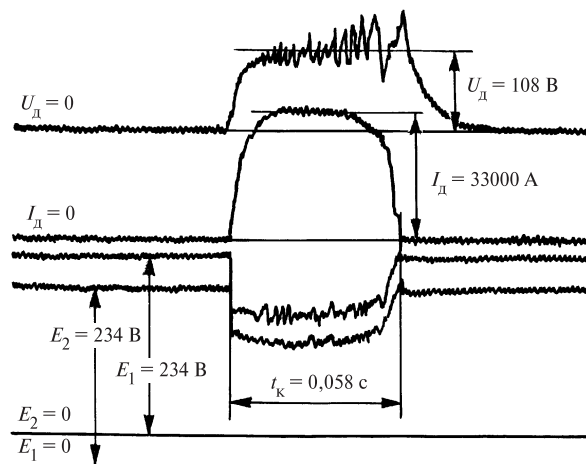
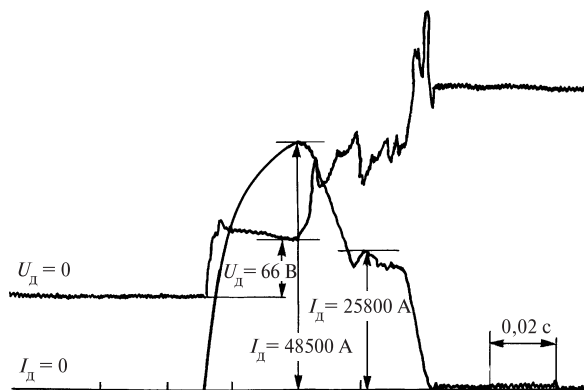


Рис. 2.8. Осциллограмма КЗ через дугу при  $E = 230 \text{ В}$  и неизменном дуговом промежутке  $0,5 \text{ см}$



**Рис. 2.9.** Осциллограмма КЗ через дугу при  $E = 230$  В,  $R_{ц} = 3,6 \cdot 10^{-3}$  Ом,  $I_{к. расч} = 64$  кА начальный дуговой промежуток 0,5 см

ток. В реальных условиях горения дуги дуговой промежуток, наоборот, быстро увеличивается (вследствие выгорания металла), что приводит к ускорению погасания дуги. Процесс постепенного выгорания промежуток, характерный для большинства случаев реальных КЗ, возможен и для случая, показанного на рис. 2.9.

Таким образом, реальный процесс КЗ через дугу при больших токах сопровождается колебаниями напряжения и тока. Дуга горит тем устойчивее, чем меньше потенциал повторного зажигания  $U_{п.з}$ , чем больше изменение напряжения дуги во времени  $dU_{д}/dt$  и чем медленнее происходит рост потенциала повторного зажигания  $dU_{п.з}/dt$ . В свою очередь, указанные выше параметры зависят от многих факторов, основными из которых являются напряжения сети, активное и индуктивное сопротивления цепи, а также состояние дугового промежутка, материал и взаимное расположение электродов, материал и поперечное сечение плавкой вставки.

Как показали опыты, с возрастанием напряжения электроустановки увеличивается  $dU_{д}/dt$  и уменьшается  $dU_{п.з}/dt$ , т.е. с увеличением напряжения дуга горит устойчиво. Уменьшение активного сопротивления оказывает такое же действие, как увеличение возбуждения дуги. Диффузия паров металла из дугового промежутка постепенно приводит к повышению  $U_{п.з}$  и  $dU_{п.з}/dt$ . Существенное влияние сечения плавкой вставки сказывается при низких напряжениях (110 В и ниже). Как показали опыты, время горения дуги в этих случаях пропорционально сечению плавкой вставки. При напряжениях 220 и

440 В зависимость времени горения дуги от сечения плавкой вставки проявляется значительно слабее и сказывается при больших дуговых промежутках (4 см и более).

Увеличение дугового промежутка влияет так же, как и уменьшение напряжения, т.е. при увеличении дугового промежутка увеличиваются  $U_{п.з}$  и  $dU_{п.з}/dt$  и уменьшается  $dU_{д}/dt$ . При дуговых промежутках, меньших критических,  $dU_{д}/dt$  становится меньше  $dU_{п.з}/dt$  и дуга горит неустойчиво.

Большое влияние на процесс горения дуги оказывает тип диэлектрика в дуговом промежутке. Если таким диэлектриком является воздух, то, как правило,  $dU_{д}/dt < dU_{п.з}/dt$  при любых размерах дугового промежутка дуга горит неустойчиво. Если в месте горения дуги поместить какой-либо твердый диэлектрик, например гетинакс или текстолит значения  $U_{п.з}$  и  $dU_{п.з}/dt$  существенно уменьшатся и дуга будет гореть какое-то время устойчиво при больших дуговых промежутках.

Взаимное расположение электродов также оказывает влияние на устойчивость горения дуги. От этого зависит форма дуги и направление действия усилий на нее.

**Параметры короткого замыкания через дугу при больших токах.** При КЗ через дугу с большими токами наибольший интерес для исследования процессов КЗ представляют такие параметры как ток, напряжение, время горения дуги, выделение тепла в дуге.

Дуга горит при больших колебаниях тока и напряжения, что затрудняет изучение параметров процесса КЗ. Однако при горении дуги можно выделить промежутки времени, в которые дуга горит относительно спокойно. Для этих промежутков можно определить статические характеристики дуги при больших токах. Наиболее удобен промежуток, следующий непосредственно за перегоранием плавкой вставки. Некоторое время после перегорания вставки дуга перемещается по электродам. В процессе движения, особенно в начале его, дуга не успевает сильно вытянуться, так как одновременно с перемещением столба дуги движутся анодное и катодное пятна, т.е. в этом промежутке дуга проявляет себя как статическая. Опытным путем были определены значения токов и напряжений сразу же за перегоранием плавкой вставки, при разных дуговых промежутках. Таким образом, были получены статические характеристики дуги при больших токах (рис. 2.10). Падение напряжения на дуге почти не зависит от тока. Незначительное увеличение напряжения на дуге с ростом тока объясняется тем, что с увеличением тока, а следовательно, и усилий, действующих на дугу, увеличивается длина дуги.

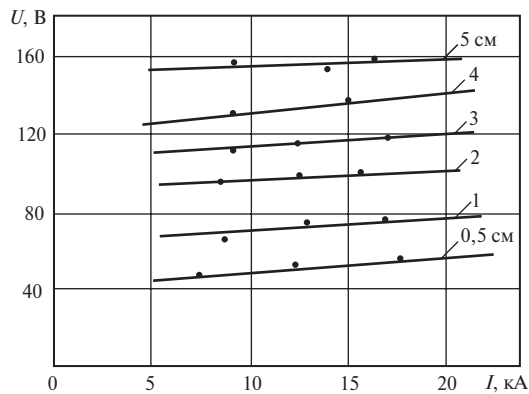


Рис. 2.10. Зависимости напряжения на дуге от тока КЗ при разных дуговых промежутках

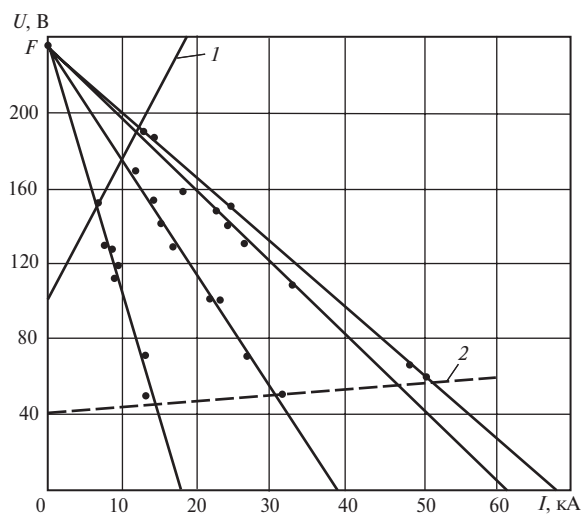


Рис. 2.11. Точки устойчивого горения дуги при разных сопротивлениях цепи

Большое практическое значение имеет определение максимальных и минимальных токов и напряжений при КЗ через дугу. Для изучения этого явления была рассмотрена совокупность точек стабильного горения дуги (рис. 2.11). Линии на графике, расходящиеся из точки с ординатой  $F$ , являются внешними характеристиками короткозамкнутой цепи при разных сопротивлениях цепи. Как видно, об-

ласть устойчивого горения дуги характеризуется двумя граничными кривыми 1 и 2. По кривой 2 определяются максимальные токи и соответственно минимальные напряжения на дуге, а по кривой 1 — минимальные токи и максимальные напряжения.

Для получения максимальных токов проводились опыты металлических КЗ, когда электроды наглухо соединялись болтами и прижимались друг к другу с нажатием, составляющим 20—50 кг.

В первом случае ток был близок к расчетному току металлического КЗ, падение напряжения в месте соединения электродов составляло не свыше 10 В и менялось пропорционально изменению тока. Во втором случае при расчетных токах 20—40 кА реальный ток был меньше расчетного на 20—30 %. Падение напряжения в месте соединения электродов возникало скачком амплитудой 40—50 В в течение 0,05—0,15 с. Вследствие сильного нагрева в месте соединения начинала гореть дуга. Напряжение на ней достигало более 100 В. При расчетных токах металлического КЗ свыше 50 кА в месте соединения электродов сразу же возникало падение напряжения 50—70 В и через несколько сотых долей секунды возрастало выше 100 В.

Результаты опытов с прижатыми электродами свидетельствуют о том, что при металлических КЗ с относительно небольшим предварительным нажатием (десятки килограммов) при расчетных токах до 30—40 кА возникает дуга нулевой длины, а при больших расчетных токах — дуга конечной длины. При длине дуги, равной нулю, падение напряжения на дуге состоит из катодного и анодного падений напряжения. Среднее напряжение на дуге в этом случае составило 50 В.

Таким образом, проведенные опыты показали, что только при соединениях электродов в месте КЗ, аналогичных болтовым, т.е. при соединениях с нажатием свыше нескольких сотен килограммов, можно не учитывать падения напряжения в месте КЗ. Во всех других случаях имеет место падение напряжения в месте КЗ, составляющее 30—60 В.

По данным из рис. 2.11 построена зависимость отношения  $I_{д\ min} / I_{д\ max}$  от расчетного тока металлического КЗ  $I_{м,расч}$  (рис. 2.12), показывающая максимально возможное ограничение тока КЗ сопротивлением дуги.

Время горения дуги зависит от большого числа факторов, например направления потоков воздуха в месте горения дуги и может изменяться в широких пределах. Если при горении дуги не обеспечивается условие динамической устойчивости горения, то дуга горит только то время, в течение которого еще не произошла диффузия паров металла плавкой вставки из дугового промежутка или в течение времени перемещения дуги по электродам. Как показали исследова-

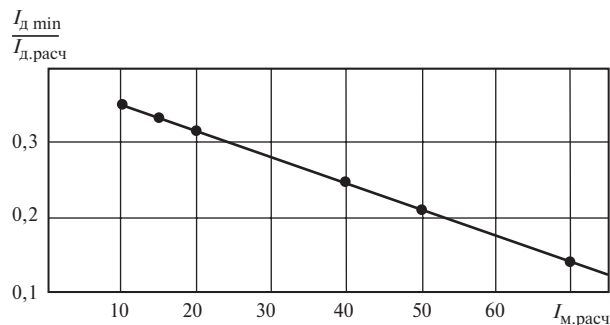


Рис. 2.12. Максимальное ограничение тока КЗ сопротивлением дуги при реальных КЗ

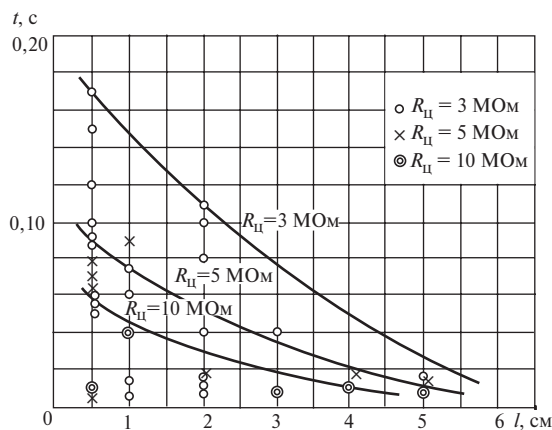


Рис. 2.13. Зависимости времени горения дуги от расстояния между электродами при разных сопротивлениях цепи

ния, время горения такой дуги при больших токах не превышает 0,02—0,03 с.

Если условие динамического горения дуги обеспечивается, например при остановке дуги путем помещения между электродами изоляционных прокладок, то время горения дуги существенно возрастает. Заметное влияние при этом на длительность КЗ оказывают размеры дугового промежутка и сопротивление короткозамкнутой цепи. Зависимости максимального времени горения дуги от расстояния между электродами при различных сопротивлениях цепи представлены на рис. 2.13. Кривые на рисунке построены как огибающие точек максимального времени горения дуги для различных сопротивлений цепи.



Точки были получены при опытах в цепи с  $E = 230$  В. Остальные параметры варьировались в пределах, указанных выше.

**Термическое действие коротких замыканий через дугу при больших токах.** Опасность КЗ через дугу и металлического КЗ следует оценивать по-разному. Если при металлическом КЗ на первый план выступает динамическое действие токов на аппараты и токопроводы, то при КЗ через дугу определяющим является термическое действие токов в месте КЗ. Дуга КЗ при больших токах характеризуется следующими особенностями:

- плазма дуги имеет очень высокую температуру. При токах, составляющих несколько десятков килоампер, температура столба дуги может достигать  $50\,000$  °С [12];
- дуга КЗ постоянного тока характеризуется высоким выделением тепла, так как вся энергия, запасенная в индуктивности короткозамкнутой цепи, выделяется в дуге;
- многократные зажигание и погасание дуги связаны с усиленным выделением потерь в дуге.

Эти факторы приводят к тому, что выделение тепла в дуге достигает недопустимо больших значений за десятые и даже сотые доли секунды. Как показали опыты, КЗ через дугу при токах выше  $40\text{—}50$  кА возникает пожар и оборудование разрушается в течение  $0,1$  с. При КЗ происходит разбрызгивание жидкого металла на площади радиусом  $5\text{—}15$  м, в результате чего может возникнуть пожар сразу в нескольких местах.

При токах  $5\text{—}10$  кА термическое действие дуги значительно ниже. Разрушение оборудования в этом случае может произойти за несколько десятых долей секунды.

Помимо термического действия, дуга оказывает сильное физиологическое действие. Как показали опыты, при токах КЗ  $20\text{—}30$  кА и времени горения дуги примерно  $0,2$  с испаряется несколько десятков граммов меди, при этом помещение объемом  $100$  м<sup>3</sup> наполняется дымом и распыленными оксидами меди, полностью нарушающими видимость; такая среда может быть опасной для жизни. Кроме того, КЗ сопровождается сильным звуковым ударом и световым излучением, что также оказывает неблагоприятное физиологическое действие.

### **2.3. Влияние электрической дуги на ток короткого замыкания в системе постоянного тока электростанций и подстанций**

Параметры электрической дуги, возникающей при КЗ зависят от конкретных условий появления и развития дугового КЗ. Характерной особенностью системы постоянного тока электростанций

и подстанций является питание их от источников малой мощности (аккумуляторных батарей), наличие довольно сложной конфигурации кабельных сетей и высокой насыщенности коммутационными и защитными аппаратами. Токи КЗ в этих установках не превышают значений 5—6 кА. Учитывая эти особенности, а также высокую вероятность возникновения КЗ, важным является исследование режимов КЗ в условиях действующих электроустановок электростанций и подстанций.

Ниже приведены результаты комплекса натурных экспериментальных исследований, состоящих из расчетов и опытов металлических и дуговых коротких замыканий в системах постоянного тока электростанций и подстанций [13, 14]. Целью эксперимента являлись исследования процесса развития дуги и накопления данных по типовым условиям и уровням токов КЗ в конкретных цепях электростанций и подстанций. Было проведено более 200 металлических и 134 дуговых КЗ на присоединениях действующих щитов постоянного тока Назаровской ГРЭС, Красноярской ГРЭС-2, подстанции «Камала» и др. Опыты проводились с помощью специальной установки на действующем электрооборудовании (см. рис. 2.1). Продолжительность КЗ выбиралась равной 0,1 с, что позволяло получить установившийся процесс КЗ, не изменяя уставок времени срабатывания защиты цепи ввода питания щита постоянного тока (ЩПТ). Питание ЩПТ осуществлялось от аккумуляторных батарей СК-20, СК-24. Экспериментальная установка подключалась к шинам ЩПТ с помощью кабеля КРПТ-2×70 мм<sup>2</sup> длиной 2 м.

Для создания металлического КЗ концы отходящего от установки кабеля КРПТ-2×95 длиной 2 м замыкались накоротко с помощью болтового соединения.

При проведении дуговых КЗ к установке подключалась специальная шинная конструкция, состоящая из отрезков шин АТ поперечным сечением 100×10 мм<sup>2</sup> длиной 0,8 м. Конструкция крепления шин позволяла изменять расстояние между ними от 0 до 300 мм и фиксировать их калиброванными распорками с шагом 10 мм. Для изменения тока КЗ в цепь замыкания включалась кассета из стальной полосы сечением 40 мм<sup>2</sup>. Кассета состояла из пяти секций, сопротивлением 125 мОм. Конструкция кассеты позволяла путем наложения перемычек менять суммарное сопротивление от 25 до 625 мОм. Инициирование дуги осуществлялось с помощью перемычек или вставок из алюминиевой фольги, медного проводника малого сечения, а также монтажного медного или алюминиевого проводов сечением от 1,5 до 4,0 мм<sup>2</sup>, металлических пластин или отрезка шины.

Различные способы возбуждения дуги позволили исследовать устойчивое горение дуги в различных условиях, определить влияние формы и материала вставки на развитие дуги при различных расстояниях между токоведущими частями и изменении токов КЗ.

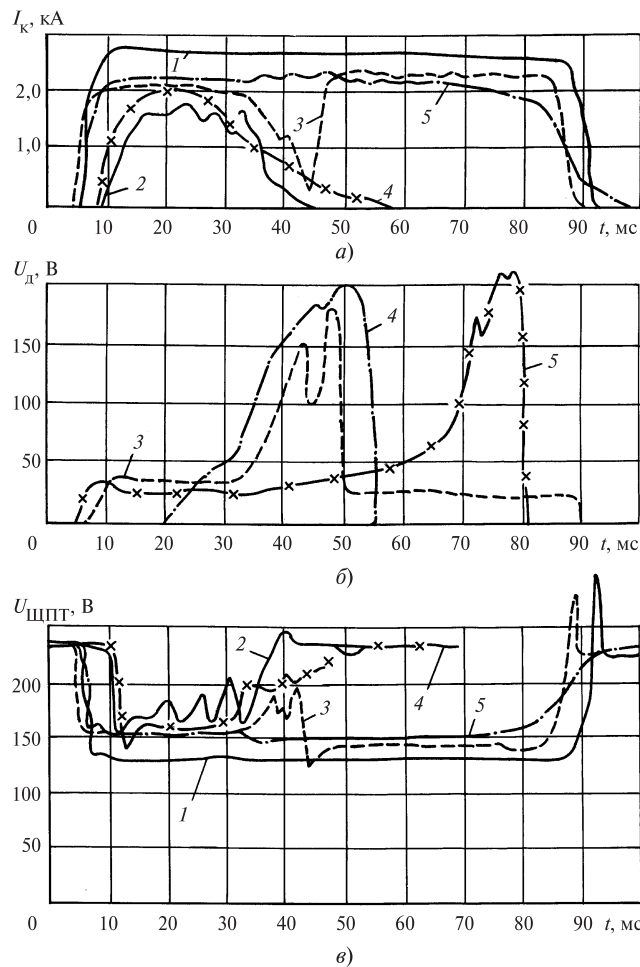
В ходе проведения исследований осуществлялось осциллографирование тока КЗ ( $I_k$ ), напряжения на выводах аккумуляторной батареи ( $U_{AB}$ ), напряжения на шинах ЩПТ ( $U_{ЩПТ}$ ) и напряжения на дуге ( $U_d$ ) при дуговых замыканиях.

**Металлическое короткое замыкание.** При проведении опытов КЗ было установлено, что металлическое КЗ в сети постоянного тока возникало лишь в случае установки массивной термически стойкой закоротки, которая создавала минимальное сопротивление переходных контактов между токопроводящими поверхностями, противодействуя электродинамическим силам, возникающим при протекании тока КЗ. Такие условия обеспечивались при креплении закороток с помощью струбцин или болтовых присоединений, а также в случае замыкания токопроводящих шин массивными закоротками, обеспечивающими достаточно хороший контакт под действием собственной массы, значительно превосходящей действие электродинамических сил.

Из осциллограммы тока металлического КЗ (рис. 2.14, кривая 1) видно, что ток металлического КЗ практически мгновенно достигает установившегося значения. Далее такое КЗ может существовать длительно, либо через некоторое время перейти в КЗ через дугу. Длительность металлического КЗ определяется степенью нажатия контактов (массы перемычки), а также возможностью отвода тепла от места КЗ.

Если не обеспечивается первое условие, то под действием электродинамических сил происходит отброс перемычки и КЗ имеет характер кратковременного импульса. Если не обеспечивается отвод тепла от точки КЗ происходит расплавление металла, последующее его испарение и возникает дуга. Сопоставление результатов опытов металлического КЗ с результатами расчетов, выполненных для этих же условий по методике, используемой в настоящее время проектными институтами указало на их удовлетворительное совпадение. Погрешность расчетов находится в пределах допустимой для практических расчетов (5—10 %) и зависит от точности определения параметров элементов короткозамкнутой цепи.

**Дуговое короткое замыкание.** При исследовании дуговых КЗ между токоведущими шинами установлено, что процесс развития дуги зависит от многих факторов. Во время натурных экспериментов более подробно исследовано влияние типа перемычки, расстоя-



**Рис. 2.14. Осциллограммы тока (а) и напряжения на дуге (б) и на шпите постоянного тока (в) при металлическом (1) и дуговых КЗ, вызванных различными перемычками:**

2 — тонкая алюминиевая фольга; 3 — алюминиевая шина, положенная плашмя; 4 — алюминиевая шина, положенная на ребро; 5 — медный стержень диаметром 8 мм

ния между шинами, значения тока КЗ или сопротивления короткозамкнутой цепи.

Влияние типа перемычки на процесс развития дугового КЗ показано на примере осциллограмм тока КЗ рис. 2.14. На рис. 2.14, а представлены кривые тока КЗ, полученные при одних и тех же условиях КЗ (одна и та же цепь КЗ, междуфазное расстояние  $a = 3$  см),

но при разных переключках, образующих КЗ. Кривые напряжения на дуге показаны на рис. 2.14, б, а на щите постоянного тока при тех же условиях КЗ — на рис. 2.14, в.

Для сравнения характеристик развития дугового КЗ на рис. 2.15 приведены также кривые тока и напряжения для случая металлического КЗ при сопротивлении цепи КЗ равном 56 мОм (кривая 1). Все виды КЗ (см. рис. 2.14) происходили в цепи, питаемой от аккумуляторной батареи СК-20. Смещение начала кривых вызвано неодновременным созданием КЗ и включением осциллографа. Процесс развития дуги в значительной степени определялся типом переключки или способом инициирования дуги. Так, при КЗ через тонкую алюминиевую фольгу последняя под действием высокой температуры мгновенно испарялась и КЗ имело характер кратковременного импульса тока (кривая 2). В зависимости от места установки переключки по отношению к концам экспериментальной шинной конструкции импульс тока продолжительностью 0,02—0,04 с. Объясняется это тем, что после возникновения дуга перемещалась к свободным концам шин и растягивалась. При этом напряжение и сопротивление дуги увеличивались, ток уменьшался и дуга гасла. Быстрому гашению дуги способствовала также интенсивная деионизация канала дуги под воздействием встречного воздушного потока.

При замыкании электродов отрезком алюминиевой шины, расположенной плашмя (размеры шины  $0,1 \times 10 \times 30$  см<sup>2</sup>), общая площадь контакта и масса шины при  $R_k = 75$  мОм обеспечили протекание тока близкого по значению и форме к условиям металлического КЗ (кривая 3). В течение КЗ в месте контакта поверхностей шин образовалась стабильная дуга. В середине процесса имело место увеличение сопротивления дуги, связанное с перемещением переключки под действием электродинамических сил.

Установка этой же шины-переключки на ребро привела к уменьшению площади контакта и увеличению мощности и сопротивления дуги ( $R_k = 162$  мОм). Дуга вызвала значительное снижение тока КЗ, имеющего форму кратковременного импульса (кривая 4).

Замыкание электродов отрезком медного стержня диаметром 8 мм привело к стабильному горению дуги. Об этом свидетельствует значение результирующего сопротивления цепи КЗ ( $R_k = 83$  мОм) близкое к значению при металлическом КЗ ( $R_k = 56$  мОм), а также характер изменения тока КЗ (кривая 5). Падение напряжения на дуге промежутке составляло примерно 40 В.

Приведенные на рис. 2.14, б кривые изменения напряжения на щите постоянного тока показывают влияние КЗ при различной их удаленности на характер изменения остаточного напряжения уста-

новки постоянного тока. В зависимости от значения сопротивления цепи КЗ, а также условий протекания КЗ, остаточное напряжение изменялось. Таким образом, при анализе аварий в реальных условиях эксплуатации необходимо уделять большое внимание типу и материалу металлической перемычки, приводящей к КЗ.

Характер поведения дуги постоянного тока, горящей между параллельными шинами зависит от расстояния между ними. Это объясняется тем, что в первый момент перекрытия пространства между шинами, дуга имеет длину, равную расстоянию между ними. Такие условия относятся к случаям образования дуги с помощью проводника небольшого сечения.

При замыкании через металлические шинки или пластинки увеличение длины дуги может наблюдаться вследствие перемещения перемычки под действием электродинамических сил. На рис. 2.15, а приведены осциллограммы тока КЗ, полученные при КЗ в одной и той же цепи, но при разных расстояниях между проводниками. Исследуемая цепь подключалась к аккумуляторной батарее СК-24.

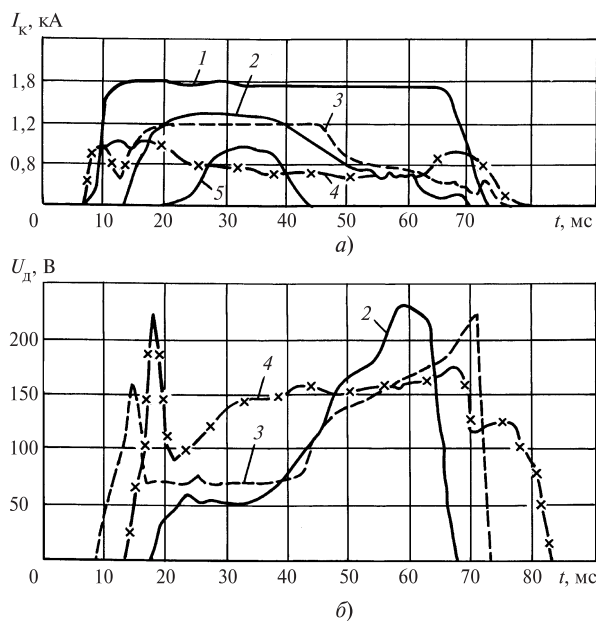


Рис. 2.15. Осциллограммы тока (а) и напряжения на дуге (б) при металлическом (1) и дуговых КЗ при различных расстояниях между шинами:

2 —  $a = 1$  см; 3 —  $a = 3$  см; 4 —  $a = 5$  см; 5 —  $a = 7$  см

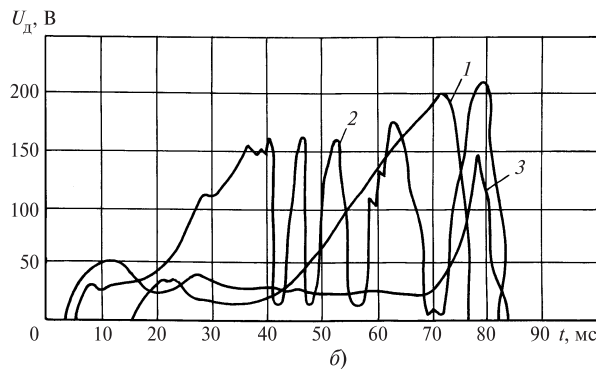
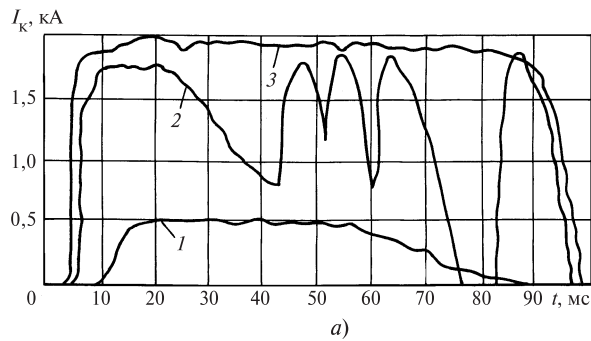
Во всех случаях короткое замыкание было инициировано с помощью медного проводника небольшого сечения. При металлическом КЗ (кривая 1) сопротивление цепи КЗ, включая внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи, составило 140 мОм.

С увеличением расстояния между токопроводящими шинами ( $a = 1, 3, 5, 7, 9, 11$  см) и увеличением длины дуги деионизация дугового канала протекала более интенсивно и процесс горения дуги становился неустойчивым (кривые 2, 3, 4 и 5). Сопротивление цепи КЗ изменялось следующим образом: при  $a = 1$  см,  $R_k = 300$  мОм;  $a = 3$  см,  $R_k = 304$  мОм;  $a = 5$  см,  $R_k = 460$  мОм;  $a = 7$  см,  $R_k = 502$  мОм.

При уменьшении расстояния между шинами до 1 см скорость перемещения дуги под действием магнитного поля уменьшалась, интенсивность деионизации канала дуги снижалась и стабильное горение дуги наблюдалось при токах КЗ 500—1600 А.

Приведенные на рис. 2.15, б кривые изменения падения напряжения на дуге показывают сложность и нестабильность процесса в дуговом промежутке КЗ. При уменьшении тока напряжение дуги резко увеличивалось и наоборот. Так, для случая замыкания при  $a = 1$  см в промежутке времени устойчивого горения дуги напряжение составляло 50 В, при уменьшении тока — 230 В. Последнее указывает на сложный характер изменения активного сопротивления дуги и отражает трудности определения его среднего значения для использования в расчетах токов КЗ.

Исследования влияния тока на процесс развития дугового КЗ при одних и тех же условиях показано на рис. 2.16. Изменение тока в короткозамкнутой цепи осуществлялось включением в цепь дополнительных активных сопротивлений. Приведенные на рисунке кривые тока КЗ получены при следующих условиях: источником питания цепи являлась аккумуляторная батарея СК-20, расстояние между шинами составляло  $a = 3$  см, переключатель создающая КЗ представляла собой алюминиевую шину, расположенную плашмя. В одних и тех же условиях развития КЗ в месте повреждения, характер протекания дугового КЗ определялся значением тока в месте повреждения. При относительно небольшом токе (кривая 1,  $R_k = 557$  мОм) электродинамические силы не перемещали переключатель и возникающая дуга при небольшом промежутке горела устойчиво. При увеличении тока (кривая 2,  $R_k = 136$  мОм) возникала пульсация электродинамических сил соизмеримых с массой шинной переключателя, последняя отталкивалась, увеличивая или уменьшая длину дуги. Процесс развития дугового КЗ был неустойчив. Дальнейшее увеличение тока (кривая 3,  $R_k = 95$  мОм) привело к устойчивому развитию дугового процесса.



**Рис. 2.16. Осциллограммы тока (а) и напряжения на дуге (б) при дуговых КЗ в цепях, имеющих разные сопротивления:**

1 —  $R_k = 557 \text{ мОм}$ ; 2 —  $R_k = 136 \text{ мОм}$ ; 3 —  $R_k = 95 \text{ мОм}$

Влияние тока на процесс развития дугового КЗ можно увидеть также на экспериментальных кривых рис. 2.14 и 2.15.

В результате экспериментов было выявлено, что значительное количество аппаратов защиты установленных в сетях постоянного тока электростанций и подстанций не удовлетворяют требованиям чувствительности к коротким замыканиям в конце защищаемого участка. Расцепители с независимой характеристикой срабатывания (отсечки) выключателя типа АВМ вводов рабочего и резервного питания ЩПТ, как правило, не чувствительны к токам дуговых замыканий на шинах ЩПТ. Поэтому для повышения надежности работы аппаратов защиты возникла необходимость рекомендовать обслуживающему персоналу установку выносных защит, действующих на независимый расцепитель этих выключателей.



Для статистического анализа значений тока и напряжения на дуге обработка осциллограмм производилась с помощью преобразователя графиков Ф018, позволяющего переводить кривую любой формы в цифровой код. С помощью ЭВМ код переводился в печатный вариант, который по специальной программе подвергался математической обработке.

Средние (действующие) значения тока и напряжения определяются по формулам

$$I_{\text{к.д.ср}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} I_{\text{к.д}}^2(t) dt};$$

$$U_{\text{д.ср}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{T_1}^{T_2} U_{\text{д}}^2(t) dt}.$$

Степень снижения максимальных и средних значений тока определяется коэффициентом снижения тока КЗ:

$$K_{\text{д max}} = I_{\text{к.д}} / I_{\text{к.м}};$$

$$K_{\text{д.ср}} = I_{\text{к.д.ср}} / I_{\text{к.м.ср}};$$

где  $I_{\text{к.д}}$  — максимальное или амплитудное значение тока дугового КЗ, А;  $I_{\text{к.м}}$  — максимальное значение тока металлического КЗ, А;  $I_{\text{к.д.ср}}$  — среднее значение тока дугового КЗ, которое определяется как действующее значение на всей продолжительности КЗ, А;  $I_{\text{к.м.ср}}$  — действующее или среднее значение тока металлического КЗ, А.

Необходимость определения величины  $I_{\text{к.д.ср}}$  вызвана тем, что действующее (среднее) значение тока металлического КЗ всегда несколько ниже установившегося амплитудного значения за счет переходного процесса в расчетный момент замыкания. Эксперименты показали, что степень уменьшения тока при дуговом замыкании зависит от сопротивления цепи замыкания. При уменьшении сопротивления цепи и увеличении тока КЗ степень снижения тока увеличивается.

Распределение коэффициента  $K_{\text{д}}$  определялось на ЭВМ с помощью программы, позволяющей рассчитать вероятность нахождения величин  $K_{\text{д max}}$ ,  $K_{\text{д.ср}}$  при выбранном интервале сопротивления цепи КЗ [62]. Выборка значений  $K_{\text{д}}$  производилась для сопротивления цепи замыкания  $R = 50—700$  мОм с шагом  $R_{\text{к}} = 50$  мОм. Для каждого шага  $R_{\text{к}}$  был проведен анализ произвольных выборок, построены гистограммы распределения результатов расчета коэффициента  $K_{\text{д}}$ ,

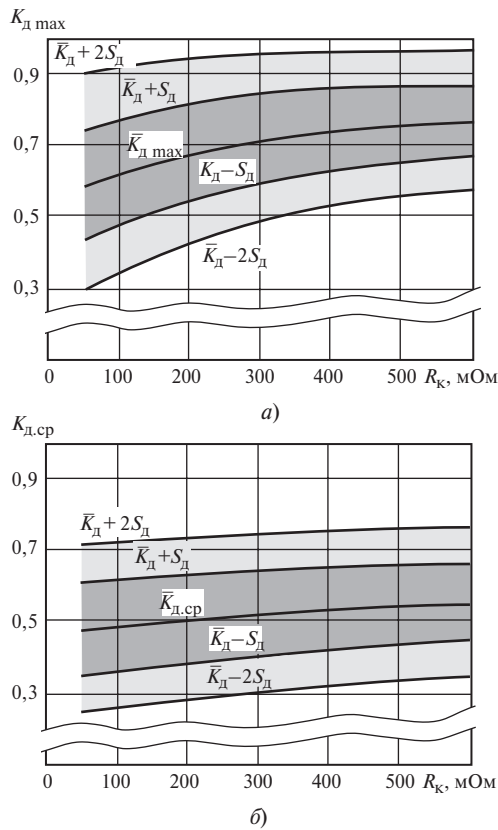


Рис. 2.17. Зависимости коэффициента  $K_d$  от сопротивления цепи КЗ  $R_k$ :

а — для максимальных значений  $K_d$ ; б — для среднеквадратичных значений  $K_d$

определены средние значения, дисперсия, критерий нормальности, рассчитаны погрешности среднего значения  $K_d$  и погрешности среднеквадратичного отклонения.

В результате обработки осциллограмм были рассчитаны вероятностные характеристики степени влияния электрической дуги на ток КЗ. Характеристики представлены в виде кривых зависимости  $K_d = f(R_k)$  для максимальных (рис. 2.17, а) и среднеквадратичных значений  $K_d$  (рис. 2.17, б). С помощью вероятностных характеристик, на которых приведен расчетный доверительный интервал  $S_d$ , можно рассчитать значения токов КЗ, которые имеют разные зоны рассеяния (при  $K_d \pm S_d$  — 68,27 %; при  $K_d \pm 2S_d$  — 95,45 %) по отношению к среднему значению.

#### Анализ результатов экспериментальных исследований.

В реальных эксплуатационных условиях могут иметь место, *самопогасающиеся, прерывистые и устойчивые* дуговые КЗ.

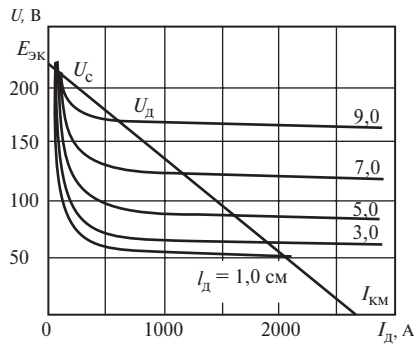
Электрическая дуга гаснет, если по каким-то причинам не обеспечивается необходимый температурный режим плазменного канала и катодного пятна. Это происходит тогда, когда нарушается электротепловой баланс энергий, например, при быстром растяжении дуги и отрыве ее от катодного пятна под действием газового дутья и электромагнитных сил. Наиболее часто это наблюдается при больших токах, а также при значительных расстояниях между шинами (проводниками) [см. рис. 2.14 (кривая 2), рис. 2.15 (кривая 5)].

Дуга может прерываться, т.е. гаснуть и восстанавливаться, если возникают условия существования такого режима: неполная деионизация дугового пространства и быстрый рост напряженности электрического поля после погасания дуги. Этот режим характеризуется значительными изменениями тока и напряжения дуги. Он может возникнуть, когда металлическая перемычка под действием электродинамических сил отталкивается и снова касается электродов или шин [см. рис. 2.16 (кривая 2)].

Дуга может гореть устойчиво, но только при свободном, беспрепятственном ее движении в электромагнитном поле шин. Такой режим наиболее вероятен при электрической дуге небольшой мощности. При движении свободной дуги по шинам обычно мало изменяются длина и напряжение дуги, в большей степени может изменяться ток. Полной стабильности всех параметров режима в естественных условиях не наблюдается [см. рис. 2.14 (кривая 5), рис. 2.16 (кривая 3)].

По данным исследований процесса перемещения дуги, приведенных в [15], скорость перемещения дуги в определенных условиях при токе 1000 А может составлять примерно 25 м/с, а при токе 6000 А достигает 150 м/с. Такие скорости перемещения дуги под воздействием электромагнитного поля характерны при расстояниях между токопроводящими шинами 10 мм и более. Большая скорость перемещения дуги способствует быстрой деионизации канала дуги под действием встречного воздушного потока и дуга гаснет. Проведенные опыты подтвердили, что при расстоянии между шинами более 10 мм и токах КЗ более 500 А деионизация и погасание дуги происходят в течение 30—50 мс.

Анализ результатов опытов КЗ выполнялся по статическим и динамическим характеристикам электрической дуги [16, 17]. Статическая вольт-амперная характеристика свободной дуги представляет собой гиперболу, смещенную по оси ординат на значение, соответствующее минимальному напряжению дуги при минимальной ее длине ( $l_d$ ), равной расстоянию между проводниками. При пересечении вольт-амперной характеристики дуги  $U_d = f(I_d)$  с реостатной характеристикой сети  $U_c = f(I_d)$  в двух точках, только одна из них отражает возможность устойчивого горения дуги. Согласно критерию Кауфмана устойчивость обеспечена в той точке, в которой выполняется условие:  $dU_d/dI_d + R_k > 0$ . На рис. 2.18 представлены статические характеристики, построенные для экспериментальных условий КЗ при различных расстояниях между шинами. Статические характеристики помогают исследовать области устойчивого горения электрической дуги. Следует отметить, что статический характер горе-



**Рис. 2.18.** Реостатная характеристика сети  $U_c = f(I_d)$  и статические внешние характеристики электрической дуги  $U_d = f(I_d)$  при различных длинах дуги ( $I_d = 1, 3, 5, 7, 9$  см):

$I_{к.м}$  — ток металлического КЗ;  $E_{эк}$  — эквивалентная ЭДС источников

ния дуги наблюдается только при малых токах (порядка десятков ампер), при больших токах горение сопровождается колебаниями тока и напряжения вследствие действия на дугу электродинамических сил.

Анализ динамических характеристик электрической дуги на базе опытных данных проведен с помощью графов, представляющих собой приближенное отображение траектории изменения режима электрической дуги в поле параметров  $U_d, I_d$ . Анализ графов позволяет выявить некоторые закономерности и случайные факторы, а также оценить степень влияния отдельных факторов на дуговые процессы.

Анализ переходных режимов начальной фазы образования дугового КЗ, выполненный на базе графов электрических дуг (рис. 2.19) при КЗ на параллельных шинах при разных расстояниях между ними ( $a = 1; 3; 5$  см) и разных токах металлического КЗ ( $I_{к.м} = 377—3220$  А) позволяет сделать следующие выводы.

1. Токи, при которых происходило плавление закорачивающих проводников, как правило, обеспечивали образование электрических дуг (подбирались проводники соответствующего сечения).

2. В большинстве опытов начальный процесс формирования электрической дуги характеризовался существенным уменьшением тока, вызванным полным или частичным выгоранием проводника, а также автодутьем газового потока в зоне перемычки. Длительность процесса составляла 1—3 мс.

3. В начальной фазе формирования дуги электромагнитные и аэродинамические силы воздействовали согласно, быстро растягивали дугу и отрывали ее от катодного пятна, в результате чего напряжение дуги возрастало, а ток уменьшался. Как правило, дуга горела неустойчиво.

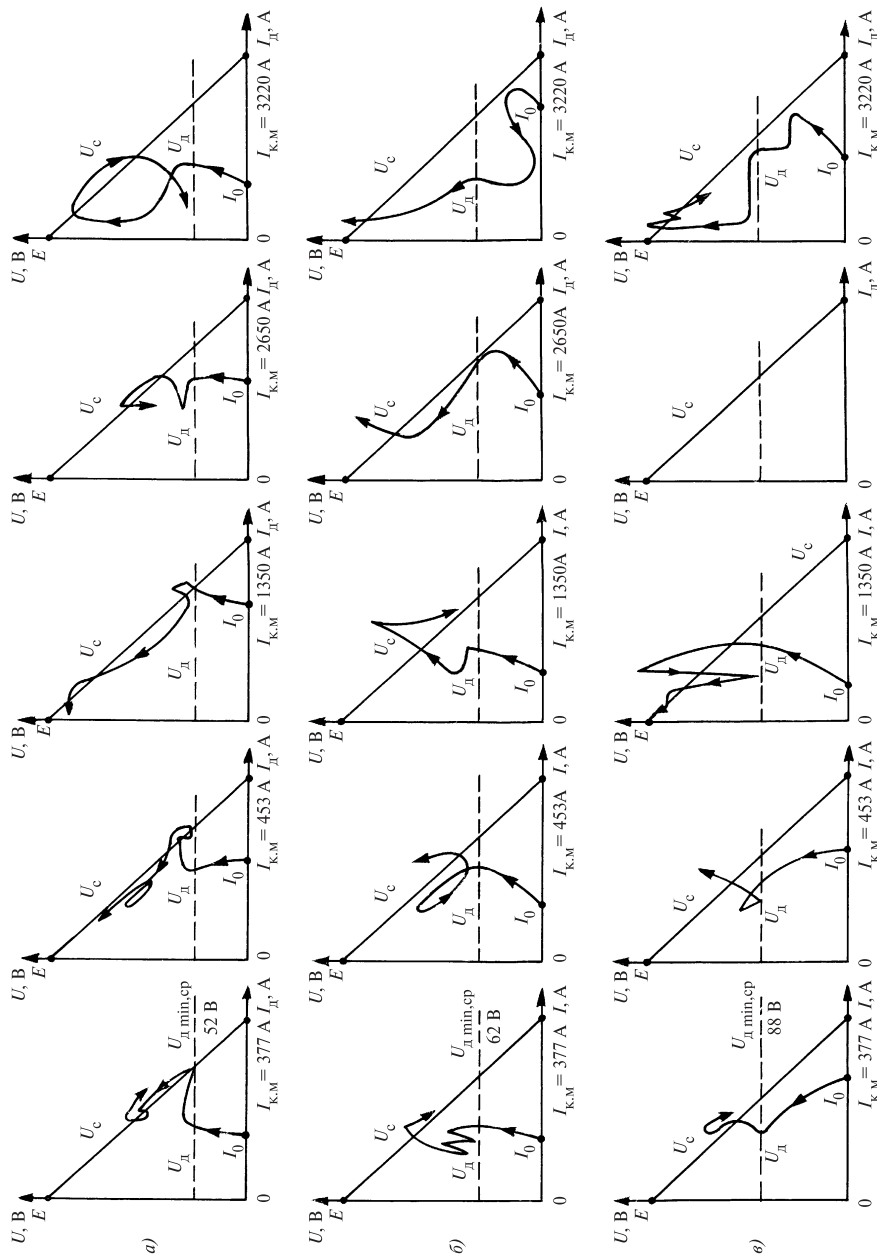


Рис. 2.19. Графы электрических дуг в начальной фазе переходных процессов при КЗ на параллельных шинах:

*a* —  $a = 1$  см; *б* —  $a = 3$  см; *в* —  $a = 5$  см

4. Если устойчивый режим горения дуги все же достигался, то через некоторое время дуга переходила в режим самопогасания вследствие растяжения, движения, охлаждения.

5. Выгорание и выброс закорачивающих проводников следует отнести к случайным факторам, определяющим процессы формирования и развития электрических дуг. Анализ осциллограмм показал, что при одинаковых опытах отсутствовала повторяемость переходных процессов. Поэтому интегральная оценка режимов дуговых коротких замыканий, равно как оценка коэффициентов спада токов, имеют вероятностный характер.

Примеры обработки данных натуральных экспериментов, приведенные ниже иллюстрируют динамические режимы электрических дуг в виде экспериментальных осциллограмм (рис. 2.20, 2.22) и вольт-амперных характеристик (рис. 2.21, 2.23).

На рис. 2.20 приведена осциллограмма напряжения электрической дуги, а на рис. 2.21 — граф режима и ампер-секундная характеристика дугового КЗ на участке параллельных шин при указанных условиях натурального эксперимента. Процессы здесь развиваются при следующих условиях, расстояние между шинами  $a = 1$  см, ток металлического КЗ  $I_{к.м} = 3250$  А, начальный ток в дуге  $I_{д0} = 1440$  А.

В интервале времени 7—10 мс происходит металлическое короткое замыкание ( $U_d = 0$ ). Ток возрастает примерно до 1140 А. Постоянная времени равна 0,0061 с и соответствует параметрам короткозамкнутой сети. В этом интервале нагревается и плавится закорачивающий проводник.

В интервале времени 10—14 мс проводник разогревается до температуры парообразования, испаряется и выбрасывается в окружающую среду, в результате чего парогазовый канал частично деионизи-

руется, его проводимость уменьшается. В этом интервале времени ток в канале уменьшается, а напряжение между шинами резко увеличивается от 1 до 80 В, т.е. от падения напряжения на проводнике до напряжения, при котором начинается процесс формирования дуги. Далее парогазовый канал разогревается до высокой температуры, при которой формируется уже плазменный канал.

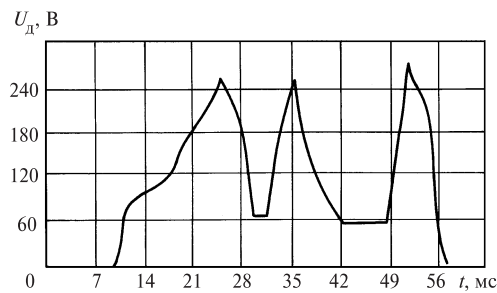


Рис. 2.20. Осциллограмма напряжения дуги при экспериментальном КЗ на участке параллельных шин:

$a = 1$  см;  $I_{к.м} = 3250$  А;  $I_{д0} = 1140$  А

В интервале времени 14—25 мс электрическая дуга перемещается в поперечном направлении к краям шин. При этом она испытывает растяжение от воздействия поперечной силы, в результате чего напряжение дуги увеличивается до 105—110 В. Под действием автогазового дутья ток дуги продолжает уменьшаться и достигает критического значения ( $I_{д.кр} = 0,18I_{д0}$ ). При таком токе дуга стремится погаснуть, но в зоне горячих электродов при напряжении 160 В она вновь разгорается. Длина дуги увеличивается до 10 см, скорость смещения фронта дуги — до 16 м/с, смещение дуги — до 20 см. В результате напряжение дуги возрастает до 240 В. При этом условия ионизации и деионизации дугового промежутка таковы, что происходит электрический пробой между шинами, причем вблизи фронта дуги.

В интервале времени 25—30 мс имеет место пробой ионизированного газа в приэлектродных зонах (наиболее вероятно в катодной зоне), т.е. возникает новая дуга. Далее происходит резкое уменьшение длины дуги и соответственно ее напряжения от 240 до 62 В. Скорость пробоя зависит от многих факторов, например, от состояния электрического поля, скорости погасания старой дуги, скорости движения новой дуги и т.д. Длительность процесса может составлять 1—6 мс.

В интервале времени 30—32 мс короткая электрическая дуга свободно перемещается вдоль шин со скоростью 25 м/с, практически не

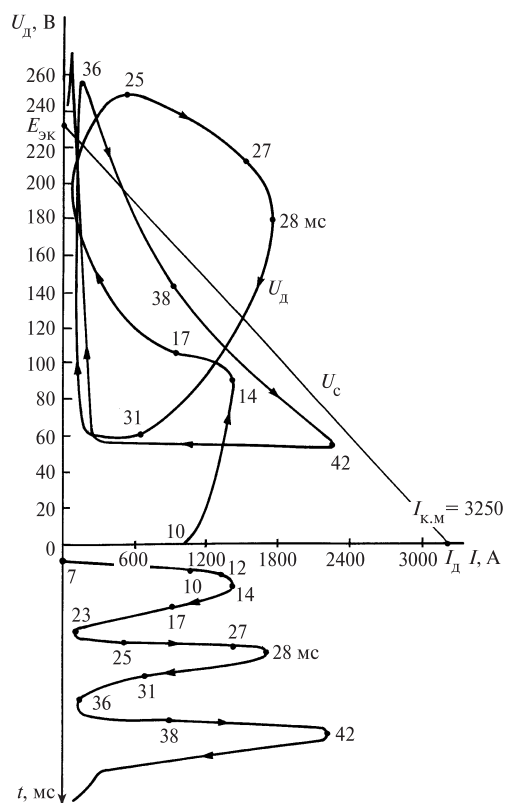


Рис. 2.21. Граф режима и ампер-секундная характеристика экспериментального КЗ на участке параллельных шин:

$a = 1$  см;  $I_{к.м} = 3250$  А;  $I_{д0} = 1140$  А

изменяя своей длины ( $l_d = a$ ), так как опорные точки перемещаются вместе с дугой в холодную, слабоионизированную зону. Поэтому ток дуги, возросший при пробое, резко уменьшается и становится меньше критического тока. При этом состояние электрического поля и условия термической эмиссии ионов таковы, что дуга уже не может оторваться от опорных точек и растягивается электромагнитными силами.

В интервале времени 32—36 мс электрическая дуга вначале стремится погаснуть, при этом напряжение дугового промежутка существенно увеличивается. При напряжении 160 В и выше дуга разгорается и ток дуги начинает возрастать. В конце интервала напряжение дуги достигает 250 В (холодные электроды) и происходит пробой.

В интервале времени 36—42 мс происходит пробой дугового промежутка, который сопровождается резким уменьшением напряжения дуги и увеличением тока. Из осциллограммы на рис. 2.20 видно, что напряжение уменьшается медленно. Это, вероятно, происходит вследствие относительно небольшой скорости изменения потерь энергии в местах соприкосновения дуги с токоведущими шинами, задержки рассеяния энергии в хвостовой зоне дуги.

В интервале времени 42—56 мс электрическая дуга перемещается вдоль шин со средней скоростью 40 м/с, без изменения длины ( $l_d = a$ ), достигает конца шин и растягивается. При напряжении 275 В происходит пробой дугового промежутка (на концах шин, холодных электродах), однако дуга гаснет из-за существенного уменьшения тока.

Приведенные на рис. 2.22 осциллограмма напряжения электрической дуги и на рис. 2.23 граф режима и ампер-секундная характеристика дугового КЗ на участке параллельных шин отражают условия натурального эксперимента, значительно отличающиеся от предыдущих, а именно ток металлического КЗ на порядок меньший ( $I_{к.м} = 377$  А) при  $a = 3$  см.

В интервале времени 8—10 мс происходит металлическое короткое замыкание ( $U_d = 0$ ). Ток возрастает примерно до 160 А. Постоянная времени равна 0,00327 с и соответствует параметрам короткозамкнутой сети. В этом интервале нагревается и плавится закорачивающий проводник.

В интервале времени 10—16 мс происходят процессы нагрева и испарения проводника, формирования дуги и ее удлинения под действием электромагнитных сил, а также пробой дугового промежутка. Напряжение пробоя составляет примерно 210 В, так как при  $a = 3$  см имеет место быстрая деионизация парогазового пространства.



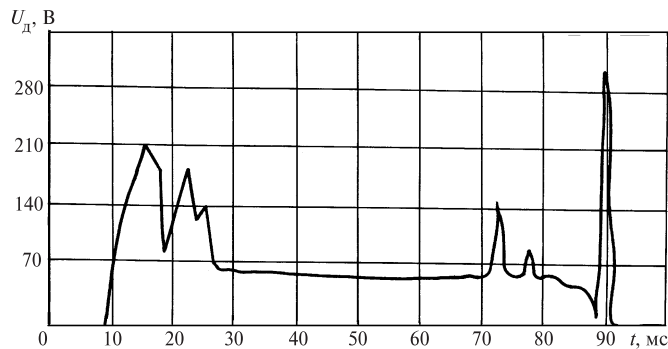


Рис. 2.22. Осциллограмма напряжения дуги при экспериментальном КЗ на участке параллельных шин:

$a = 3$  см;  $I_{к.м} = 375$  А;  $I_{д0} = 10$  А

В интервале времени 16—19 мс осуществляется первый пробой дугового промежутка. Он характеризуется вначале уменьшением тока дуги, а затем его увеличением. Минимальное напряжение дуги соответствует потерям электрической мощности и тепла, а также степени деионизации промежутка в горячей зоне электродов, и составляет примерно 80 В.

В интервале времени 19—24 мс происходит растяжение дуги и второй пробой дугового промежутка, уже в относительно холодной зоне электродов, поэтому минимальное напряжение дуги составляет 120 В.

В интервале времени 24—30 мс (температура дуги увеличивается) дуга

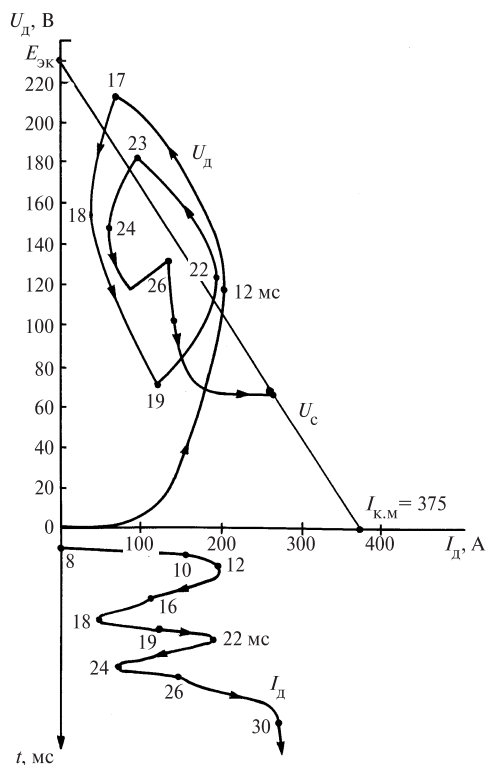


Рис. 2.23. Граф режима и амперсекундная характеристика экспериментального КЗ на участке параллельных шин:

$a = 3$  см;  $I_{к.м} = 375$  А;  $I_{д0} = 10$  А

нагревается, формируется новое катодное пятно, возникает устойчивый установившийся режим горения дуги (дуга саморазрушается по истечении времени 70 мс).

Анализ осциллограмм показал, что почти во всех опытах начальная фаза режима дугового КЗ резкопеременная. Она обусловлена переходом металлического короткого замыкания в дуговое, при этом возникший ток, уменьшается, а напряжение увеличивается. Далее характер изменения этих параметров зависит от многих факторов.

При сравнительно небольших токах, 200—400 А, переходная фаза режима обычно кратковременная. Влияние естественного газового дутья, быстро ослабевает после чего наступает устойчивый режим горения дуги. При этом дуга движется вдоль шин небольшими скачками, легко отрывается от анодных и катодных пятен и не растягивается.

При токах 400—700 А дуга перемещается по параллельным шинам уже заметными скачками, периодически растягивается и укорачивается в интервалах времени до 5 мс. Она то погасает, то разгорается на новом месте, тем самым продлевая свое существование. Такой режим горения дуги, естественно, вызывает импульсы напряжения и колебания тока в электрической цепи.

При сравнительно больших токах, 700—1500 А, импульсы напряжения и колебания тока становятся значительными, они увеличиваются при перемещении дуги в холодную зону, удаленную относительно точки ее возникновения. Как показывает анализ, в начальной фазе формирования дуги часто возникают значительные потери мощности. В этом случае вероятность погасания дуги возрастает.

При токах 1500—3500 А электрическая дуга может загореться только при небольших расстояниях между шинами (1—2 см) и существовать непродолжительное время (10—20 мс). Газовый пузырь высокого давления и возникающая взрывная турбулентность охлаждающей среды способствуют разрушению дуги уже в начальной фазе ее формирования,

#### **2.4. Увеличение активного сопротивления проводников при коротком замыкании**

Наиболее достоверными данными по эффекту увеличения активного сопротивления проводников вследствие их нагрева током КЗ являются результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные значения коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей  $K_{\varrho}$  получены по данным натурных испытаний, проведенных совместно кафедрой электрических станций МЭИ,

НИЦ высоковольтной аппаратуры и Союзтехэнерго. Испытания проводились при разных условиях КЗ в 1970 и 1986—1987 гг.

Целью проведения натурных испытаний в 1970 г. являлось экспериментальное определение предельно допустимой температуры кабеля и его концевых заделок по условию механической прочности и пожаростойкости. Несмотря на то, что исследования проводились на переменном токе, результаты опытов с небольшой погрешностью, связанной с эффектом вытеснения тока, могут распространяться на проводники обтекаемые постоянным током.

Программой испытаний предусматривалось исследование кабелей марок ААБГ и ААШВ в режиме трехфазного КЗ на отрезках кабеля длиной 4—5 метров. Экспериментальный стенд подключался к ударному генератору условной мощности  $75 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  через понижающий трансформатор ОМИ-10 000 кВ · А. Опыты проводились при пониженном напряжении 200—300 В. Продолжительность КЗ изменялась в интервале 0,04—3 с. Во время испытаний определялись токи, напряжения и температура кабеля в различных точках. Некоторые результаты экспериментов приведены в табл. 2.4, при этом обозначены:  $i_{\text{уд}}$  — ударный ток КЗ;  $I_{\text{к}}^{(3)}$  — среднее действующее значение тока за время КЗ;  $t_{\text{откл}}$  — продолжительность КЗ;  $\vartheta_{\text{н}}$  и  $\vartheta_{\text{кн}}$  — температура жилы кабеля до КЗ и в конце КЗ.

По данным эксперимента определялись значения коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей  $K_{\vartheta}$  для различных условий КЗ:

$$K_{\vartheta} = \frac{\tau_{\text{р}} + \vartheta_{\text{кн}}}{\tau_{\text{р}} + \vartheta_{\text{н}}},$$

где  $\tau_{\text{р}}$  — условная температура, определяющая зависимость удельного сопротивления материала жил кабеля от температуры: для меди  $\tau_{\text{р}} = 234 \text{ }^{\circ}\text{С}$ , для алюминия  $\tau_{\text{р}} = 236 \text{ }^{\circ}\text{С}$ .

Исследуемые кабели подвергались действию тока КЗ от 6,4 до 44 кА, что соответствовало реальным условиям КЗ и приводило к разрушению многих исследуемых образцов кабеля. Конечная температура нагрева для всех опытов была различна и зависела от начальной температуры кабеля, среднего действующего значения тока за время КЗ и продолжительности КЗ. Коэффициент  $K_{\vartheta}$ , значительно отличающийся от единицы показывает, что активное сопротивление кабелей увеличивается к моменту отключения КЗ в 1,41—3,46 раза.

Зависимость коэффициента  $K_{\vartheta}$  от начальной температуры кабеля можно показать, сравнивая результаты двух опытов, например 9 и 10

Таблица 2.4

Номер опыта	Ток КЗ, кА		$t_{откл}, c$	Температура жилы, °С		$K_g$
	$i_{уд}$	$I_k^{(3)}$		$\vartheta_n$	$\vartheta_{кн}$	
Кабель ААБГ 3×120-10						
1	24	10,4	1,5	63	315	1,84
2	30	13,2	1,5	90	448	2,10
3	43	18,9	0,5	75	202	1,41
4	48,5	22,3	0,5	100	321	1,66
5	56	24,9	0,5	90	475	2,18
6	72	32	0,2	48	334	2,00
7	85	34	0,2	87	386	1,93
8	95	44	0,14	30	346	2,19
9	25	11,7	1,5	25	211	1,71
10	24,2	11,4	1,5	75	259	1,59
Кабель ААШВ 3×120-6						
11	25,8	10,3	1,5	22	216	1,75
12	15	6,7	1,5	23	218	1,75
13	19	9	1,5	51	510	2,60
14	24	11	1,5	58	782	3,46
15	60	27	0,1	18	243	1,88
16	75	35	0,1	22	510	2,89
17	8,0	5,6	3,0	12	160	1,60
18	8,5	6,2	3,0	48	320	1,96
19	9	6,4	3,0	60	430	3,05
20	12,7	8,4	2,5	60	760	3,36
21	28	18,4	0,5	24	508	2,86

(см. табл. 2.4), при которых  $\vartheta_n = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $75 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $I_k = 11,7 \text{ кА}$  и  $11,4 \text{ кА}$ ;  $t_{откл} = 1,5 \text{ с}$ ) и соответственно  $K_g = 1,71$  и  $K_g = 1,59$ .

Влияние продолжительности КЗ на коэффициент  $K_g$  особенно наглядно для опытов 12 и 19 (см. табл. 2.4), по которым сопоставляются значения коэффициента ( $K_g = 1,75$  и  $3,06$ ) при  $t_{откл} = 1,5$  и  $3 \text{ с}$ . Бóльшей продолжительности КЗ соответствует бóльшая степень увеличения активного сопротивления кабеля.

Целью исследований испытаний, проводимых в 1986—1987 гг. являлось определение температуры возгорания бронированных и небронированных силовых кабелей с алюминиевыми (однопроволочными и многопроволочными) жилами с бумажной пропитанной изоляцией в алюминиевой оболочке с изоляцией типов Шв, БнлГ и БлГ при воздействии на них сквозных токов КЗ. Длина каждого исследуемого образца кабеля составляла 35 м. Описание условий проведения опытов приведено в [22]. Испытания кабелей проходили в режимах, соответствующих трансформатору мощностью 40 МВ·А собственных нужд электростанций. Параметры режимов испытаний приведены в табл. 2.5. Испытания проводились переменным током

Таблица 2.5

Номер опыта, расчет	Температура окружающей среды, $\vartheta_{\text{окр}}$ , °С	Ток в начальный момент КЗ, $I_{\text{к0}}^{(3)}$ , кА	Продолжительность КЗ, $t_{\text{откл}}$ , с	Ток в момент отключения КЗ, $I_{\text{кт}}^{(3)}$ , кА	Температура нагрева жилы кабеля к моменту отключения, $\vartheta_{\text{кн т}}$ , °С	$K_{\vartheta}$
Кабель ААШвУ 3×120-6						
1	12	23,72	0,6	15,6	217	1,83
Расчет	12	23,72	0,6	16,26	164,44	1,564
2	15	21,6	0,6	15,73	170	1,62
Расчет	15	21,6	0,6	15,43	150	1,507
3	20	21,59	0,6	15,28	215	1,76
Расчет	20	21,59	0,6	15,30	155,24	1,528
Кабель АБнлГ 3×120ож-6						
4	15	22,22	0,6	15,02	227	1,84
5	17	21,13	0,6	14,68	230	—
6	24	19,24	0,6	13,39	198	1,67
Расчет	24	19,24	0,6	14,14	136,2	1,454
7	25	18,25	0,6	13,99	188	1,71
Расчет	25	18,25	0,6	13,56	127	1,419
8	24	20,67	0,6	12,72	212	1,72
Расчет	24	20,67	0,6	14,83	149	1,504
9	24	21,55	0,6	14,28	240	1,83
Расчет	24	21,55	0,6	15,14	155,1	1,527
10	24	21,1	0,6	14,14	247	1,86
Расчет	—	—	—	—	—	—

Окончание табл. 2.5

Номер опыта, расчет	Бестоковая пауза, $t_{бр}$ , с	Ток в начальный момент повторного КЗ, $I'_{к0}$ , кА	Продолжительность КЗ, $t'_{откл}$ , с	Ток в момент отключения КЗ, $I'_{кт}$ , кА	Температура нагрева жилы кабеля к моменту отключения, $\theta_{кн \tau}$ , °С	$K_{\theta_2}$
1	0,56	15,95	1,0	13,34	395	2,54
Расчет	—	15,95	1,0	10,303	481,87	2,804
2	0,56	16,25	1,0	12,32	498	2,92
Расчет	—	16,25	1,0	10,599	456,03	2,703
3	0,58	16,25	1,2	11,68	490	2,84
Расчет	—	16,25	1,2	10,30	482,07	2,805
4	—	—	—	—	—	2,4
5	0,56	14,88	0,6	12,5	443	2,58
6	0,56	12,9	0,6	11,4	373	2,34
Расчет	—	12,9	0,6	10,604	319,82	2,171
7	0,56	12,64	0,6	11,4	344	2,22
Расчет	—	12,64	0,6	10,46	300,25	2,094
8	0,58	15,76	0,6	12,79	431	2,57
Расчет	—	15,76	0,6	7,667	340,26	2,251
9	0,56	15,08	0,6	12,3	500	2,83
Расчет	—	15,08	0,6	10,413	405,12	2,504
10	0,56	16,46	1,0	12	510	2,87
Расчет	—	16,46	1,0	10,05	451,95	2,687

Примечание. Погрешность расчета  $\Delta_{\phi} = \pm 7,63$  %.

частотой 50 Гц в режиме трехфазного КЗ. В качестве источников тока при внезапных и повторных КЗ использовались ударные генераторы ТИ-100 условной мощности 100 МВ · А каждый. При испытаниях измерялись токи КЗ в каждой фазе, температура нагрева токопроводящих жил и оболочки. Измерения температуры нагрева токопроводящих жил производились для каждого образца с помощью термпар типа ТХК, установленных вблизи концевых заделок. Температура окружающего воздуха во время испытаний составляла 12—25 °С.

Используя результаты испытаний, определялись коэффициенты увеличения активного сопротивления кабелей. В конце первого КЗ,

продолжительностью 0,6 с, температура нагрева кабеля во всех опытах была различной и зависела от начального значения тока КЗ. Коэффициент  $K_9$  составлял 1,62—1,86 и изменялся в зависимости от конечной температуры кабелей 170—247 °С.

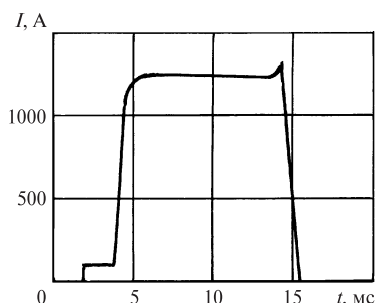
При повторном КЗ (после первого КЗ и бестоковой паузы продолжительностью 0,56—0,58 с) конечная температура нагрева жилы кабелей составляла 344—510 °С. Коэффициент  $K_9$  изменялся в пределах 2,12—2,92. Экспериментальные исследования показали, что при расчете токов КЗ необходимо учитывать увеличение активного сопротивления проводников вследствие их нагрева токами продолжительного режима и токами КЗ.

### **2.5. Влияние на ток коротких замыканий изменения параметров аккумуляторных батарей в процессе их эксплуатации**

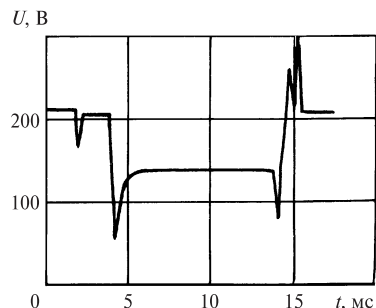
Опыт эксплуатации электроустановок постоянного тока показывает, что значительное влияние на ток КЗ оказывает зависимость параметров аккумуляторных батарей от таких факторов, как температура окружающей среды, степень разряженности и старения аккумуляторных батарей. Увеличение внутреннего сопротивления аккумуляторных батарей при снижении их емкости и температуры уменьшает уровень токов КЗ и приводит к потере чувствительности аппаратов защиты.

Результаты экспериментальных исследований изменения параметров свинцово-кислотных стационарных аккумуляторных батарей в зависимости от температуры окружающей среды и степени разряженности, необходимые для расчета токов КЗ приведены в [18—20]. Эксперименты проводились на действующих подстанциях ОАО «Мосэнерго» с аккумуляторными батареями, состоящими из стационарных свинцово-кислотных аккумуляторов зарубежного производства с пластинами GroE номинальной емкости 300 А·ч и отечественного производства СК-6 номинальной емкости 216 А·ч.

Нагрузочный резистор для создания тока разряда подключался за кабелем и головным автоматом батареи. Параллельно нагрузочному резистору подключалось устройство токов короткого замыкания (УТКЗ), позволяющее создать импульс тока определенного значения и длительности и зафиксировать осциллограммы тока и напряжения переходного процесса. Дополнительно проводилось осциллографирование напряжения на нескольких элементах батареи во время работ УТКЗ для определения сопротивления ошиновки, кабеля, головного автомата и контактных соединений, т.е. сопротивления внешней



**Рис. 2.24.** Осциллограмма тока при двухступенчатом разряде аккумуляторной батареи

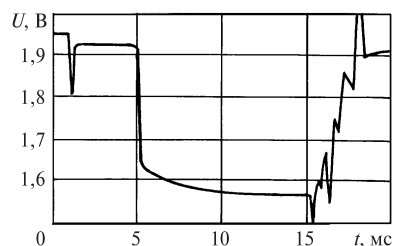


**Рис. 2.25.** Осциллограмма напряжения на устройстве токов короткого замыкания

цепи и внутреннего сопротивления аккумуляторов. Сопротивление внешней цепи определялось также изменениями тока и напряжения.

Определение ЭДС и внутреннего сопротивления заряженного аккумулятора, находящегося в состоянии равновесия, проводилось УТКЗ до подключения нагрузочного резистора. После подключения нагрузки также проводились замеры УТКЗ. По полученным УТКЗ осциллограммам тока и напряжения определялись ЭДС и внутреннее сопротивление аккумуляторов.

На рис. 2.24 и 2.25 представлены осциллограммы тока, созданного УТКЗ, и напряжения на зажимах УТКЗ, на рис. 2.26 — осциллограмма напряжения на одном из аккумуляторов батареи. Существенное отличие осциллограммы напряжения непосредственно на аккумуляторе от напряжения на УТКЗ в первые 1—2 мс переходного процесса обусловлено индуктивностью кабеля, тогда как внутреннее сопротивление аккумулятора имеет емкостной характер. По двухступенчатым осциллограммам тока и напряжения определялись ЭДС, напряжение разряда и внутреннее сопротивление аккумуляторов.



**Рис. 2.26.** Осциллограмма напряжения на элементе батареи

Результаты исследований на подстанции с аккумуляторной батареей GroE, состоящей из 104 новых аккумуляторов, приведены на рис. 2.27 и 2.28. Результаты исследований на подстанции с устаревшей модификацией щита постоянного тока и двумя аккумуляторными батареями СК-6, вклю-



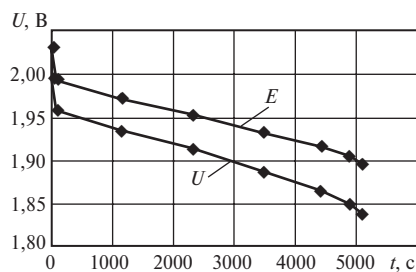


Рис. 2.27. Изменение напряжения и ЭДС на аккумуляторе GroE при разряде

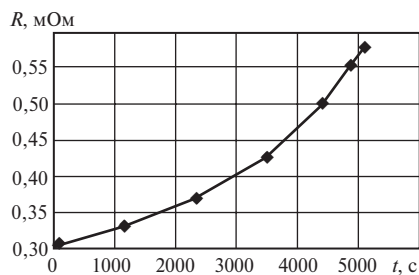


Рис. 2.28. Изменение внутреннего сопротивления аккумулятора GroE при разряде

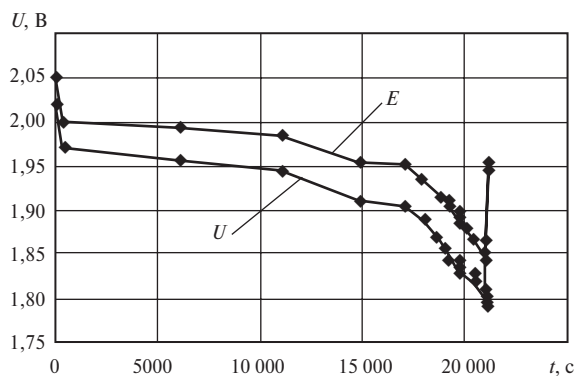
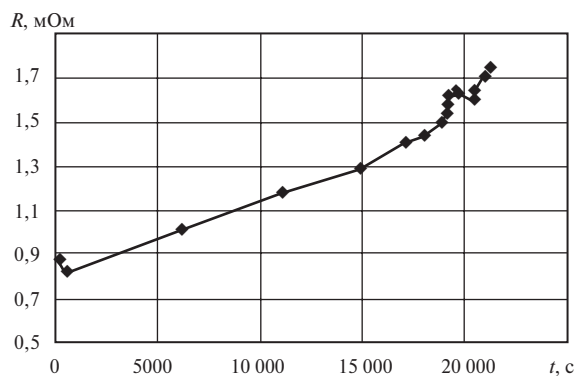


Рис. 2.29. Изменение напряжения и ЭДС на аккумуляторе СК-6 при разряде

чающей 56 элементов, и СК-12 из 108 элементов приведены на рис. 2.29 и 2.30.

Внутреннее сопротивление аккумулятора GroE при разряде в течение 5112 с увеличилось в 1,88 раза (от 0,305 до 0,574 мОм). Внутреннее сопротивление аккумулятора СК-6 при разряде в течение 21010 с увеличилось в 1,98 раза (от 0,873 до 1,725 мОм), что необходимо учитывать при расчете токов КЗ в электроустановках с аккумуляторными батареями.

В развитие экспериментальных исследований на подстанциях ОАО «Мосэнерго» была проведена диагностика электроустановок оперативного постоянного тока (ЭУ ОПТ), которая включала серию расчетов, выполненных по проектным данным и анализ данных экс-



**Рис. 2.30.** Изменение внутреннего сопротивления аккумулятора СК-6 при разряде

периментов [18]. В результате этого выделены следующие факторы, отрицательно влияющие на надежность работы ЭУ ОПТ.

1. В настоящее время используется устаревшая, противоречащая действующему с 1992 г. ГОСТ [21], методика расчета токов короткого замыкания в ЭУ ОПТ. В отраслевых методических указаниях по выбору защитных аппаратов, вышедших после введения стандарта [21], не учитываются в достаточной степени рекомендации по расчету токов короткого замыкания. Большинство проектов выполняются на основании упрощенных расчетов без комплексного учета сопротивления электрической дуги, сопротивлений разъемных контактов и токоведущих частей расцепителей, без учета зависимости сопротивления кабелей от температуры, зависимости параметров аккумуляторной батареи от температуры окружающей среды и степени ее разряженности. Значение токов короткого замыкания, полученные по упрощенным методикам, могут превышать фактические токи в 2—3 раза. Следовательно, аппараты защиты, выбранные с минимальными запасами по коэффициенту чувствительности, оказываются неработоспособными. Необходимо отметить, что комплексный учет всех рекомендуемых ГОСТ 29176-91 факторов возможен лишь при выполнении расчетов на компьютере.

2. В проектной документации отсутствуют результаты расчетов токов короткого замыкания в ЭУ ОПТ, результаты проверки селективности и чувствительности, нет сведений о резервировании аппаратов защиты.

3. Производимые в процессе эксплуатации изменения ЭУ ОПТ, перекладка кабелей, замена аппаратов защиты и даже аккумулятор-

ных батарей не сопровождаются перерасчетом уставок и перенастройкой автоматических выключателей.

4. На многих подстанциях цепи постоянного тока сетей питания электромагнитов включения выключателей по проекту должны работать в разомкнутом режиме, а фактически их держат замкнутыми. Надежность операций включения при этом повышается, но становится возможной неселективная работа аппаратов защиты, в частности, неселективно может работать головной автоматический выключатель или предохранитель, что приводит к потере питания устройств РЗА.

5. Имеют место случаи использования в цепях постоянного тока автоматических выключателей, предназначенных для использования в цепях переменного тока, без учета влияния на защитные характеристики рода тока. Допускаются случаи параллельного включения нескольких полюсов выключателей в одном полюсе цепи, что снижает чувствительность выключателей в 2 раза. Нередко поврежденные автоматические выключатели заменяются выключателями другого типа без учета влияния сопротивления их расцепителей, достигающего значения единиц Ом, на уровень токов короткого замыкания.

6. Типовые схемы ЩПТ недостаточно приспособлены к выполнению профилактических работ. Не учитывается, что отечественные автоматические выключатели имеют малый межремонтный ресурс работоспособности. Например, по действующим техническим условиям на выключатели серии АЗ700, проверку работоспособности полупроводниковых блоков управления расцепителем следует проводить каждые 5000 ч, т.е. ежегодно. Автоматические выключатели серии АВМ, повсеместно страдающие разрегулированностью часовых механизмов, необходимо проверять не реже 1 раза в 3 года.

7. Не соблюдается периодичность и объем профилактических работ по автоматическим выключателям. Отсутствие резервного ввода питания от аккумуляторной батареи на ЩПТ, затрудненный доступ к головному выключателю и выключателям присоединений из-за чрезмерно плотной компоновки ЩПТ, отсутствие требуемых нагрузочных устройств — являются объективными причинами снижения качества эксплуатации ЭУ ОПТ.

8. Не заменяются, по истечении установленных нормами сроков хранения и эксплуатации, предохранители.

9. В преобладающем большинстве ЭУ ОПТ устройства релейных защит, автоматики, сигнализации и связи имеют общие цепи питания с цепями питания электромагнитов включения. Из-за неселективной работы головного аппарата защиты, обусловленной нарушениями в работе электромагнитных приводов выключателей и короткими замыканиями в их цепях, все устройства, предназначенные для

локализации аварий в первичных цепях подстанций, становятся не- работоспособными. Обеспечить селективную работу аппаратов за- щиты в цепях питания электромагнитных приводов сложно, так как ток удаленного дугового короткого замыкания соизмерим с номи- нальным током «тяжелых» электромагнитов распространенных мас- ляных выключателей У-220 и У-110.

10. Снижается надежность работы ЭУ ОПТ из-за эксплуатации аккумуляторных батарей, выработавших свой ресурс. На некоторых подстанциях эксплуатируются аккумуляторные батареи, введенные в работу более 25 лет назад. Емкость и внутреннее сопротивление таких батарей в 2 раза, отличающиеся от паспортных значений, при- водят к снижению уровня токов короткого замыкания и потере чув- ствительности автоматических выключателей. Необходимо отме- тить, что современные отечественные и импортные аккумуляторные батареи с намазными пластинами, обладая лучшими показателями по сравнению с батареями типа СК, имеют значительно худшие ре- сурсные характеристики.

11. Ухудшение параметров аккумуляторных батарей трудно про- контролировать. Даже контрольный разряд батареи не позволяет дать исчерпывающую оценку ее работоспособности, в частности, он не всегда позволяет выявить окисленные контактные соединения внутри батареи и на ее выводах. На большинстве подстанций имеет- ся всего одна аккумуляторная батарея, и устраивать ее контрольный разряд непросто и рискованно. На заводе ОЗАП «Мосэнерго» совме- стно с МЭИ разработано специализированное устройство для диаг- ностики аккумуляторных батарей УДБ, работающее совместно с комплексом УТКЗ. В основу диагностики положено измерение ди- намических характеристик ЭДС каждого аккумулятора батарей, при контролируемых токовых возмущениях. Устройство позволяет опе- ративно оценить остаточный ресурс батареи без проведения кон- трольных разрядов.

12. Электроустановки постоянного тока имеют коммутационные аппараты, установленные как в помещениях ЩПТ и ОПУ, так и в распределительных устройствах (во вводных ящиках), что приво- дит к увеличению числа ошибок оперативного персонала, особенно в аварийных ситуациях. Исчезновение напряжения в цепях питания релейных защит из-за срабатывания аппаратов защиты или из-за ошибочных действий персонала сопровождается световой и звуковой сигнализацией, но об исчезновении напряжения в цепях питания приводов можно узнать лишь после неудачной попытки включения силовых выключателей. Неуспешное АПВ, связанное с неготовно- стью цепей привода электромагнита включения, снижает надежность энергосистемы в целом. Очевидно, что введение контроля наличия

напряжения в цепях электромагнитов включения выключателей во много раз дешевле системной аварии, обусловленной отказом АПВ.

13. К распространенным видам повреждений относятся короткие замыкания на шинках управления КРУ, в релейных панелях, шкафах управления. Примерно 20 % таких коротких замыканий не локализируются из-за недостаточной чувствительности аппаратов защиты, а каждое четвертое из неотключенных коротких замыканий вызывает возгорание. Из-за того, что электропитание панелей релейных защит осуществляется радиальными цепями без устройства автоматического включения резерва, короткие замыкания в этих цепях приводят к длительному обесточиванию релейных защит. Приведение в рабочее состояние поврежденных цепей после коротких замыканий требует больших затрат времени и, как правило, сопровождается отключением силового первичного оборудования.

Для повышения надежности электроустановок оперативного постоянного тока необходимо:

- пересмотреть нормы проектирования в части выбора защитных аппаратов ЭУ ОПТ с учетом действующих государственных стандартов и опыта эксплуатации;

- предложить проектным институтам передавать заказчикам расчеты токов короткого замыкания в ЭУ ОПТ, а также обоснование выбираемых защитных аппаратов и их уставок;

- проверять действующие ЭУ ОПТ на соответствие применяемых защитных аппаратов реальным параметрам токов КЗ;

- ввести в практику эксплуатации регулярное комплексное обследование ЭУ ОПТ с целью проверки состояния аккумуляторных батарей и выявления дефектов коммутационных и защитных аппаратов;

- на ЩПТ предусматривать создание отдельных головных защитных аппаратов для цепей питания устройств защиты и автоматики и цепей питания электромагнитов включения;

- выполнить разукрупнение цепей питания релейных щитов, направленное на создание отдельных цепей рабочего питания для каждой панели и предусмотреть резервное питание панелей от секционированных шинок управления;

- на действующих ЭУ ОПТ иметь утвержденные оперативные схемы с параметрами защитных аппаратов и указанием нормального положения коммутационных аппаратов.

## 3 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ РЕЖИМОВ КЗ В СИСТЕМЕ ПОСТОЯННОГО ТОКА

---

### 3.1. Модель дуговых процессов при КЗ в цепи аккумуляторной батареи

Практически любое КЗ в электроустановках постоянного тока происходит через электрическую дугу. Как показали экспериментальные исследования для КЗ без электрической дуги (или металлического КЗ) необходимы определенные условия, а именно: плотное соединение разнополярных электродов, наличие специальной контактной поверхности и интенсивный отвод тепла от места КЗ. При реальных КЗ такие условия практически отсутствуют. Многочисленные опыты КЗ через дугу показали многофакторную зависимость характеристик дугового КЗ, которую можно проанализировать лишь при проведении теоретических исследований. При этом важным является получение общих закономерностей развития дуги, так как на их основе могут быть правильно определены значения и характер изменения токов КЗ, требования к чувствительности и быстродействию защиты.

Исследования и анализ динамических характеристик дуги постоянного и переменного токов возможны на основе аналитической модели нестационарной дуги. К первым работам этого направления относятся работы Майра и Кэсси [12]. Эти работы являются фундаментальными, поскольку отвлеченная модель динамической дуги и разработанные на ее основе методы расчета динамики цепей постоянного и переменного токов с дугой лежат в основе всех известных до настоящего времени работ в области динамических систем с дугой.

Анализ динамических характеристик дуги осуществляется по интегральному уравнению баланса энергии динамической дуги [12]:

$$\frac{dH(\tau)}{d\tau} = u_d i - P_n(\tau), \quad (3.1)$$

где  $H(\tau)$  — теплосодержание плазмы столба дуги и материала электродов;  $\tau$  — время;  $u_d i$  — мгновенное значение мощности дуги;  $P_n(\tau)$  — тепловые потери в электрической дуге при контакте с внешней средой.

Уравнение (3.1) является нелинейным потому, что функции  $H(\tau)$  и  $P_n(\tau)$  зависят от тока и напряжения дуги. Решение его в общем виде не представляется возможным. Однако при анализе динамических

характеристик и устойчивости дуги уравнение (3.1) может быть линеаризовано, полагая, что  $P_{II}(\tau) = \text{const}$  [12].

Предложенная Майром модель линеаризованной динамической дуги лежит в основе всех дальнейших работ в области исследования динамики и устойчивости цепей с дугой постоянного и переменного токов в сварочных установках (Б.Е. Патон, В.К. Лебедев [60]), в коммутационных аппаратах (О.Б. Брон, И.С. Таев, А.М. Залесский [10, 12, 35, 36]) и других областях электротехники. Авторами перечисленных работ, при расчете цепей с дугой переменного тока, обычно принималось, что кривая напряжения на всем полупериоде изменения тока имеет прямоугольную форму [ $u_d(t) = \text{const}$ ]. Анализ более поздних расчетных моделей дуги [23—25] показал, что многие из них имеют частный характер и относительно узкую область применения. Несмотря на описание динамических режимов дуги дифференциальными нелинейными уравнениями, ее модели часто имеют отвлеченный характер. Вместе с тем заслуживает внимание наиболее полное математическое описание дуги на базе модели Майра, дополненное учетом многих факторов дугового процесса и параметров электродуговой системы [16, 17].

Математическая модель электродуговой системы, приведенная в [16, 17], предусматривает математическое описание свободной электрической дуги, сети постоянного тока, нагрев закорачивающего проводника, а также режим КЗ аккумуляторной батареи. Математическое описание свободной электрической дуги производится с учетом преобразованного уравнения Майра [12]:

$$\frac{d}{dt} \ln\left(\frac{I_d}{U_d} L_d\right) = \frac{U_d I_d - P_0 L_d}{Q_0 L_d}, \quad (3.2)$$

где  $I_d$  — ток дуги, А;  $U_d$  — напряжение электрической дуги, В;  $L_d$  — длина дуги, см;  $P_0$  — удельные потери энергии дуги, В · А/см/с;  $Q_0$  — удельная внутренняя энергия дуги, В · А/см;  $P_0, Q_0$  постоянные в окрестности точки заданного режима.

Исходное уравнение (3.2) можно преобразовать к виду

$$\frac{d}{dt} \ln(G_d L_d) = \frac{U_d I_d - P_0 L_d}{Q_0 L_d},$$

где  $G_d = I_d / U_d$  — проводимость электрической дуги, 1/Ом.

Логарифмическая функция уравнения является функцией удельной проводимости двух переменных. Раскрывая производную от логарифма обычным порядком получаем:

$$\frac{1}{G_d} \frac{dG_d}{dt} + \frac{1}{L_d} \frac{dL_d}{dt} = \frac{U_d I_d - P_0 L_d}{Q_0 L_d}. \quad (3.3)$$

Допуская, что энергетические процессы в основном определяются первой составляющей производной от логарифма, вторую составляющую можно не учитывать.

Учитывая, что  $P_d = U_d I_d$  — мощность, подводимая к дуге, Вт;  $P_{\Pi} = P_0 L_d$  — мощность потерь в дуге, Вт;  $P_* = P_d / P_{\Pi}$  — превышение подводимой мощности относительно мощности потерь, отн. ед., дифференциальное уравнение Майра принимает вид

$$dG_d/dt = G_d(P_* - 1)(1/\theta_0),$$

где  $\theta_0 = Q_0/P_0$  — постоянная времени дуги в окрестности точки заданного режима, с. Потери в электрической дуге в первом приближении можно разделить на составляющие [61]:

$$P_{\Pi} = P_{\tau} + P_{\kappa},$$

где  $P_{\tau}$  — мощность тепловых потерь, Вт;  $P_{\kappa}$  — мощность конвекционных потерь, Вт.

В этом случае уравнение Майра будет иметь вид

$$\frac{dG_d}{dt} G_d (P_{*d} - P_{*\tau} - P_{*\kappa}) / \theta, \quad (3.4)$$

где  $\theta = \frac{R_d^2}{k P_{\Pi}}$  — постоянная времени дуги, с,  $P_{\Pi} = P_0 = U_0 I_0$  — мощность потерь дуги в заданной точке установившегося режима, Вт;  $P_{*d} = (U_d/U_0)^2$  — мощность, потребляемая дугой от источника энергии, отн. ед.;  $P_{*\tau} = (U_{\tau}/U_0)^2$  — мощность тепловых потерь, отн. ед.;  $P_{*\kappa} = (U_{\kappa}/U_0)^2$  — мощность конвекционных потерь, отн. ед.;  $U_0$  — напряжение, характеризующее полные потери в дуге при начальной ее длине (индикатор начальной длины дуги), В;  $U_{\kappa}$  — напряжение, характеризующее возникновение потерь в дуге при изменении ее длины (индикатор изменения длины дуги), В;  $k$  — эмпирический коэффициент.



Очевидно, что в установившемся режиме  $U_{\text{д}} = U_0$  и  $P_{*\text{д}} = P_{*\text{п}} = P_{*\text{т}} + P_{*\text{к}} = 1$ . При адаптивном моделировании дуги вариация долевого состава потерь позволяет выявить приемлемые их соотношения как в установившихся режимах горения дуги, так и в динамических. Кроме того, при анализе режимов учтено, что

$$\theta_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{д}}}{P_{\text{п}}} = \frac{Q_{\text{д}}}{P_0} = \frac{1}{P_{*\text{т}} + P_{*\text{к}}},$$

или

$$T_{\text{д}} = \theta_0 \frac{1}{(U_{\text{т}}/U_0)^2 + (U_{\text{к}}/U_0)^2}.$$

Для математического анализа режимов дуги используются уравнения электрической цепи, записанные относительно токов и напряжений. Упрощенная схема замещения сети постоянного тока приведена на рис. 3.1.

Дифференциальные уравнения сети постоянного тока имеют вид:

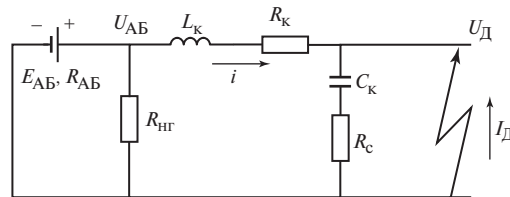
$$\begin{aligned} di/dt &= [E_{\text{эк}} - (R_{\text{эк}} + R_{\text{к}})i - U_{\text{д}}]/L_{\text{к}}; \\ dU_{\text{с}}/dt &= (i - G_{\text{д}}U_{\text{д}})/C_{\text{к}}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где

$$U_{\text{д}} = (U_{\text{с}} + iR_{\text{с}})/(i + G_{\text{д}}R_{\text{с}});$$

$$E_{\text{эк}} = E_{\text{АБ}}R_{\text{нг}}/(R_{\text{АБ}} + R_{\text{нг}});$$

$$R_{\text{эк}} = R_{\text{АБ}}R_{\text{нг}}/(R_{\text{АБ}} + R_{\text{нг}}).$$



**Рис. 3.1. Схема замещения сети постоянного тока при расчете дуговых КЗ:**

$E_{\text{АБ}}$  и  $R_{\text{АБ}}$  — ЭДС и внутреннее сопротивление аккумуляторной батареи;  $R_{\text{нг}}$  — активное сопротивление нагрузки;  $C_{\text{к}}$  и  $R_{\text{с}}$  — результирующие емкость и активное сопротивление емкостной цепи;  $L_{\text{к}}$  и  $R_{\text{к}}$  — результирующие индуктивность и активное сопротивление короткозамкнутой цепи

Уравнение электрической цепи для анализа изменения напряжений без учета  $RC$ -цепи в канонической форме имеет вид

$$\frac{dU_d}{dt} = \left[ \frac{E_{\text{эк}}}{R_{\text{кС}}G_d + (L_{\text{к}}G_d/T_d)dP + 1} - U_d \right] \frac{1}{T_u};$$

$$T_u = \frac{T_{\text{к.м}}}{1 + (T_{\text{к.м}}/T_d)dP + (R_d/R_{\text{кС}})},$$
(3.6)

где  $dP = P_d - P_T - P_K$ ;  $T_u$  — постоянная времени изменения напряжения на дуге, с;  $T_{\text{к.м}}$  — постоянная времени короткозамкнутого контура при металлическом КЗ, с;  $R_d = 1/G_d$  — активное сопротивление дуги, Ом;  $R_{\text{кС}} = R_{\text{эк}} + R_K$ .

Таким образом, скорость изменения напряжения на дуге зависит от ее сопротивления, постоянной времени и баланса энергий в дуге.

Уравнение электрической цепи для анализа изменения токов в канонической форме имеет вид

$$\frac{dI_d}{dt} = \left( \frac{E_{\text{эк}}}{R_{\text{кС}} + 1/G_d} - I_d \right) \frac{1}{T_i},$$
(3.7)

где  $T_i$  — постоянная времени изменения тока дуги, с,

$$T_i = \frac{L_{\text{к}}}{R_{\text{кС}} + 1/G_d} = T_{\text{к.м}} \frac{1}{1 + (R_d/R_{\text{кС}})}.$$

Очевидно, что чем больше сопротивление  $R_d$  тем меньше постоянная времени  $T_i$ . При горении дуги  $T_i \ll T_{\text{к.м}}$ .

Уравнение движения дуги или скорости ее перемещения используется при условии динамического баланса электромагнитных и аэродинамических сил:

$$dv_d/dt = [F_{\text{эм}}(t) - F_c(t)]/T_m,$$
(3.8)

где  $F_{\text{эм}}$  — электромагнитная сила, действующая на дугу, Г;  $F_c$  — аэродинамическая сила, действующая на дугу, Г;  $T_m$  — электромеханическая постоянная времени дуги, с.

Уравнение перемещения дуги в электромагнитном поле параллельных проводников (в расчетном алгоритме учтена дискретность смещения катодного пятна) имеет вид

$$ds_d/dt = v_d(t),$$

где  $s_d$  — длина перемещения фронта дуги, см;  $v_d$  — скорость перемещения фронта дуги, см/с.

Уравнение нагрева закорачивающего проводника (инициирующего КЗ) имеет вид

$$d\vartheta/dt = 100(\rho_t/C_t) (I_{\text{пр}}/s_{\text{пр}})^2, \quad (3.9)$$

где  $\vartheta$  — температура проводника, °С;  $\rho_t$  — удельное сопротивление материала проводника, Ом · м;  $C_t$  — удельная теплоемкость материала проводника, Вт(с/м);  $I_{\text{пр}}$  — ток в проводнике (ток металлического КЗ), А;  $s_{\text{пр}}$  — поперечное сечение проводника, мм<sup>2</sup>.

Приведенное уравнение отображает адиабатический процесс нагрева проводника (без учета отдачи тепла в окружающую среду), при допущении, что длительность нагрева вплоть до перегорания проводника значительно меньше постоянной времени передачи тепла в окружающую среду.

Алгебраические уравнения математической модели электродуговой системы включают следующие уравнения.

1. Уравнения энергетического режима дуги с учетом параметров сети постоянного тока:

$$U_{\text{д}} = (U_{\text{с}} + R_{\text{с}}I_{\text{д}})/(1 + R_{\text{с}}G_{\text{д}});$$

$$I_{\text{д}} = G_{\text{д}}U_{\text{д}};$$

$$P_{\text{д}} = I_{\text{д}}U_{\text{д}};$$

$$R_{\text{д}} = 1/G_{\text{д}}.$$

2. Уравнения геометрических, параметров дуги [10]:

$$L_{\text{д}} = \sqrt{(ks_{\text{д}}^2 + a^2)} \text{ при } a > 1 \text{ см, } k = \text{var [44];}$$

$$D_{\text{д}} = 0,8 \sqrt{\left(\frac{I_{\text{д}}}{v_{\text{д}} + 0,001I_{\text{д}}}\right)},$$

где  $L_{\text{д}}$  — длина дуги (хорда — полуокружность — полуэллипс), см;  $D_{\text{д}}$  — диаметр дуги (с корректировкой по току  $I_{\text{д}}$ ), см;  $v_{\text{д}}$  — скорость перемещения дуги, см/с;  $a$  — расстояние между параллельными проводниками (начальная длина дуги), см.

3. Уравнения конвекционных потерь дуги в упрощенной записи:

$$U_0 = 50(1 + 0,03a^2) \text{ (из статистических данных);}$$

$$U_{\text{к0}} = U_0\sqrt{(1 - K_{\text{т}})}, \quad K_{\text{т}} = P_{\text{т}}/P_0 = \frac{P_{\text{т}}}{P_{\text{т}}};$$

$$U_{\text{к}} = U_{\text{к0}} + E_{\text{д}}(L_{\text{д}} - a), \quad E_{\text{д}} = U_{\text{д}}/L_{\text{д}},$$

где  $U_0$  — напряжение дуги при начальной (равной  $a$ ) ее длине, В;  $P_0$  — полные потери дуги при начальной ( $a$ ) ее длине, Вт;  $P_T$  — мощность тепловых (не конвекционных) потерь, Вт;  $P_K$  — мощность конвекционных потерь, Вт;  $U_{K0}$  — напряжение учитывающее конвекционные потери при начальной длине дуги, В;  $U_K$  — напряжение, учитывающее конвекционные потери при изменении длины дуги, В;  $E_d$  — электрическая напряженность дуги (в первом приближении  $E_d = 15,7$  В/см).

4. Уравнение электрической прочности околоскатодного промежутка при дуговом разряде [45]:

$$U_{пр} = \sqrt{\frac{K_p P_{II}}{K_g G_d}},$$

где  $K_p$ ,  $K_g = f(t)$ ,  $K_p$  и  $K_g$  — коэффициенты, характеризующие разряд и проводимость при разряде.

При дуговом разряде электрическая прочность околоскатодного промежутка характеризуется напряжением, необходимым для поддержания неизменной проводимости дугового столба, иначе дуга гаснет или разгорается.

Как известно [10—12], опорные точки дуги быстро перемещаются по электродам и последние не нагреваются до высокой температуры. При этом проявляется термоэлектронная эмиссия, а не термическая ионизация. Экспериментально установлено, что электрическая прочность в зонах опорных точек характеризуется следующими значениями пробивного напряжения  $U_{пр}$ :

- при горячих электродах и небольшой скорости перемещения дуги (например, в процессе ее формирования)  $U_{пр} = 40—60$  В;
- при горячих электродах и средней скорости перемещения дуги (в процессе удаления от места возникновения)  $U_{пр} = 140—160$  В;
- при холодных электродах и большой скорости перемещения дуги (в процессе свободного движения по электродам)  $U_{пр} = 230—250$  В.

5. Уравнения электромагнитного поля параллельных шин, использованы в математической модели в соответствии с [10] и рис. 3.2. Поперечная составляющая напряженности электрического поля, А/см, определена как

$$H_x = H_{x1} + H_{x2},$$

где  $H_{x1}$  — напряженность внешнего поля по оси  $X$ , которую можно рассматривать, как независимую переменную (если возникает необходимость);  $H_{x2}$  — напряженность поля от тока шин по оси  $X$ , кото-

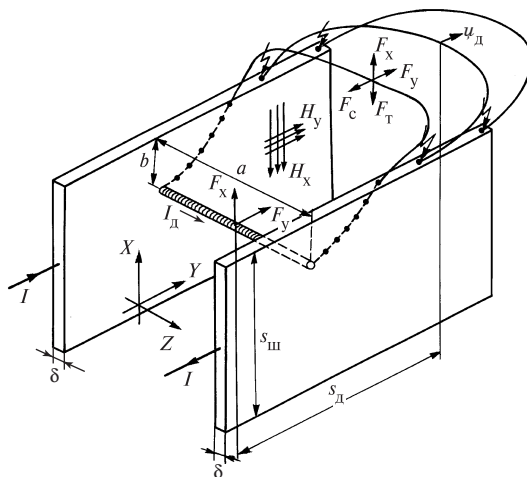


Рис. 3.2. Графическая интерпретация развития дугового процесса при КЗ на параллельных шинах

рую следует определять с учетом геометрических параметров проводника, например по формуле

$$H_{x2} = \frac{2I_d}{a} \left[ \left( \frac{2a}{s_{ш}} \right) \operatorname{arctg} \left( \frac{s_{ш}}{2a} \right) + 0,5 \ln \left( \frac{4a^2 + s_{ш}^2}{s_{ш}^2} \right) \right] \quad (1/10),$$

где  $s_{ш}$  — ширина шины прямоугольного сечения (размер по оси  $X$ ), см.

В этом уравнении толщину шины можно не учитывать [10].

Продольная составляющая напряженности электрического поля определена по формуле

$$H_y = (I_d/2s) \pi \operatorname{ctg}(\pi b/s_{ш}) \quad (1/10),$$

где  $b/s_{ш}$  — относительное расстояние дуги от края шин (по оси  $X$ ).

6. Уравнения электромагнитных и аэродинамических сил [10, 25, 36]:

$$F_y = aK_f H_x I_d;$$

$$F_x = aK_f H_y I_d; \quad K_f = 0,0001;$$

$$F_c = aK_c v_d, \quad \text{где } K_c = C_H D_d \rho_B / 2g,$$

$$C_H = 1 + K_H H_x^{0,3}, \quad \text{при } K_H > 0,$$

$$\rho_B = \frac{0,00129}{1 + 0,0036T_B} \rho_B,$$

где  $C_n$  — безразмерный коэффициент (для твердого стержня  $C_n = 1$ );  $T_v$  — температура воздуха в зоне горения дуги, °С;  $P_v$  — давление воздуха в зоне горения дуги, атм.;  $\rho_v$  — плотность воздуха, г/см<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение силы тяжести, см/с<sup>2</sup>.

*Математическое описание свинцово-кислотного аккумулятора* выполнено по расчетной методике [26], разработанной на основе современной теории электрического поля приэлектродного пространства в среде электролита и теории объемной концентрации электролита в свинцово-кислотных аккумуляторах в динамических режимах. При этом использовалось классическое уравнение Нернста и анализировалось пространственно-временное распределение концентрации электролита в аккумуляторе при протекании тока. В расчет принимались известные допущения [26] по диффузии и диссоциации подвижного электролита.

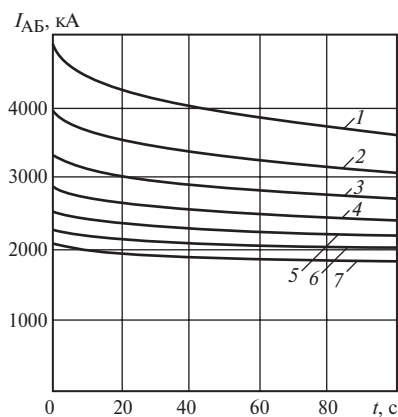
Математическая модель системы постоянного тока позволяет достаточно полно и точно отобразить специфические процессы, имеющие место в свинцово-кислотном аккумуляторе и электрической дуге при коротких замыканиях в сети постоянного тока.

Алгоритм расчета различных режимов системы постоянного тока реализован в виде программы для ЭВМ. Модель позволяет:

- рассчитать и исследовать статические и динамические характеристики свинцово-кислотных аккумуляторов, дуговые процессы при коротких замыканиях, токи коротких замыканий;
- варьировать расчетные условия, а также параметры аккумуляторов и сети для оценки степени их влияния на те или иные характеристики, используемые при проектировании, наладке и эксплуатации электрооборудования постоянного тока.

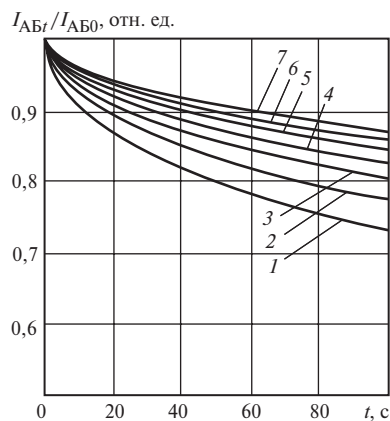
С помощью ЭВМ были проведены исследования разряда свинцово-кислотных аккумуляторных батарей. Показано, что упрощенный учет аккумулятора (например, [29]) приводит к существенным погрешностям расчета различных временных процессов.

В качестве примера расчетов на ЭВМ на рис. 3.3 приведены результаты расчетов в виде семейства разрядных кривых аккумуляторной батареи СК-24 ( $n = 108$ ,  $m = 24$ , где  $n$  — последовательно соединенные элементы;  $m$  — параллельно соединенные элементы) при вариации удаленности короткого замыкания ( $R_k = 20—80$  мОм). На рис. 3.4 то же семейство кривых представлено в виде кривых затухания тока КЗ, которые могут быть использованы для практических расчетов режимов КЗ.



**Рис. 3.3.** Токи разряда аккумуляторной батареи (СК-24) при различных удаленностях короткого замыкания:

1 —  $R_k = 20$  мОм; 2 —  $R_k = 30$  мОм;  
3 —  $R_k = 40$  мОм; 4 —  $R_k = 50$  мОм;  
5 —  $R_k = 60$  мОм; 6 —  $R_k = 70$  мОм;  
7 —  $R_k = 80$  мОм



**Рис. 3.4.** Изменение во времени тока аккумуляторной батареи СК-24 ( $I_{ABt}$ ), выраженного в долях от его значения в начальный момент КЗ ( $I_{AB0}$ ) при различных удаленностях КЗ:

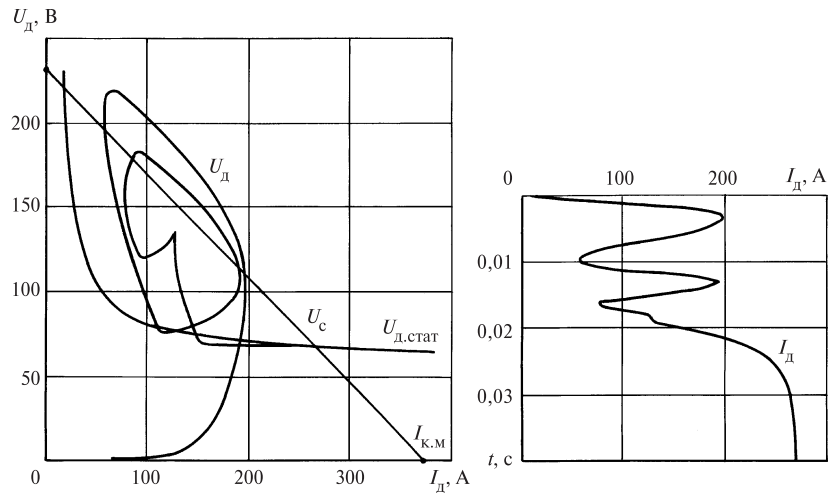
1 —  $R_k = 20$ ; 2 —  $R_k = 30$ ; 3 —  $R_k = 40$ ;  
4 —  $R_k = 50$ ; 5 —  $R_k = 60$ ; 6 —  
 $R_k = 70$ ; 7 —  $R_k = 80$  мОм

Анализ расчетных данных показывает, что начальные точки разрядных кривых точно соответствуют экспериментальным данным, в частности, спрямленным характеристикам [28]. Затухание токов соответствует экспериментальным данным [26, 27] с погрешностью не более 10 %.

Адекватность математической модели электрической дуги подтверждена практическим совпадением расчетных характеристик дугового КЗ с такими же характеристиками, полученными в результате эксперимента. Например, на рис. 3.5 приведены расчетные кривые граф режима и ампер-секундной характеристики дугового КЗ, которые практически совпадают с аналогичными кривыми, полученными на основании экспериментальных данных (см. рис. 2.23).

Как показывают расчеты, параметры дуги (геометрические, электрические и скоростные) достаточно полно и точно соотносятся с долевым составом джоулевых, конвекционных и дополнительных потерь. Обобщающим параметром, определяющим основные энергетические соотношения, является электрическая напряженность дуги.

Уравнения движения электрической дуги точно отражают динамику натуральных процессов, но уравнение Майра необходимо допол-



**Рис. 3.5. Граф режима и ампер-секундная характеристика дугового короткого замыкания на участке параллельных шин (расчет на ЭВМ):**

$a = 3$  см;  $s = 10$  см;  $I_{к.м} = 375$  А;  $I_{д0} = 10$  А

нять функцией, корректирующей изменение проводимости дуги под действием внешних факторов, например автогазового дутья, пробоев дугового промежутка и т.п., а также функциями учета динамического изменения джоулевых, конвекционных и дополнительных потерь при развитии дугового процесса.

К дополнительным потерям следует отнести потери электрической энергии в приэлектродном пространстве (нагрев шин, катодных и анодных пятен, нагрев и испарение металла, излучение и т.д.).

При испарении металла закорачивающего проводника возникающая дуга, как правило, разрушается. Резко снижается проводимость дуги, уменьшается ток и возрастает напряжение. Наиболее интенсивно изменяется ток, в зависимости от состояния плазмы дуги. Скорость изменения напряжения дуги зависит от скорости деионизации дугового промежутка, а также от скорости образования паров металла в ионизированном пространстве.

При формировании дуги дополнительные потери всегда возрастают, в значительной степени определяют напряжение дуги и слабо зависят от тока. Влияние дополнительных потерь уменьшается при увеличении длины дуги. При пробое дугового промежутка дополнительные потери исчезают, остаются вне дуги.



Анализ и обобщение результатов исследований, выполненных с помощью приведенной выше математической модели электрической дуги показали, что основным достоинством модели является достаточно полное описание дугового процесса при КЗ. Модель отражает подробно физические и электродинамические явления дугового процесса, перенос энергии из ламинарной зоны в турбулентную и далее в окружающую среду; движение дуги под действием различных сил; электрическое состояние дуги с учетом параметров сети.

Вместе с тем модель дуги и системы постоянного тока представляют собой систему трудоемких алгебраических и дифференциальных уравнений высокого порядка, для которых достоверные исходные теплофизические параметры дугового процесса, не могут быть получены для массовых практических расчетов. Такая модель может быть рекомендована для фундаментальных теоретических исследований дуговых процессов.

### **3.2. Модель расчета токов КЗ с учетом изменения параметров аккумуляторной батареи**

Опыт проектирования электроустановок с аккумуляторными батареями показывает, что не уделяется внимание изменению характеристик аккумуляторов в процессе эксплуатации, что приводит к ошибкам в выборе схемы соединения и аппаратов защиты. Приведенные выше (см. гл. 2) результаты экспериментальных исследований позволили установить, что во многих случаях уставки срабатывания аппаратов защиты в электроустановках оперативного постоянного тока не соответствуют требованиям правил устройства электроустановок. Одной из основных причин такого несоответствия является использование для выбора уставок упрощенных методик расчета коротких замыканий, приемлемых лишь для оценки максимально возможных значений токов. Для обеспечения надежной работы аппаратов защиты уставки их расцепителей следует выбирать в соответствии с минимально возможными значениями токов короткого замыкания. Оценка нижней границы диапазона возможных значений тока короткого замыкания должна производиться на основе расчетов, учитывающих сопротивление электрической дуги, тепловой спад тока, внутреннее сопротивление аппаратов защиты, переходное сопротивление разъемных контактов и изменения параметров аккумуляторной батареи, снижающих значение тока КЗ. Каждый фактор в отдельности, при определенных условиях, может уменьшить значение тока КЗ в два раза. Перечисленные факторы могут многократно уменьшить значение тока ГОСТ [21].

Ниже представлены результаты расчетно-теоретического исследования свинцово-кислотных аккумуляторных батарей при коротких замыканиях, приведенные в [19, 29]. Исследования проводились на основе обобщения теоретических и экспериментальных работ, для разработки математической модели, позволяющей учесть при расчете токов КЗ степень разряда аккумуляторов и температуру окружающей среды.

Процессы в аккумуляторах при разряде и заряде наиболее полно описываются дифференциальными уравнениями в частных производных [30]. Такая модель аккумулятора позволяет учесть концентрационные изменения; омические потери в электролите, в порах электродов и сепаратора; процессы изменения потенциала электродов; сульфатацию пор электродов в процессе разряда.

В состав модели входят следующие уравнения.

1. Уравнение изменения пористости электрода:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{1}{2F} \left( \frac{M_{\text{PbSO}_4}}{\rho_{\text{PbSO}_4}} - \frac{M_{\text{PbO}_2}}{\rho_{\text{PbO}_2}} \right) \frac{\partial i_2}{\partial x} = 0,$$

где  $F$  — постоянная Фарадея, Кл/моль;  $\varepsilon$  — пористость электрода, отн.ед.;  $i_2$  — плотность тока в электролите, А/см<sup>2</sup>;  $M$  — молярная масса  $\text{PbSO}_4$  и  $\text{PbO}_2$  соответственно, г/моль;  $\rho$  — плотность  $\text{PbSO}_4$  и  $\text{PbO}_2$  соответственно, г/см<sup>3</sup>.

Уравнение описывает изменение пористости электрода во времени, обусловленное превращениями активных материалов при электродных реакциях.

2. Уравнение омических потерь в электролите:

$$\frac{i_2}{\varepsilon^{\text{exl}} \gamma_3} + \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} - \frac{RT}{F} \left( \frac{3 - 2t_+^0}{C} + \frac{2V_0}{1 - CV_e} \right) \frac{\partial C}{\partial x} = 0,$$

где  $C$  — концентрация электролита, моль/см<sup>3</sup>;  $\varphi_2$  — потенциал электрода в электролите, В;  $R$  — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К);  $T$  — абсолютная температура, К;  $\text{exl}$  — коэффициент, учитывающий снижение проводимости электролита в порах электрода;  $\gamma_3$  — проводимость электролита, См/см;  $t_+^0$  — число переноса ионов водорода;  $V_0, V_e$  — молярные объемы воды и электролита соответственно, см<sup>3</sup>/моль.

Уравнение представляет собой модифицированный закон Ома для электролита, при этом учитывает, что ток протекает под действием градиентов электрического и химического потенциалов.

3. Уравнение омических потерь в электродах:

$$i_2 - \varepsilon^{\text{exml}} \gamma_{\text{PbO}_2} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} - I = 0,$$

где  $\text{exml}$  — коэффициент, учитывающий снижение проводимости электрода в зависимости от его пористости, См/см;  $\gamma_{\text{PbO}_2}$  — проводимость диоксида свинца, См/см;  $\varphi_1$  — потенциал в активной массе электрода, В;  $I$  — суммарная плотность тока разряда (заряда), А/см<sup>2</sup>.

4. Уравнение материального баланса:

$$\varepsilon \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{1}{2F} \left[ \left( \frac{M_{\text{PbSO}_4}}{\rho_{\text{PbSO}_4}} - \frac{M_{\text{PbO}_2}}{\rho_{\text{PbO}_2}} \right) + (2t_+^0 - 3)V_e + 2V_0 \right] i_2 \frac{\partial C}{\partial x} - \varepsilon^{\text{exl}} D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \text{exl} \varepsilon^{\text{exl}-1} D \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} - \left[ \left( \frac{3 - 2t_+^0}{2F} \right) (1 - CV_e) + \frac{CV_0}{F} \right] \frac{\partial i_2}{\partial x} = 0,$$

где  $D$  — коэффициент диффузии ионов электролита, см<sup>2</sup>/с.

Уравнение описывает изменение концентрации электролита во времени, происходящее из-за электродной реакции, диффузии и миграции ионов.

5. Уравнение электродной кинетики:

$$\frac{\partial i_2}{\partial x} - a_{m1} i_{01,r} \left( \frac{C}{C_r} \right)^{\nu 1} \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_{01}}{\varepsilon_{m1} - \varepsilon_{01}} \right)^{\xi 1} \times \left\{ \exp \left[ \frac{\alpha_{a1} F}{RT} (\varphi_1 - \varphi_2 - U_0) \right] - \exp \left[ - \frac{\alpha_{c1} F}{RT} (\varphi_1 - \varphi_2 - U_0) \right] \right\} = 0,$$

где  $a_{m1}$  — максимальная удельная поверхность активной массы электрода, см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>;  $C_r$  — начальная концентрация электролита, моль/см<sup>3</sup>;  $i_{01,r}$  — плотность тока обмена для электрода при  $C_r$ , А/см<sup>2</sup>;  $\varepsilon_{01}$  — пористость электрода в незаряженном состоянии;  $\varepsilon_{m1}$  — пористость электрода в заряженном состоянии;  $\alpha_{a1}$ ,  $\alpha_{c1}$  — анодный и катодный коэффициенты переноса для электрода;  $\nu 1$  — коэффициент, учитывающий зависимость плотности тока обмена электрода от концентрации;  $\xi 1$  — коэффициент, учитывающий зависимость удельной поверхности активной массы электрода от степени заряженности;  $U_0$  — напряжение на аккумуляторе при отсутствии внешнего тока, В.

Использование такой модели аккумулятора чрезвычайно сложно. Для решения инженерных задач обычно принимаются допущения [26]:

- электроды аккумулятора гладкие;
- коэффициенты диффузии ионов, проводимость и температура электролита и пластин не изменяются во времени;
- плотность тока по поверхности электродов распределена равномерно.

В результате, выражение для напряжения на аккумуляторе при разряде током полчасового или часового режима и последующим толчком тока, примет вид:

$$u(t) = E_0 - I_p R_{вт} - B I_p \sqrt{t + t_{пр}} - B(I_p - I_{пр}) \sqrt{t}, \quad (3.10)$$

где  $E_0 = 0,84 + q_0$  — начальная ЭДС аккумулятора;  $I_p$  — ток разряда;  $R_{вт}$  — внутреннее сопротивление, аккумулятора;  $I_{пр}$ ,  $t_{пр}$  — ток и время предшествующего разряда;  $h$ ,  $d$  — высота и ширина электродов аккумулятора;  $k$  — коэффициент, учитывающий увеличение поверхности пористого электрода, по сравнению с гладким;  $D$  — коэффициент диффузии.

В разработанной модели для расчета коротких замыканий с учетом указанных допущений изменение активного сопротивления аккумулятора в процессе разряда учитывается по формуле [3]:

$$R_{вт} = R_{вт0} \left[ 1 + K_r \left( \frac{t}{t_k} \right)^\beta \right]; B = \frac{0,052}{k F h d \sqrt{D \pi}}, \quad (3.11)$$

где  $R_{вт0}$  — сопротивление заряженного аккумулятора;  $K_r$  — коэффициент, показывающий на сколько сопротивление разряженного аккумулятора больше заряженного;  $t_k$  — время тока разряда (указывается в технических данных аккумулятора);  $\beta$  — коэффициент, учитывающий зависимость изменения сопротивления во времени.

Для расчета начального внутреннего сопротивления аккумулятора использована методика, приведенная в [31]. Стационарные аккумуляторы типа СК, в отличие от стартерных, имеют более толстые пластины и большее расстояние между ними. Это приводит к увеличению доли сопротивления электролита и уменьшению доли сопротивления электродов, поэтому сопротивление пластин аккумуляторов типа СК принимается равным  $0,3R_{вт}$ , а сопротивление электролита и сепараторов  $R_s = 0,7R_{вт}$ . Такое разделение позволяет учитывать изменение внутреннего сопротивления при изменении температуры, при этом предполагается, что 70 % сопротивления аккумулятора имеет ту же температурную зависимость, что и сопротивление

электролита, а остальная часть сопротивления изменяется по закону изменения сопротивления металла.

На основе разработанной модели были построены вольт-амперные характеристики различных режимов работы аккумулятора СК-1. Для этого использовались следующие значения параметров модели [32]: габаритные размеры аккумулятора —  $h = 0,166$  м,  $d = 0,168$  м; постоянная Фарадея  $F = 96487$  Кл/моль; начальная плотность электролита составляла 1,21 отн. ед. Коэффициент диффузии при начальной концентрации  $c$  и температуре  $25$  °С вычислялся по [30]:

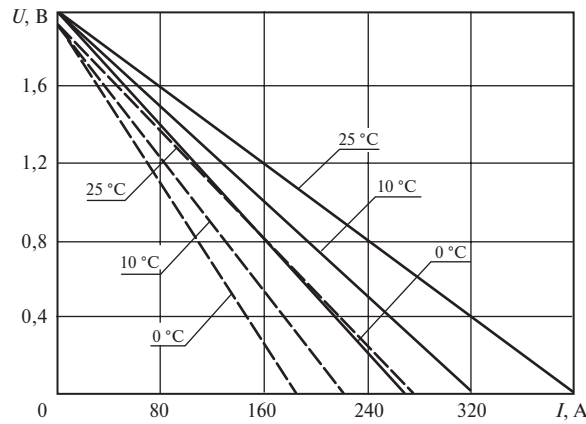
$$D = (1,75 + 0,26c)10^{-9} e^{\left(\frac{2174}{298,15} - \frac{2176}{T}\right)} = 2,65 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2.$$

Внутреннее сопротивление заряженного аккумулятора при температуре  $25$  °С в соответствии с экспериментальными данными принято  $R_{вт 0} = 5$  мОм. При другом значении температуры:

$$R_T = 0,7R_{25} \frac{1}{\left(\frac{1801}{298,15} - \frac{1801}{T}\right)} + 0,3R_{25}[1 + 0,0037(T - 298,15)].$$

Значение коэффициента  $K_r = 0,4$  соответствует вольт-амперной характеристике, построенной по численной модели [30], для конца получасового разряда, т.е. сопротивление аккумулятора возрастает к концу получасового разряда в 1,4 раза. Значение коэффициента  $k = 1,75$  определено из каталожных разрядных характеристик.

В соответствии с требованиями правил устройства электроустановок аккумуляторная батарея должна обеспечить штатную работу потребителей постоянного тока и аппаратов защиты на подстанциях в конце получасового аварийного разряда. При этом температура окружающей среды изменяется от  $0$  до  $25$  °С. Продолжительность коротких замыканий при отключении их резервными защитами может достигать нескольких секунд. Для данных расчетных условий, с помощью разработанной модели, получены вольт-амперные характеристики аккумулятора СК-1 для заряженного (сплошные линии) и разряженного (пунктирные линии) состояний (рис. 3.6). Результаты численного моделирования по разработанной модели сравнивались с результатами моделирования по сложной модели в частных производных [30]. Анализ результатов численного моделирования показывает, что допущения, принятые в разработанной модели вносят погрешность в вольт-амперную характеристику аккумулятора менее 3 % по отношению к исходной модели во всем рассматриваемом диапазоне температур, при различной степени заряженности.



**Рис. 3.6.** Вольт-амперные характеристики аккумулятора СК-1

Это позволяет использовать разработанную упрощенную модель для проектирования электроустановок с аккумуляторными батареями.

С помощью разработанной модели определено, что сопротивление аккумулятора при снижении температуры от 25 до 0 °C увеличивается в 1,5 раза (табл. 3.1). В [33] приведены аналогичные данные, справедливые как для стартерных, так и для стационарных аккумуляторных батарей. Расчеты модели показали, что сопротивление аккумулятора в разряженном состоянии возросло в 1,4 раза, что отличалось от экспериментальных данных, приведенных в [5] менее, чем на 5 %.

Таблица 3.1

**Параметры аккумулятора СК-1**

Параметр	Степень заряженности и температура электролита					
	Полностью заряжен			Полностью разряжен		
	25 °C	10 °C	0 °C	25 °C	10 °C	0 °C
Расчетная ЭДС, $E$ , В	2,0	2,0	2,0	1,93	1,93	1,93
Сопротивление, $R$ , мОм	5,0	6,25	7,25	7,05	8,75	10,5
Коэффициент увеличения внутреннего сопротивления аккумулятора, $k_R$	1,0	1,25	1,50	1,41	1,75	2,1

Следует заметить, что расчетная и экспериментальная вольт-амперные характеристики в основном прямолинейные, нелинейность проявляется лишь вначале. Поэтому аппроксимация нелинейности внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи ломаной прямой, используемая в отечественной практике [5], является неоправданно усложненной. При расчете токов короткого замыкания вольт-амперную характеристику свинцово-кислотных аккумуляторов допустимо считать прямолинейной, как это принято в зарубежной практике, так как погрешность в этом случае не превышает 5 %.

Представленные в таблице данные применимы для появившихся на российском рынке аккумуляторов зарубежного производства. Для сопоставимости вольт-амперных характеристик аккумуляторов различного производства удобно использовать их внутренние сопротивления, отнесенные к 1 А·ч номинальной емкости  $Q$ . При этом расчет тока в начальный момент КЗ от аккумуляторной батареи можно осуществлять по формуле:

$$I_{\text{к}} = \frac{nE}{nk_R r_{\text{уд}} / Q + R_{\text{вн}}}, \quad (3.12)$$

где  $n$  — количество последовательно включенных аккумуляторов;  $E = E_0 - 0,05$  — расчетное значение ЭДС аккумулятора, учитывающее спрямление начального участка вольт-амперной характеристики, В;  $k_R$  — коэффициент увеличения сопротивления;  $r_{\text{уд}}$  — удельное внутреннее сопротивление заряженного аккумулятора при 25 °С, Ом·А·ч;  $R_{\text{вн}}$  — сопротивление внешней цепи, Ом.

Значения удельных сопротивлений различных аккумуляторов, предлагаемых на отечественном рынке приведены в табл. 3.2.

При расчете токов короткого замыкания от свинцово-кислотных аккумуляторов зарубежного производства допустимо использовать значения коэффициента увеличения сопротивления, приведенные в табл. 3.1 для аккумуляторов типа СК. Значение расчетной ЭДС аккумуляторов при выполнении практических расчетов допустимо принимать равной 2 В. Применительно к исправным аккумуляторам погрешность определения тока короткого замыкания, по предлагаемой методике, не превышает 10 %.

Таким образом, при расчете минимально возможных значений токов короткого замыкания для выбора аппаратов защиты необходимо учитывать изменение внутреннего сопротивления аккумулятора в зависимости от степени разряженности и температуры окружающей среды, так как оно, даже при нормальных условиях эксплуатации, может отличаться от номинального в 2,1 раза.

Таблица 3.2

Удельное сопротивление полностью заряженного аккумулятора при температуре 25 °С

Тип аккумулятора	Емкость, А · ч $Q_{10}$	Удельное внутреннее сопротивление аккумулятора $r_{уд}$ , мОм · А · ч
СК	36—5328	180
3GroE75 — 18GroE450	75—450	93,3—93,6
5GroE500 — 26GroE2600	500—2600	149,0—150,6
6MLTC50	58	198,8
6MLTC100, 6MLTC150	100, 162	246—252
3MLTC200	200	256
3MLTC250	265	289
3MLTC300	300	271
LTC	115—215	267—284
UTC	235—305	224—234
VTC	285—595	237—278
XTC	740—1140	297—307
YTC	600—1320	280—307
NTC	1435—3250	252—282
ZTC	1555—3510	256—295
OP3 — OP5	69—115	80,0—90,3
OP6 — OP9	146—219	95,4—106,4
OP10 — OP30	244—732	111,8—124,7
OPSE50 — OPSE100 (OPSEC)	50—100	72,6—78,6
OPSE150, OPSE200 (OPSEC)	150, 200	87,8 —95,3
OPSE250 — OPSE650 (OPSEC)	250—650	105,5—114,7
TPC15 — TPC45	1029—3234	402—414
TPC47 — TPC49	3381—3528	389—395
TPC51 — TPC55	3675—3969	364—381
TPC57 — TPC61	4116—4410	334—354
TPB17 — TPB21	200—250	157,0—172,9
TPB23 — TPB63	275—775	170,2—186,9
TPA5 — TPA33	20—160	91,5—112,1
Vb2305 — Vb2312	250—600	130
Vb2407 — Vb2420	700—2000	172



Окончание табл. 3.2

Тип аккумулятора	Емкость, А · ч $Q_{10}$	Удельное внутреннее сопротивление аккумулятора $r_{уд}$ , мОм · А · ч
Vbl2101 — Vbl2106	18—108	98
Vb6114 — Vb6116, Vb4117, Vb4118	128—224	115
xOpzS200LA	200	254
xOpzS250LA	250	227
xOpzS300LA — xOpzS420LA	300—420	206—216
xOpzS490LA	490	229
xOpzS600LA — xxOpzS1200LA	600—1200	252—262
xxOpzS1500LA — xxOpzS2500LA	1500—2500	232—245
xxOpzS3000LA	3000	264

### 3.3. Модель расчета токов КЗ с учетом нелинейности системы постоянного тока

Для правильного выбора уставок срабатывания аппаратов защиты проверки их чувствительности и селективности необходимо знать минимальные значения токов КЗ в короткозамкнутых цепях, питаемых не только однотипными источниками, но также комплексом разных источников при КЗ за общим для них сопротивлением. При определении минимального значения тока КЗ необходимо учитывать степень увеличения активного сопротивления жил кабельных линий и влияние активного сопротивления дуги в месте КЗ к моменту его отключения.

Для обоснования рекомендаций расчета тока КЗ с учетом нелинейности короткозамкнутой цепи разработана математическая модель короткого замыкания в системе питаемом аккумуляторной батареей и статическим преобразователем. Модель учитывает влияние активного сопротивления электрической дуги и теплового спада тока КЗ при адиабатическом и неадиабатическом нагреве проводников.

При разработке модели электрической дуги использованы результаты натуральных исследований [7, 13, 14]. Было принято, что развивающаяся в течение КЗ электрическая дуга может быть устойчивой или динамической (самопогасающей).

При разработке модели устойчивой дуги учитывалось, что несмотря на динамический характер горения дуги, затрудняющий изучение параметров процесса КЗ, можно выделить промежутки времени, в которые дуга горит относительно спокойно. Для этих промежутков определялись характеристики устойчивого горения дуги.

Для этого наиболее удобным оказался промежуток, следующий непосредственно за перегоранием плавкой вставки (см. рис. 2.15). В процессе движения, особенно в начале его, дуга не успевает сильно вытянуться, так как одновременно с перемещением столба дуги движутся анодное и катодное пятна, т.е. в этом промежутке дуга горит устойчиво.

Используя осциллограммы натурального эксперимента  $U_d = f(t)$  были построены кривые для напряжения на дуге при разных дуговых промежутках (рис. 3.7, кривая 2).

При построении кривых  $U_d = f(l_d)$  для фиксированных значений дуговых промежутков (1, 2, 3, 5 и 7 см) по опытным данным напряжений на дуге, применяя теорию вероятностей были определены следующие средние значения напряжений: при  $l_d = 1$  см  $U_d = 54,4$  В;  $l_d = 3$  см —  $U_d = 68,1$  В;  $l_d = 5$  см —  $U_d = 93,5$  В и т.д. Величина  $U_d$ , распределенная по нормальному закону, отклоняется от математического ожидания не более чем на утроенное среднеквадратическое отклонение. На рис. 3.7 показана зона среднеквадратического отклонения величины  $U_d$ . Кривая 1 соответствует уравнению дуги, полученному [34] при токах, не превышающих нескольких десятков ампер

$$U_d = 30 + 10l_d,$$

где 30 — падение напряжения в катодной и анодной областях, В; 10 — градиент напряжения на дуге, В/см.

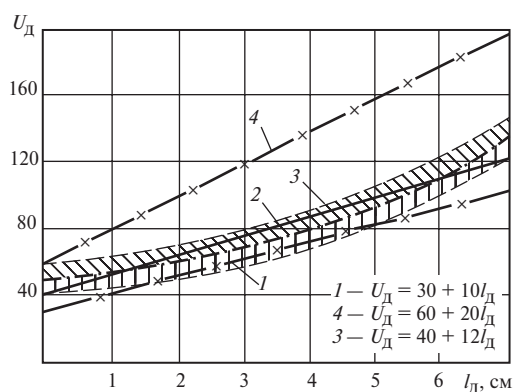


Рис. 3.7. Напряжение на дуге при разных дуговых промежутках

Кривая 4 соответствует уравнению дуги, полученному по экспериментальным данным при больших токах КЗ (15—70 кА) [20]

$$U_{\text{д}} = 60 + 20I_{\text{д}}.$$

Чтобы получить аналогичное уравнение дуги при токах КЗ до 5—6 кА, в зоне кривой 2 проведена прямая 3, соответствующая зависимости  $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$  и отличающаяся от кривых 1 и 4 лишь математической записью:

$$U_{\text{д}} = 40 + 12I_{\text{д}}.$$

Расчетное значение активного сопротивления *устойчивой дуги*  $R_{\text{дт}}$  мОм, можно определить по формуле

$$R_{\text{дт}} = \frac{40 + 12I_{\text{д}}}{I_{\text{расч т}} K_{\text{дт}}}, \quad (3.13)$$

где  $I_{\text{расч т}}$  — расчетное значение тока металлического КЗ, кА;  $K_{\text{дт}}$  — коэффициент снижения тока при КЗ через дугу, который определен по данным экспериментов (см. рис. 2.17) или может быть вычислен по выражению  $K_{\text{дт}} = 0,52 + 0,001R_{\text{дт}}$ ;  $R_{\text{дт}}$  — результирующее активное сопротивление цепи КЗ.

При разработке приближенной модели *самогасающей дуги* принимают, что изменение ее параметров зависит от условий КЗ: открытая или закрытая дуга.

Открытая дуга развивается в свободном пространстве при неподвижном состоянии анода и катода под действием электродинамических сил, которые стремятся придать ей форму части окружности, удлиняясь с очень большой скоростью. Условия развития закрытой дуги (якорные обмотки электрических машин, обмотки полюсов, автоматические выключатели, кабели и т.д.) ограничивают скорость ее вытягивания.

Активное сопротивление самогасающей дуги определяется по (3.13) при условии, что падение напряжения в катодной и анодной областях дуги остаются неизменными, а изменяется напряжение на дуге вследствие увеличения длины дуги. В этом случае формула для расчета  $R_{\text{д}}$  имеет вид:

$$R_{\text{дт}} = \frac{40 + 12I_{\text{дт}}}{I_{\text{дт}}}, \quad (3.14)$$

где  $l_{дт}$  — длина дуги, определяемая с помощью дифференциального уравнения, описывающего форму дуги в виде части окружности

$$\frac{dl_{дт}}{dt} = 16v_{дт} \frac{t}{3} \sqrt{l_{дт0}^2 + 4(v_{дт}t)^2}, \quad (3.15)$$

где  $v_{дт}$  — результирующая скорость удлинения открытой дуги, которая определяется по формуле

$$v_{дт} = 0,412 \sqrt[3]{I_{дт} H_t / (1 + 0,4 H_t^{0,3})^2} + v_{т.п} + v_{в}. \quad (3.16)$$

Здесь первое слагаемое в правой части описывает скорость движения столба дуги (в виде гибкого проводника) в магнитном поле [35],  $H_t$  — напряженность магнитного поля. Второе слагаемое  $v_{т.п}$  — это скорость подъема дуги, увлекаемой собственным тепловым потоком, значения которой принимаются в соответствии с рекомендациями [36],  $v_{в}$  — скорость ветра или воздушного потока (воздействующие на столб дуги), которая имеет вероятностный характер. При разработке модели дуги исследовались также влияние трения по поверхности проводников оснований газового столба дуги и сопротивление воздуха движению газового столба дуги, но эти явления практического влияния на процесс развития дуги не оказывают.

**Расчет теплового спада тока КЗ.** Активное сопротивление проводника при его начальной температуре  $\vartheta_n$  определяется по формуле

$$R_n = R_{уд} l \frac{\tau_p + \vartheta_n}{\tau_p + \vartheta_{норм}}, \quad (3.17)$$

где  $R_{уд}$  — погонное (удельное) активное сопротивление проводника, Ом/м, при нормированной температуре  $\vartheta_{норм}$ ;  $l$  — длина проводника до места КЗ, м;  $\tau_p$  — условная температура, равная: для меди  $\tau_p = 234$  °С, для алюминия  $\tau_p = 236$  °С.

Температура проводника до короткого замыкания определяется по формуле

$$\vartheta_n = \left( \frac{I_{норм.расч}}{I_{доп.прод}} \right)^2 (\vartheta_{доп.прод} - \vartheta_{окр.ном}) + \vartheta_{окр}, \quad (3.18)$$

где  $I_{норм.расч}$  — расчетный ток нормального режима, А;  $I_{доп.прод}$  — допустимый ток продолжительного режима для проводника данного сечения, А;  $\vartheta_{доп.прод}$  и  $\vartheta_{окр.ном}$  — соответственно допустимая температура проводника в продолжительном режиме и нормированная температура окружающей среды, °С;  $\vartheta_{окр}$  — температура окружающей среды, °С.

Увеличение активного сопротивления проводников при КЗ учитывается с помощью коэффициента  $K_{\vartheta}$ :

$$R_{\vartheta t} = R_n K_{\vartheta}, \quad (3.19)$$

где  $K_{\vartheta}$  — коэффициент увеличения активного сопротивления проводника, который зависит от материала, а также начальной и конечной температур проводника и определяется по формуле

$$K_{\vartheta} = \frac{\tau_p + \vartheta_{\text{кн}}}{\tau_p + \vartheta_{\text{н}}}, \quad (3.20)$$

где  $\vartheta_{\text{н}}$  и  $\vartheta_{\text{кн}}$  — соответственно начальная и конечная температуры проводника.

Расчет конечной температуры проводника выполнялся при адиабатическом, без учета отдачи тепла в окружающую среду и неадиабатическом нагревах.

При адиабатическом нагреве в результате преобразования уравнения закона Джоуля—Ленца температура однородного проводника определяется по выражению

$$\frac{d\vartheta}{dt} = i_{\text{кз}}^2 \rho_0 K_{\vartheta} / s^2 \lambda C_0 \left[ 1 + \frac{\tau_p + \vartheta_{\text{н}}}{\tau_c + \vartheta_{\text{н}}} (K_{\vartheta} - 1) \right],$$

где  $i_{\text{кз}}$  — мгновенное значение тока КЗ, кА;  $\rho_0$  — удельное сопротивление проводника при температуре  $\vartheta_{\text{н}}$ , Ом · м;  $s$  — поперечное сечение проводника, мм<sup>2</sup>;  $\lambda$  — плотность материала проводника, кг/м<sup>3</sup>;  $C_0$  — удельная теплоемкость материала проводника при температуре  $\vartheta_{\text{н}}$ , Дж/(кг · К);  $\tau_c$  — условная температура, для меди  $\tau_c = 2200$  °С, для алюминия  $\tau_c = 3200$  °С.

Температура проводника при неадиабатическом нагреве током КЗ с учетом теплоотдачи в изоляцию определяется в соответствии с рекомендациями ГОСТ 28895-91 [42], в котором конечная температура нагрева проводника с учетом теплоотдачи в изоляцию при КЗ определялась по формуле

$$\vartheta_{\text{кн}} = (\vartheta_{\text{н}} + \beta) \exp \left[ \frac{I_{\text{кз}}^2 t_{\text{откл}}}{K_1 s^2 \varepsilon} \right] - \beta, \quad (3.21)$$

где  $I_{\text{кз}}$  — ток КЗ в момент отключения, А;  $s$  — площадь поперечного сечения проводника, мм<sup>2</sup>;  $K_1$  — постоянная, зависящая от материала проводника и равная: для меди  $K_1 = 226$  А с<sup>1/2</sup>/мм<sup>2</sup>; для алюминия  $K_1 = 148$  А с<sup>1/2</sup>/мм<sup>2</sup>;  $\beta$  — величина, обратная температурному коэф-

коэффициенту сопротивления при  $0^\circ\text{C}$ ,  $K$ , равная: для меди  $\beta = 234,5 \text{ K}$ ; для алюминия  $\beta = 228 \text{ K}$ ;  $\varepsilon$  — коэффициент, учитывающий отвод тепла в изоляцию, определяемый по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{1 + FA \sqrt{\frac{t}{s}} + F^2 B \left(\frac{t}{s}\right)},$$

где  $F$  — коэффициент, учитывающий неполный тепловой контакт между проводником и изоляцией, равный  $0,7$ ;  $A$ ,  $B$  — эмпирические постоянные (измеряемые соответственно в  $(\text{мм}^2/\text{мс})^{0,5}$  и в  $\text{мм}^2/\text{с}$ ), определяющие термические характеристики окружающих или соседних неметаллических материалов,

$$A = \frac{C_1}{\sigma_c} \sqrt{\frac{\sigma_i}{\rho_i}}; \quad B = \frac{C_2}{\sigma_c} \left(\frac{\sigma_i}{\rho_i}\right);$$

$C_1 = 2464 \text{ мм/м}$ ;  $C_2 = 1,22 \text{ К} \cdot \text{мм}^2/\text{Дж}$ ;  $\sigma_c$  — удельная объемная теплоемкость токопроводящего элемента,  $\text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ , равная: для меди  $\sigma_c = 3,45 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ ; для алюминия  $\sigma_c = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ ;  $\sigma_i$  — удельная объемная теплоемкость окружающих или соседних неметаллических материалов,  $\text{Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ , равная для бумажной пропитанной изоляции кабелей  $\sigma_i = 2 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ , для ПВХ изоляции кабелей  $\sigma_i = 1,7 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^3)$ ;  $\rho_i$  — удельное термическое сопротивление окружающих или соседних неметаллических материалов,  $\text{К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$ , равное для бумажной пропитанной изоляции кабелей  $\rho_i = 6,0 \text{ К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$ , для ПВХ изоляции кабелей до  $3 \text{ кВ}$  включительно  $\rho_i = 5 \text{ К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$ ; свыше  $3 \text{ кВ}$   $\rho_i = 6 \text{ К} \cdot \text{м}/\text{Вт}$ .

Конечная температура нагрева проводника без учета теплоотдачи  $\vartheta_{\text{кн.а}}$  (адиабатический процесс) определяется по (3.22) при  $\varepsilon = 1$ .

Анализ режимов КЗ в сети постоянного тока выполнялся при питании нагрузки от аккумуляторных батарей. Ток КЗ (ток разряда  $I_{\text{р}}$ , А) свинцово-кислотного аккумулятора с плоскопараллельными электродными пластинами в произвольный момент времени определяется по формуле [26]

$$I_{\text{кт}} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4E_0 e^{-(4D/l^2)x_k^2 t}}{2(R_{\text{вт}} + R_{\text{вшт}}) + Bl/\sin^2 x_k}, \quad (3.22)$$

где  $t$  — время начала разряда, с;  $R_{вт}$  — внутреннее сопротивление аккумулятора, Ом;

$$R_{вт} = R_{вт0} / \left( 1 + \frac{\eta}{2,5\eta + R_{вшт}} \right), \quad \eta = 0,002;$$

$$R_{вт0} = R_{э0} + R_0^+ + R_{с0};$$

$R_{э0}$  — начальное сопротивление электролита, Ом;  $R_0^+$  — начальное сопротивление положительной пластины, Ом;  $R_{с0}$  — начальное сопротивление сепаратора, Ом;  $E_0 = 0,32 + 1,43q_0$ ;  $B = (q_{11} - q_{21})N/(hd)$ ;  $q_{11}, q_{21}$  — положительная и отрицательная константы, определяемые при аппроксимации уравнений Нернста, В/(моль · л<sup>-1</sup>);  $l$  — расстояние между электродными пластинами, м;  $R_{вшт}$  — внешнее сопротивление, включающее активные сопротивления ошиновки, кабелей, проводов, токовых катушек отключающих аппаратов, контактных соединений и электрической дуги;  $x_k$  — корни уравнения  $\operatorname{ctg}x = \frac{2(R_{вт0} + R_{вшт}t)}{Bl}x$ .

Для определения корней уравнения  $\operatorname{ctg}x = ax$  применяют метод численной итерации.

#### Развитие методов расчета

**тока КЗ.** Разработка новых рекомендаций базируется на исследованиях КЗ в простых (радиальных) и сложных схемах электроустановок. Анализ результатов расчета режимов КЗ в цепи аккумуляторной батареи показал, что при относительно небольшом напряжении и при малом внутреннем сопротивлении аккумуляторов токи КЗ в сети электропитания могут составлять несколько килоампер. Так, для аккумуляторной батареи СК-24 начальный ток при металлическом КЗ вблизи ее выводов составил 10 кА и в течение КЗ ( $t_{откл} = 1$  с) снизился всего лишь на 4 % (рис. 3.8, кривая 1).

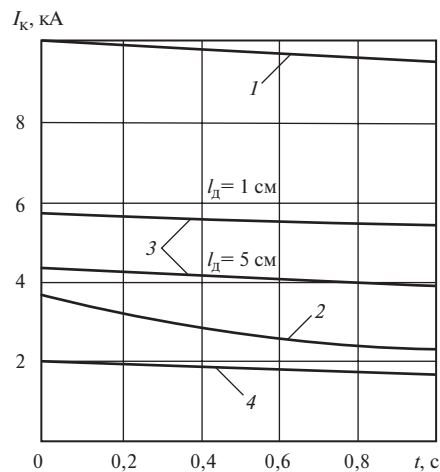


Рис. 3.8. Зависимость  $I_k = f(t)$  при металлическом КЗ (1, 2) и КЗ через устойчивую дугу на выводах аккумуляторной батареи СК-24 (3) и в кабельной линии (4)

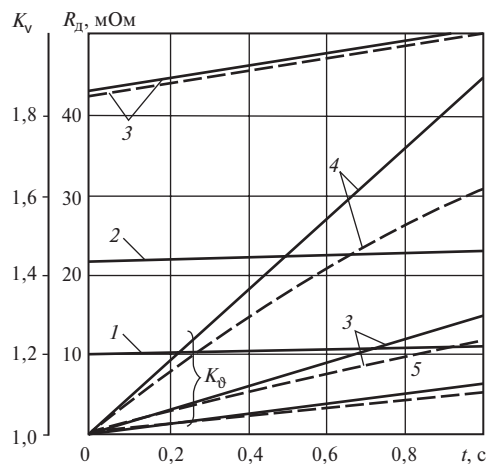


Рис. 3.9. Зависимости  $R_d = f(t)$  и  $K_\phi = f(t)$  при КЗ через устойчивую дугу на выводах аккумуляторной батареи СК-24 (1 —  $I_d = 1$  см и 2 —  $I_d = 5$  см) и в кабельной линии  $s = 25 \text{ мм}^2$  (3 — ДКЗ, 4 — МКЗ) и  $s = 120 \text{ мм}^2$  (5 — МКЗ); (---) — неадиабатический нагрев

ние КЗ уменьшается. При КЗ вблизи выводов аккумуляторной батареи СК-24 через устойчивую дугу (ДКЗ) ток в течение КЗ снижается незначительно и зависит в основном от сопротивления дуги, определяющегося длиной дугового промежутка. Например, приведенные на рис. 3.9 кривые 1 и 2 и на рис. 3.8, кривые 3 показывают, что при  $I_d = 1$  см сопротивление дуги в течение КЗ изменяется в интервале 10,4—10,9 мОм, ток КЗ в интервале 5,8—5,46 кА (на 6 %); при  $I_d = 5$  см  $R_{дт} = 21,8—22,9$  мОм;  $I_{кт} = 4,27—3,99$  кА (на 6 %).

Степень влияния силового кабеля на параметры режима при дуговом КЗ снижается по сравнению с металлическим КЗ. Как показывает сравнение расчетных кривых 2 и 4 (рис. 3.8) ток КЗ под влиянием сопротивления кабеля уменьшается, однако характер его изменения остается таким же как и при КЗ через дугу (кривые 3). Это объясняется меньшим увеличением его активного сопротивления вызванного ограничением тока КЗ сопротивлением дуги.

Как показывают расчеты тепловой спад тока КЗ значительно снижается при учете теплоотдачи. На рис. 3.9 штриховыми кривыми 3 и 4 показано, что при адиабатическом нагреве коэффициент увеличения активного сопротивления  $K_\phi$  может быть завышен, по срав-

При удаленном металлическом КЗ (МКЗ), например в кабельной линии, характер изменения тока в месте КЗ зависит от процесса увеличения активного сопротивления жил кабеля вследствие нагрева их током КЗ. Например, активное сопротивление силового кабеля с алюминиевыми жилами ( $s = 25 \text{ мм}^2$ ;  $l_{кб} = 20$  м) при КЗ в течение 1 с увеличилось примерно в два раза (рис. 3.9, кривая 4), что привело к снижению тока в месте КЗ примерно на 30 % (см. рис. 3.8, кривая 2).

С уменьшением длины и с увеличением поперечного сечения жилы кабеля степень его влияния на характер изменения тока в течение



нению с его значением при не адиабатическом нагреве, более чем на 10 %.

Для выяснения характера процесса устойчивого дугового КЗ в сети питаемой другими аккумуляторными батареями были выполнены аналогичные расчеты для условий питания нагрузки от аккумуляторных батарей СК-1, СК-20; СК-24, СК-28 и СН. Как показывают расчетные кривые зависимостей  $I_k = f(t)$ ,  $R_d = f(t)$  и  $K_g = f(t)$  приведенные на рис. 3.10, а, б, характер изменения параметров режима КЗ для всех типов аккумуляторных батарей практически одинаков.

Однако следует отметить, что значения величин, характеризующих режим КЗ в начальный и произвольный моменты КЗ зависят от параметров аккумуляторных батарей. Так, максимальное значение тока КЗ в начальный момент, в зависимости от типа аккумуляторной батареи, составляет: для СК-1 0,433 кА; СК-20 8,6 кА; СК-24 10 кА; СК-28 12 кА.

Влияние на ток КЗ активного сопротивления *самопогасающей открытой дуги* зависит от скорости ее удлинения. В расчете принято, что после возникновения, дуга сразу же начинает растягиваться при этом увеличивается напряжение на дуге  $U_d$ . Если  $U_d$  будет расти медленнее, чем напряжение пробоя (потенциал повторного зажигания  $U_{п.з}$ ), т.е.  $dU_d/dt < dU_{п.з}/dt$ , то при удлинении дуги ее сопротивление увеличивается и дуга погасает. Так как скорость удлинения дуги очень высока, то КЗ в этом случае имеет характер кратковременного импульса. Дуга горит только то время, в течение которого еще не произошла диффузия паров металла плавкой вставки из дугового промежутка.

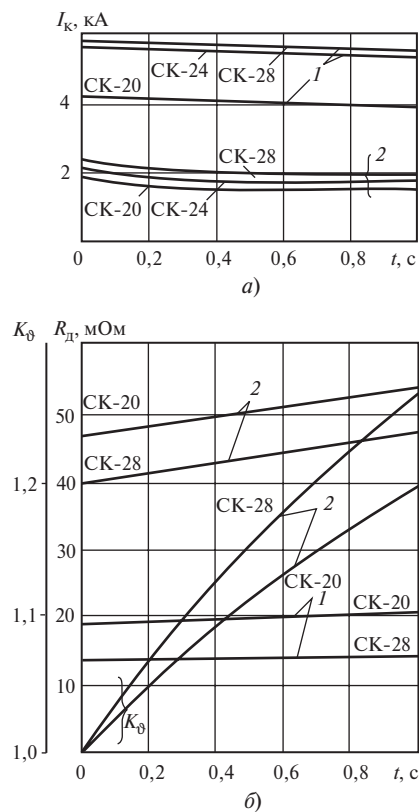
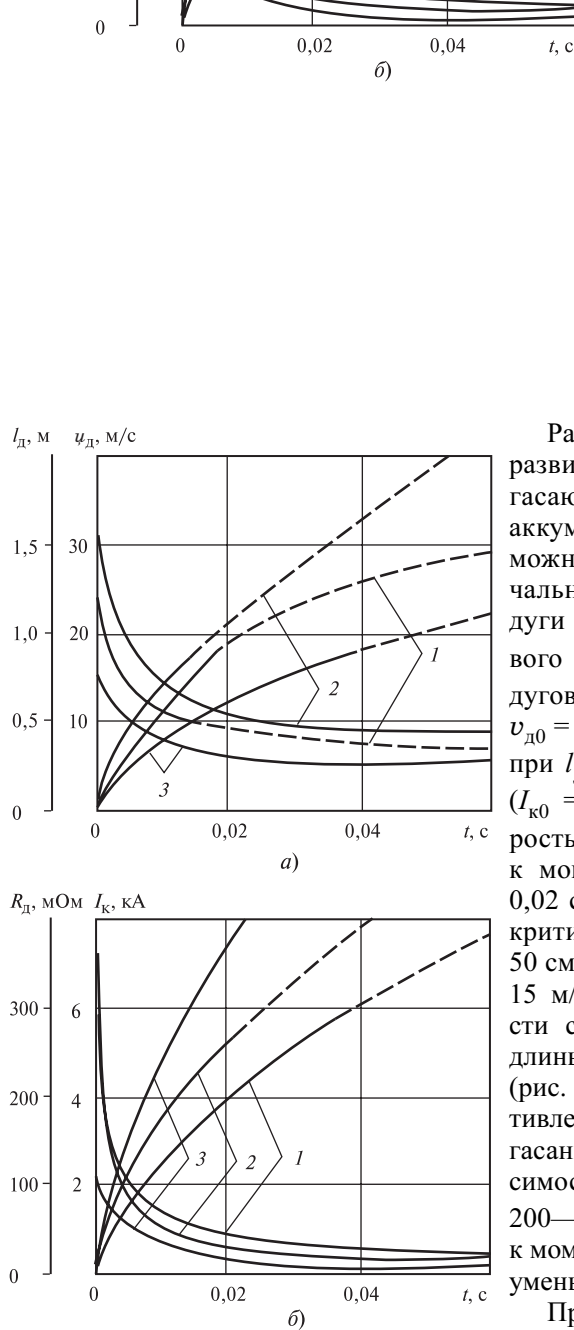


Рис. 3.10. Зависимости  $I_k = f(t)$ ,  $R_d = f(t)$  и  $K_g = f(t)$  при КЗ через дугу у выводов аккумуляторной батареи (1) и в кабельной линии (2)  $s = 25 \text{ мм}^2$ ,  $I_{кб} = 20 \text{ м}$



**Рис. 3.11.** Зависимости  $l_d = f(t)$ ,  $v_d = f(t)$ ,  $R_d = f(t)$ ,  $I_k = f(t)$  при КЗ через самопогасяющуюся дугу на выводах аккумуляторной батареи СК-28 (1 —  $l_d = 3$  см; 2 —  $l_d = 0,05$  см) и в кабельной линии (3)

Это приводит к снижению начальной скорости удлинения дуги и ее активного сопротивления. Продолжительность горения дуги в этом случае затягивается и составляет примерно 0,02—0,03 с. При такой небольшой продолжительности и быстром снижении тока, жилы кабеля практически не нагреваются током КЗ и тепловой спад тока КЗ не оказывает существенного влияния на процесс КЗ.

Рассматривая процесс развития открытой самопогасяющейся дуги у выводов аккумуляторной батареи можно отметить, что начальная скорость удлинения дуги ( $v_{d0}$ ) зависит от дугового промежутка ( $l_{d0}$ ). При дуговом промежутке 0,5 см,  $v_{d0} = 37$  м/с ( $I_{к0} = 7,33$  кА) при  $l_{d0} = 5$  см,  $v_{d0} = 24$  м/с ( $I_{к0} = 5,88$  кА). Затем скорость резко уменьшается и к моменту времени 0,01—0,02 с, когда дуга достигает критической длины (40—50 см), составляет 10—15 м/с. Уменьшение скорости связано с увеличением длины и сопротивления дуги (рис. 3.11, а, б). Так, сопротивление дуги к моменту погасания составляет, в зависимости от  $l_{d0}$ , примерно 200—250 мОм. Ток КЗ к моменту времени 0,01 с уменьшается в 5—7раз.

При КЗ через открытую дугу в конце кабеля дуга развивается в условиях меньшего тока КЗ, ограниченного сопротивлением кабеля (например, при  $s = 25$  мм<sup>2</sup>,  $l_{кб} = 20$  м,  $I_{к0} =$

При анализе режима КЗ через самопогасающуюся закрытую дугу было принято, что скорость ее удлинения составляет примерно 3—0,5 м/с. Такие значения скорости были получены в результате приближенной обработки экспериментальных данных. Расчеты выполнялись для режима КЗ у выводов аккумуляторной батареи СК-28 при следующих начальных значениях скорости удлинения дуги:  $v_{д0} = 2,4; 1,2; 0,76; 0,24$  м/с. Кривые  $I_d = f(t)$ ,  $v_d = f(t)$ ,  $R_d = f(t)$  и  $I_d = f(t)$  приведены на рис. 3.12, а, б.

Анализ результатов расчета КЗ у выводов аккумуляторной батареи показал, что несмотря на относительно небольшую скорость удлинения дуги влияние ее на ток КЗ значительно. Особенностью процесса является увеличение продолжительности горения дуги, которая составляет примерно 0,2—0,3 с. Причем, при небольшой начальной скорости удлинения дуги ( $v_{д0} = 0,24$  м/с) возможен переход режима самопогасающей дуги в режим устойчивого горения дуги (кривые 4).

При исследовании дугового КЗ в конце кабельной линии установлено, что несмотря на относительно длительный период горения дуги, вследствие быстрого снижения тока КЗ, жилы кабельной линии нагреваются незначительно и изменение активного сопротивления кабеля практически не оказывает влияния на ток КЗ за исключением кабелей с малым поперечным сечением жил (4 и 10 мм<sup>2</sup>).

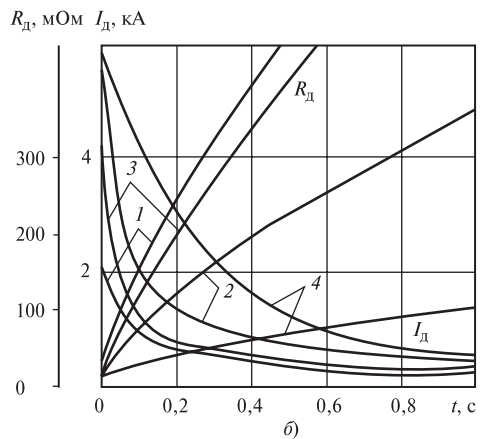
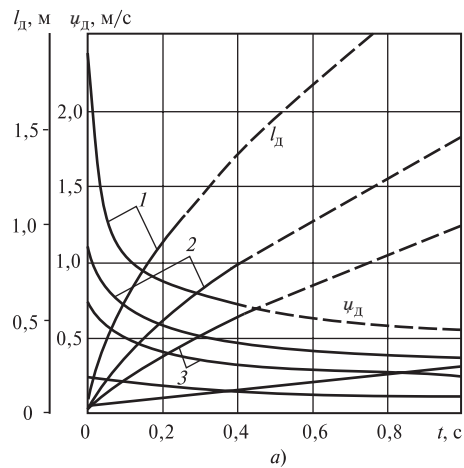


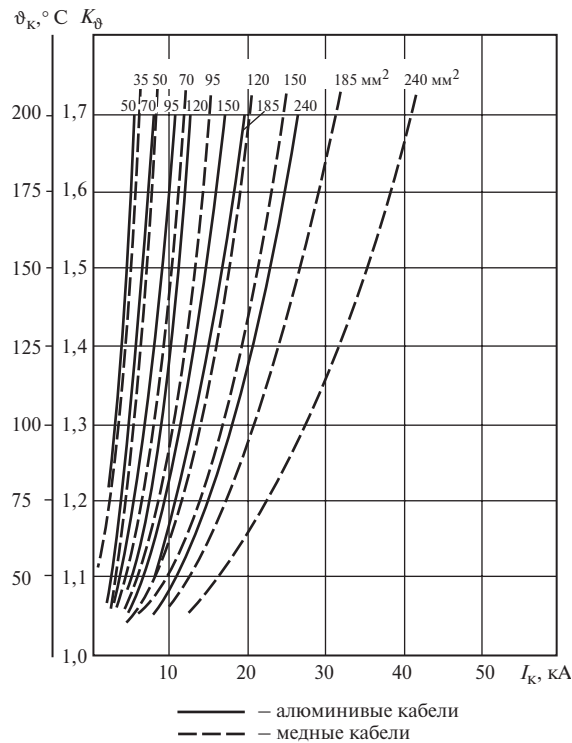
Рис. 3.12. Зависимости  $I_d = f(t)$ ,  $v_d = f(t)$ ,  $R_d = f(t)$ ,  $I_d = f(t)$  при КЗ в цепи аккумуляторной батареи СК-28 при разной начальной скорости удлинения дуги:

1 —  $v_{д0} = 2,4$  м/с; 2 —  $v_{д0} = 1,2$  м/с; 3 —  $v_{д0} = 0,73$  м/с; 4 —  $v_{д0} = 0,24$  м/с

Практический интерес представляет исследование режимов КЗ в системе постоянного тока, получающей питание от преобразователей энергии. Известно, что в качестве зарядно-подзарядных агрегатов на современных электростанциях и подстанциях используются полупроводниковые регулируемые выпрямители. Внешняя вольт-амперная характеристика большинства полупроводниковых зарядно-подзарядных агрегатов имеет два участка: на первом, в диапазоне рабочих токов, регулятор поддерживает на заданном уровне напряжение, а на втором осуществляется ограничение тока. Современные регуляторы обеспечивают поддержание напряжения на выводах аккумуляторной батареи с точностью  $\pm 1\%$ , из чего следует, что даже при удаленных КЗ зарядно-подзарядный агрегат будет работать на втором участке вольт-амперной характеристики. Таким образом, при КЗ зарядно-подзарядный агрегат можно представлять в виде источника тока. Ток источника принимается равным уставке ограничения тока преобразователя. Учитывая многочисленность типов и параметров преобразователей энергии, в работе рассмотрен также режим КЗ, при котором ток КЗ у выводов переменного тока преобразователя составлял примерно 15 кА. Анализ результатов дуговых КЗ с учетом теплового спада показал, что независимо от типа преобразователя, изменение параметров режима КЗ в системе постоянного тока имеет практически такой же характер, как и в цепях при КЗ, питаемых аккумуляторными батареями.

В результате обобщения данных многочисленных расчетов режимов КЗ в электроустановках постоянного тока, питаемых аккумуляторными батареями, установлено, что при определении минимального тока при металлическом КЗ, за кабельной линией необходимо учитывать степень увеличения активного сопротивления кабеля к моменту отключения КЗ, которая может быть определена с помощью коэффициента  $K_g$ , рассчитанного для адиабатического и неадиабатического нагрева. Для определения коэффициента  $K_g$  разработана серия расчетных кривых зависимости коэффициента от поперечного сечения жилы кабеля, значения тока и продолжительности КЗ [21]. На рис. 3.13 приведены зависимости  $K_g = f(s_{кб}, I_k)$  для кабелей разных сечений с медными и алюминиевыми жилами от тока КЗ при продолжительности КЗ, равной 1 с.

Для расчетов КЗ через устойчивую дугу в цепи аккумуляторной батареи следует учитывать в комплексе все факторы влияющие на процесс КЗ: характер разряда батареи, электрическую дугу, тепловой спад тока КЗ при неадиабатическом нагреве. Такие расчеты можно выполнять, используя разработанный алгоритм для ЭВМ. Для практических расчетов разработана серия кривых зависимостей одновремен-



**Рис. 3.13. Зависимости коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей с медными и алюминиевыми жилами при продолжительности КЗ, равной 1 с от тока КЗ**

ного изменения активного сопротивления дуги  $R_{дл}$  и коэффициента увеличения активного сопротивления кабеля  $K_{вг}$  от поперечного сечения жилы и длины медных и алюминиевых кабелей, определяемой расстоянием от выводов аккумуляторной батареи до места КЗ. На рис. 3.14 приведены зависимости  $R_{дл} = f(s, I_{кз})$  и  $K_{вг} = f(s, I_{кз})$  при КЗ через устойчивую дугу в кабельной линии питаемой от аккумуляторной батареи СК-24 при  $t_{откл} = 1$  с и неадиабатическом нагреве.

При приближенных расчетах тока КЗ через устойчивую дугу продолжительностью до 1 с допускается не учитывать изменение тока в течение КЗ. Возможная погрешность расчета не превосходит допустимую погрешность (10 %).

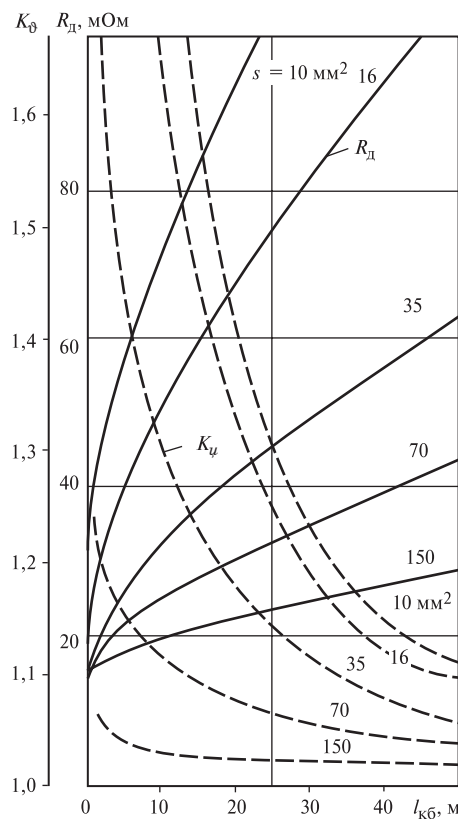


Рис. 3.14. Зависимости  $R_d = f(I_{кб})$  и  $K_d = f(s, I_{кб})$  при КЗ через устойчивую дугу в кабельной линии питаемой от аккумуляторной батареи СК-24 при  $t_k = 1$  с (неадиабатический нагрев)

Анализ приведенных на рис. 2.17 кривых  $K_d = f(R_{кг})$  показывает, что для приближенного учета влияния сопротивления устойчивой дуги на ток КЗ можно принять  $K_d = 0,65 \pm 0,14$  для максимальных значений тока КЗ и  $K_d = 0,5 \pm 0,12$  для средних значений тока КЗ. Кроме того, при расчетах токов КЗ с помощью ЭВМ, приведенные на рис. 2.17, а, б кривые могут быть представлены соответствующими полиномами: кривая на рис. 2.17, а:  $K_d = 0,52 + 0,001R_{кг}$ ; кривая на рис. 2.17, б:  $K_d = 0,459 + 0,0004R_{кг}$ .

110

Значение тока КЗ с учетом влияния активного сопротивления устойчивой дуги можно определить также по зависимости  $K_d = f(R_{кг})$ , полученной при натуральных экспериментах.

В сети питаемой аккумуляторной батареей типа СК вероятное значение тока дугового КЗ может быть определено по известному значению тока металлического КЗ и значению сопротивления короткозамкнутой цепи, используя вероятностные характеристики, приведенные на рис. 2.17.

Например, наиболее вероятное среднее значение тока дугового КЗ определяется по формуле:

$$I_{д. ср} = I_{к0м} K_{д. ср}$$

где  $I_{к0м}$  — расчетное начальное значение тока металлического КЗ;  $K_{д. ср}$  — коэффициент снижения тока КЗ, который определяется в зависимости от значения суммарного сопротивления петли металлического КЗ  $R_{кг}$  по кривой рис. 2.17, б.

Для практических расчетов с небольшой погрешностью эту зависимость можно представить линейной функцией:

$$K_d = 0,5 + 0,0001R_{кр}. \quad (3.23)$$

Необходимость определения тока при дуговом замыкании по разным кривым амплитудных и средних (действующих) величин вызвана тем, что аппараты защиты в зависимости от конструкции реагируют либо на действующее значение тока (рис. 2.17, б) (предохранители, тепловые расцепители автоматических выключателей, электромагнитный расцепитель выключателя типа АВМ), либо на амплитудное значение (рис. 2.17, а), как у малоинерционных мгновенных расцепителей выключателей АЗ700; АЗ100 и т.п. Поэтому, при проведении расчетов уставок срабатывания аппаратов защиты, расчет наиболее вероятной величины тока дугового замыкания следует производить, учитывая технические характеристики аппарата защиты.

Таким образом, на базе экспериментальных и расчетных исследований разработаны рекомендации развития методов расчета тока КЗ в электроустановках постоянного тока, которые предусматривают учет совместного влияния на ток КЗ:

- изменения параметров аккумуляторных батарей;
- увеличение активного сопротивления жил кабелей при неадиабатическом нагреве их током металлического и дугового КЗ;
- активного сопротивления устойчивой или самопогасающейся электрической дуги с учетом их вероятностных характеристик.

Учет указанных выше факторов при расчете токов КЗ позволяет правильно определить требования к чувствительности и быстродействию защиты сетей от дуговых КЗ, термической и пожарной стойкости кабельных линий и разработать рекомендации рационального построения сетей и конструкций электрических аппаратов.

## **4 РАСЧЕТ ТОКОВ КЗ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

---

### **4.1. Общие положения**

Расчет токов КЗ в электроустановках постоянного тока в начальный и произвольный моменты времени, необходим для выбора электрооборудования и проверки его по условиям КЗ, для выбора уставок и оценки действия защит и автоматики, для расчета заземляющих устройств.

Расчет токов производится для условий замыкания полюсов сети постоянного тока, а также при замыкании полюса на землю (корпус) заземленной сети.

Величины, подлежащие определению, и допустимая погрешность расчетов токов КЗ определяются целями расчета. Для выбора электрооборудования и защит допускаются приближенные методы расчета. Определению подлежат:

- значение тока КЗ в цепях постоянного тока в произвольный момент времени;
- максимальное (пиковое) значение тока КЗ в цепях постоянного тока;
- ударный ток КЗ в цепях переменного тока вентильных преобразователей (при трех- и двухфазных КЗ в вентильных обмотках преобразовательных трансформаторов);
- максимальное значение установившегося тока КЗ в цепях постоянного тока вентильных преобразователей;
- минимальное значение установившегося тока КЗ в цепях постоянного тока вентильных преобразователей.

Электрооборудование установок постоянного тока в схемах замещения, соответствующих расчетным схемам, учитывают элементами с сосредоточенными параметрами. Все элементы схемы замещения, кроме элементов, замещающих электрическую дугу, внутреннее сопротивление аккумуляторных батарей, активное сопротивление проводников допустимо считать обладающими линейными характеристиками, т.е. их самоиндуктивность и взаимоиндуктивность, коэффициент магнитного рассеяния, принимать неизменными, не зависящими от значения тока и напряжения.

Параметры схем замещения могут быть выражены как в именованных, так и в относительных единицах, (предпочтительно испол-



зование системы именованных единиц) и отнесены к ступени напряжения сети постоянного тока.

При расчетах токов КЗ в электроустановках, в которых источниками энергии (преобразователями) являются трехфазные вентиляные выпрямители, составление схем замещения трехфазных цепей переменного тока, а также определение параметров различных элементов и приведение их к одной ступени напряжения следует производить в соответствии с ГОСТ 27514-87.

При упрощенных расчетах допустимо источники энергии (преобразователи) в схемах замещения представлять эквивалентными параметрами, косвенно учитывающими параметры схемы и режима питающей сети переменного тока.

При определении минимального значения тока КЗ необходимо учитывать факторы снижающие значение тока: сопротивление электрической дуги, в месте КЗ, увеличение активного сопротивления проводников при нагреве их током КЗ с учетом теплоотдачи в изоляцию, внутреннее сопротивление аппаратов защиты, переходные сопротивления разъемных контактов и изменения параметров аккумуляторной батареи.

#### **4.2. Расчет токов КЗ в электроустановках, получающих питание от аккумуляторных батарей**

При составлении схемы замещения для расчетов токов КЗ в электроустановках, получающих питание от аккумуляторной батареи, допустимо не учитывать индуктивные сопротивления элементов цепей.

Внешнее сопротивление цепи КЗ ( $R_{внш}$ ), т.е. сопротивления между АБ и местом КЗ, в общем случае равно

$$R_{внш} = R_{ош} + R_{кб} + R_{пр} + R_{т.к} + R_{к.с} + R_{эк} + R_{пл. пр}, \quad (4.1)$$

где  $R_{ош}$  — сопротивление постоянному току ошиновки аккумуляторного помещения, Ом, которое вычисляется исходя из удельного сопротивления материала шин ( $\rho$ ), их сечения ( $s_{ш}$ ) и длины шин ( $l_{ош}$ ) по формуле:  $R_{ош} = \rho l_{ош} / s_{ш}$ ;

$R_{кб}$  — активное сопротивление кабелей, Ом. Значения определяются из справочных данных с учетом того, что в петлю короткого замыкания входят два полюса — положительный и отрицательный, поэтому сопротивление петли в два раза больше сопротивления прямой последовательности кабелей, обычно задаваемых для расчетов на переменном токе. Вследствие отсутствия поверхностного эффекта на постоянном токе сопротивления кабелей сечением жил более 150 мм<sup>2</sup> будут на 2—3 % меньше сопротивления на переменном токе.

Активное сопротивление кабеля при его начальной температуре определяется по формуле (3.17). В отличие от электроустановок переменного тока, кабели в электроустановках постоянного тока большую часть времени не обтекаются током, следовательно, температура их жил равна температуре окружающей среды.

Активные сопротивления кабелей в справочниках часто приведены к длительно допустимой температуре, определяющейся типом изоляции [38].

Для пересчета погонных сопротивлений жил кабеля можно использовать коэффициент  $K_{\vartheta}$ , рассчитываемый по (3.20) или по выражению

$$K_{\vartheta} = 1 + 0,004(\vartheta - \vartheta_{\text{дл.доп}}), \quad (4.2)$$

где  $\vartheta$  — температура жил кабеля;

$\vartheta_{\text{дл.доп}}$  — температура, к которой приведено сопротивление кабеля в справочнике;

$R_{\text{пр}}$  — активное сопротивление проводов, Ом;

$R_{\text{т.к}}$  — сопротивление катушек последовательных отключающих аппаратов, Ом;

$R_{\text{к.с}}$  — переходное активное сопротивление контактов, Ом, принимается равным сопротивлению на переменном токе (см. [38]);

$R_{\text{э.к}}$  — активное сопротивление элементного коммутатора (если он используется), принимается равным 5 мОм;

$R_{\text{пл.пр}}$  — внутреннее сопротивление плавкого предохранителя, которое можно определить по данным о максимально допустимых потерях активной мощности  $\Delta P$ , представляемым заводом-изготовителем:

$$R_{\text{пл. пр}} = \Delta P / I_{\text{ном}}^2, \quad (4.3)$$

где  $I_{\text{ном}}^2$  — номинальный ток плавной вставки, А.

**Расчет тока КЗ с учетом влияния электрической дуги в месте КЗ и теплового спада тока КЗ.** При определении минимального значения тока КЗ необходимо учитывать влияние на ток КЗ активного сопротивления электрической дуги, возникающей в месте КЗ. Значение тока в начальный момент дугового КЗ рекомендуется определять по формуле

$$I_{\text{к.д}} = K_{\text{д}} I_{\text{к.м}}, \quad (4.4)$$

где  $K_{\text{д}}$  — поправочный коэффициент;  $I_{\text{к.м}}$  — ток металлического КЗ.

Значения коэффициента  $K_d$  для электроустановок с аккумуляторными батареями являются функцией результирующего сопротивления цепи КЗ

$$R_{\Sigma} = R_{вт} + R_{вш}$$

и их можно определять по рис. 3.14, кривой 1 на рис. 4.1 или по (3.23).

При расчете тока в произвольный момент КЗ для учета влияния активного сопротивления дуги могут быть использованы выражения (3.13) или (3.23) с учетом изменения активного сопротивления цепи КЗ.

*Тепловой спад тока* или увеличение активного сопротивления жил кабеля к моменту отключения цепи вследствие его нагрева током КЗ можно определить с учетом коэффициента  $K_g$  по (3.19). При приближенных расчетах значение коэффициента  $K_g$  допускается принимать равным 1,5. При уточненных расчетах  $K_g$  можно определять в соответствии с рис. 3.13, 4.2 и 4.3 в зависимости от сечения кабеля, тока и продолжительности КЗ, а также по (3.20) с учетом теплоотдачи в изоляцию.

Учет взаимного влияния при изменении сопротивления дуги  $R_{дт}$  и сопротивления кабеля  $R_{кбт}$  может быть выполнен при расчете тока КЗ с помощью ЭВМ, а для практических расчетов с помощью кривых рис. 3.14.

Расчет тока в начальный момент КЗ в сети, питаемой от свинцово-кислотного аккумулятора можно производить по формуле (3.12).

Расчет тока в произвольный момент КЗ от аккумуляторной батареи можно осуществить по формуле (3.22).

Нелинейные вольт-амперные характеристики аккумуляторных батарей типа СК обычно аппроксимируют двумя линейными функциями, которым соответствуют следующие значения ЭДС и внутреннего сопротивления одного аккумулятора:

$$E = 1,93 \text{ В и } R = 5,4 \text{ мОм — для токов от 0 до } 150 \text{ N;}$$

$$E = 1,70 \text{ В и } R = 4,0 \text{ мОм — для токов больше } 150 \text{ N,}$$

где  $N$  — номер аккумулятора.

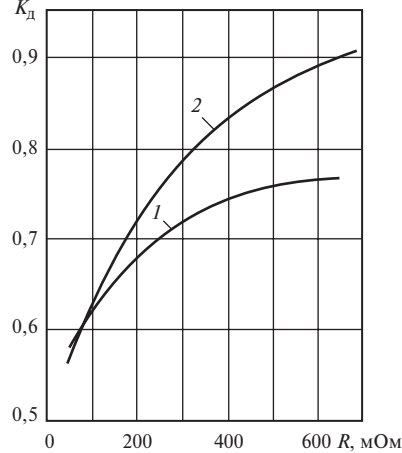


Рис. 4.1. Зависимости коэффициента  $K_d$ , определенного экспериментально для аккумуляторной батареи типа СК (1) и машины постоянного тока мощностью до 100—150 кВт (2), от сопротивления цепи КЗ

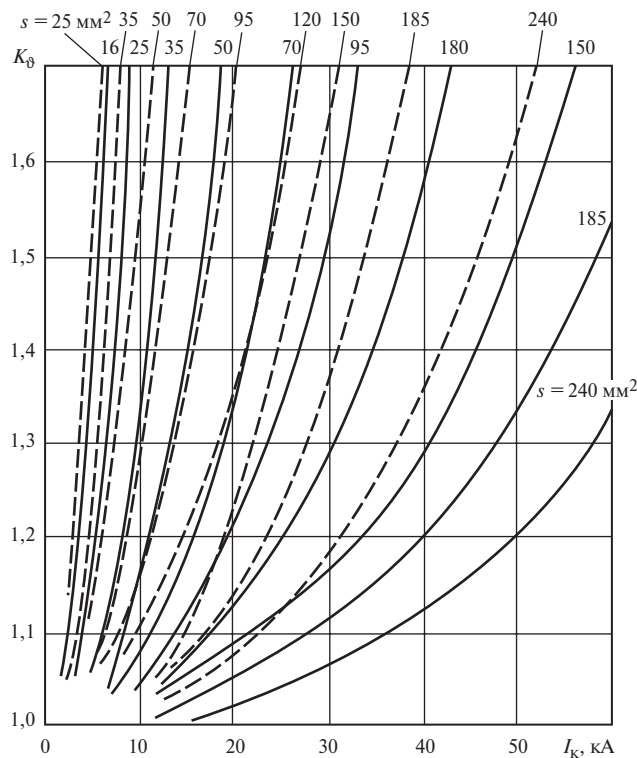


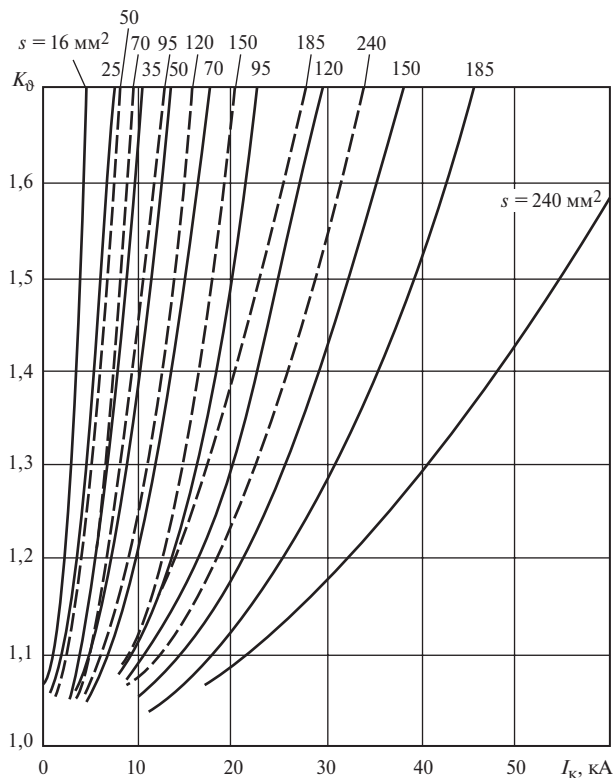
Рис. 4.2. Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей разных сечений с медными жилами от тока КЗ при продолжительностях КЗ 0,2 с (сплошные линии) и 0,6 с (штриховые линии)

Нелинейность вольт-амперной характеристики аккумуляторов невелика и ее можно, с приемлемой для инженерных расчетов точностью, аппроксимировать одной линейной функцией, т.е. иметь на всем интервале возможных токов одно внутреннее сопротивление и одно значение эквивалентной ЭДС аккумулятора. Важно учесть изменение параметров аккумуляторов, обусловленное их текущим состоянием заряженности и температурой окружающей среды (см. табл. 3.1).

Параметры аккумуляторной батареи из  $n$  элементов определяются по следующим формулам:

$$E_{AB} = nE; R_{AB} = nR/N. \quad (4.5)$$

Линеаризованные параметры некоторых типов аккумуляторов приведены в табл. 3.2. Внутреннее сопротивление аккумуляторов



**Рис. 4.3.** Зависимость коэффициента увеличения активного сопротивления кабелей разных сечений с алюминиевыми жилами от тока КЗ при продолжительностях КЗ 0,2 с (сплошные линии) и 0,6 с (штриховые линии)

приведено к 1 А · ч их номинальной емкости, что позволяет сравнивать электрические характеристики аккумуляторов различного типа и упрощает учет процессов деградации характеристик и учет степени заряженности. Для вычисления ЭДС и сопротивления аккумуляторной батареи из  $n$  элементов емкостью  $Q_{10}$  (при десятичасовом токе разряда) по данным из табл. 3.2, необходимо воспользоваться следующими формулами:

$$E_{AB} = nE; \quad R_{AB} = nr_{уд}/Q_{10}. \quad (4.6)$$

При отсутствии паспортных данных о зависимости параметров свинцово-кислотных аккумуляторов от температуры окружающей среды и степени разряженности можно использовать данные для аккумуляторов типа СК, приведенные в табл. 3.1.

При расчете тока КЗ для выбора аппаратов защиты, соответствующие ЭДС и коэффициент увеличения сопротивления выбираются из табл. 3.1. При проверке аппаратов защиты на чувствительность необходимо брать значения ЭДС и сопротивления разряженного аккумулятора при минимальной допустимой температуре в соответствии с Правилами устройства электроустановок.

*Пример.* Проверить чувствительность автоматического выключателя в присоединении аккумуляторной батареи (АБ) к шинам щита постоянного тока (ЩПТ) ТЭЦ.

Аккумуляторная батарея СК-28 соединена с проходной доской медными шинами круглого сечения диаметром 16 мм и общей длиной 12 м. От проходной доски к ЩПТ проложена кабельная линия  $l$  длиной 46 м. В каждом полюсе линии используется кабель ВВГ 4×95 мм<sup>2</sup>. В цепи ввода аккумуляторной батареи на ЩПТ установлены: автоматический выключатель (АВ) ВА55-41 (номинальный ток 1000 А) и рубильник РЕ19-41.

Расчетные условия для проверки аппарата защиты на чувствительность, предполагают учет всех факторов, действующих на уменьшение тока короткого замыкания. Суммарное сопротивление цепи КЗ:  $R_{\Sigma} = R_{AB} + R_{ш} + R_{кб} + R_{AB} + R_p$ , где  $R_p$  — сопротивление рубильника.

В конце срока службы аккумуляторная батарея может иметь емкость на 20 % меньше номинальной, т.е.  $Q'_{10} = 0,8NQ_{10}$ ;  $Q'_{10} = 0,8 \times 28 \times 36 = 806,4 \text{ А} \cdot \text{ч}$ . Следовательно, внутреннее сопротивление одного аккумулятора составит  $R = r_{уд} / Q'_{10} = 180 / 806,4 = 0,223 \text{ мОм}$ .

С учетом аварийного разряда, сопротивление аккумулятора возрастет в  $7,05 / 5,00 = 1,41$  раза (см. табл. 3.1) и составит  $1,41 \times 0,223 = 0,314 \text{ мОм}$ . На ТЭЦ, с учетом места расположения АВ, увеличение сопротивления обусловленное пониженной температурой окружающей среды, можно не учитывать.

Здесь рассматривается короткое замыкание на шинах управления ЩПТ, к которым присоединена основная часть АВ со 108 аккумуляторами, «хвостовые» элементы не учитываются. Общее сопротивление и ЭДС АВ в соответствии с (4.6) составляют

$$R_{AB} = 108 \cdot 0,314 = 33,96 \text{ мОм}; \quad E_{AB} = 108 \cdot 2,0 = 216 \text{ В}.$$

Сопротивление шин, соединяющих АВ с проходной доской

$$R_{ш} = l \frac{\rho_{20}}{s_{ш}} = 12 \frac{18,4}{\pi(16/2)^2} = 1,10 \text{ мОм}.$$

Сопротивление двух полюсов кабельной линии между проходной доской и ЩПТ

$$R_{кб} = 2l \frac{\rho_{20}}{s_{ш}} = 2 \cdot 46 \cdot \frac{18,4}{4 \cdot 95} = 4,45 \text{ мОм.}$$

Сопротивление двух полюсов вводного автоматического выключателя, согласно приложения 6 ГОСТ Р 50270-92:  $R_{АБ} = 2 \times 0,25 = 0,50 \text{ мОм.}$

Сопротивление двух полюсов рубильника, из приложения 4 ГОСТ Р 50270-92:  $R_p = 2 \times 0,08 = 0,16 \text{ мОм.}$

Суммарное сопротивление петли металлического короткого замыкания:

$$R_{\Sigma} = R_{АБ} + R_{ш} + R_{кб} + R_{АБ} + R_p = 33,96 + 1,10 + 4,45 + 0,50 + 0,16 = 40,17 \text{ мОм.}$$

Ток в начальный момент металлического короткого замыкания

$$I_m = \frac{E_{АБ}}{R_{\Sigma}} = \frac{216}{40,17} = 5,38 \text{ кА.}$$

Для расчета тока в начальный момент дугового короткого замыкания использована зависимость (3.23) отношения тока дугового короткого замыкания к току металлического короткого замыкания  $K_d$  от сопротивления петли металлического короткого замыкания.

Соответственно ток дугового короткого замыкания будет

$$I_d = (0,5 + 0,0001 R_{\Sigma}) I_m = (0,5 + 0,0001 \cdot 40,17) \cdot 5,38 = 2,71 \text{ кА.}$$

К моменту отключения короткого замыкания жилы кабеля, при адиабатическом процессе, могут нагреться до температуры (3.21):

$$\begin{aligned} v_{кн} &= (v_n + \beta) \exp\left(\left[\frac{I_d^2 t_k}{K_1 s^2}\right] - \beta\right) = \\ &= (20 + 234,5) \exp\left[\frac{1\,763\,000}{226 \cdot (4 \cdot 95)^2}\right] - 234,5 = 34,2 \text{ } ^\circ\text{C,} \end{aligned}$$

где  $t_k$  — продолжительность короткого замыкания, складывающаяся из времени задержки, равной 0,2 с и полного времени отключения выключателя, равного 0,04 с.

Увеличение температуры жил на 14,2 °С приведет к увеличению сопротивления кабеля  $R_{кбt} = K_{\theta} R_{кб} = [1 + 0,004(34,2 - 20)] \cdot 4,45 = 4,67 \text{ мОм}$ , что составляет менее 5%. Сопротивление кабеля составляет небольшую часть общего сопротивления петли короткого

замыкания, поэтому снижение тока будет незначительным, и нет смысла его уточнять.

Максимальное значение уставки расцепителя, кА, работающего в зоне короткого замыкания равно

$$I_{уст} < \frac{I_d}{K_c} = \frac{2,71}{1,5} = 1,80 \text{ кА,}$$

где  $K_c$  — минимальный коэффициент чувствительности,  $K_c = 1,5$ .

В автоматических выключателях ВА55-41 предусмотрено ступенчатое регулирование номинального тока полупроводникового расцепителя: 0,63; 0,8 и 1,0 относительно номинального тока выключателя и ступенчатое регулирование уставки расцепителя относительно его номинального тока: 2; 4 и 6. Если выбрать номинальный ток расцепителя равным  $0,8 \times 1000 = 800$  А и уставку  $2 \times 800 = 1600$  А, то чувствительность вводного выключателя будет приемлемой. Уставка должна быть проверена по отстройке от тока продолжительного режима и от максимального толчкового тока нагрузки.

### **4.3. Расчет токов КЗ при электроснабжении электроустановок от машин постоянного тока**

#### **4.3.1. Характеристики машин постоянного тока**

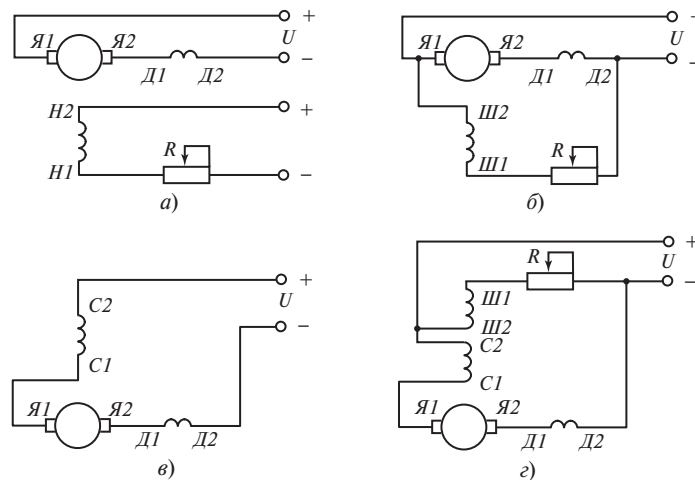
Характеристики машин постоянного тока определяются системой возбуждения [46]: независимой, параллельной, последовательной или смешанной (рис. 4.4).

При *независимой* системе возбуждения обмотка возбуждения питается от постороннего источника постоянного тока и ток возбуждения не зависит от режима работы и нагрузки машины. Генераторы с независимой системой возбуждения допускают регулирование напряжения практически от нуля до номинального. Изменение напряжения при увеличении нагрузки определяется только размагничивающим действием реакции якоря и увеличением падения напряжения на сопротивлении якорной цепи.

Ток *параллельной* обмотки возбуждения генераторов с самовозбуждением меняется в зависимости от напряжения на выводах генератора и уменьшается с ростом нагрузки из-за размагничивающего действия реакции якоря, что, в свою очередь, приводит к добавочному увеличению падения напряжения. За счет этого номинальное падение напряжения генераторов с параллельным возбуждением больше, чем генераторов с независимым возбуждением.

В генераторах со *смешанной* системой возбуждения при согласном включении параллельной и последовательной обмоток поток стабилизируется, так как размагничивающее действие реакции якоря





**Рис. 4.4. Системы возбуждения машин постоянного тока:**

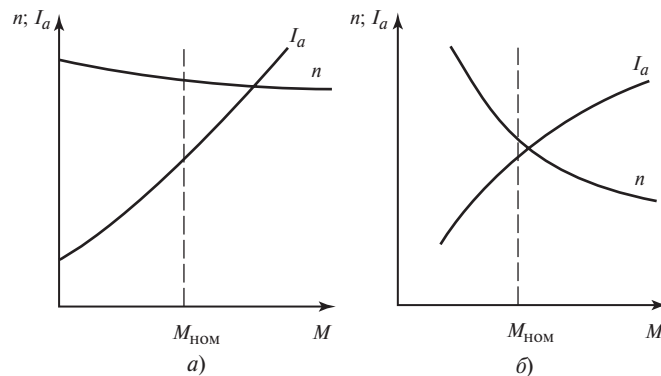
*а* — независимая; *б* — параллельная; *в* — последовательная; *г* — смешанная

компенсируется изменением МДС последовательной обмотки, пропорционально току нагрузки. Последовательную обмотку таких машин называют *стабилизирующей*. Номинальное падение напряжения генераторов со стабилизирующей обмоткой мало. Некоторые генераторы выполнены со стабилизирующей обмоткой, при которой обеспечивается равенство  $U_{\text{ном}} = U_x$ , где  $U_x$  — напряжение холостого хода.

При встречном включении параллельной и последовательной обмоток возбуждения напряжение на выводах генератора резко уменьшается при увеличении тока нагрузки. Такие системы возбуждения применяются в сварочных генераторах постоянного тока.

В двигателях параллельного возбуждения размагничивающее действие реакции якоря может вызвать неустойчивую работу, так как уменьшение потока при увеличении нагрузки из-за действия реакции якоря при малом суммарном сопротивлении якорной цепи приводит к увеличению частоты вращения двигателя. Поэтому в большинстве двигателей средней и во всех двигателях большой мощности, помимо параллельной, устанавливается последовательная обмотка возбуждения, стабилизирующая магнитный поток и придающая устойчивость механической характеристике (рис. 4.5, *а*).

Механические характеристики двигателей с последовательным возбуждением (рис. 4.5, *б*) имеют специфический «падающий» характер. Двигатели с последовательным возбуждением используются



**Рис. 4.5. Механические характеристики двигателей постоянного тока:**

*a* — смешанного возбуждения; *б* — последовательного возбуждения

в приводах, требующих больших пусковых моментов и устойчивой работы при малых частотах вращения.

#### 4.3.2. Методика расчета токов КЗ машин постоянного тока

Определение методики расчета короткого замыкания машин постоянного тока базируется на результатах анализа теоретических и экспериментальных исследований [46—55].

Наиболее опасным видом повреждения машины постоянного тока является короткое замыкание ее якорной цепи, так как оно вызывает сильное искрение, а иногда и круговой огонь на коллекторе. Особенно опасны эти явления для машины постоянного тока, работавшей до КЗ в режиме генератора. Поэтому важно обеспечить быстрое отключение поврежденного участка цепи и гашение поля машины. Для правильной настройки защиты необходимо знать расчетные токи аварийных режимов и характер их изменения.

Процессы, протекающие при внезапном коротком замыкании генератора постоянного тока, отличаются значительно большей сложностью по сравнению с аналогичными процессами в машинах переменного тока. В этом случае необходимо учитывать условия коммутации, нелинейность кривых намагничивания, вихревые токи, падение напряжения между щетками и коллектором, сложный характер магнитных связей между обмотками и т.д.

Точный расчет процесса КЗ возможен с помощью системы нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, решение которых осуществляется на ЭВМ методом числен-

ного интегрирования. Однако с практической точностью расчет КЗ генератора постоянного тока можно произвести упрощенно, приняв экспоненциальный закон изменения токов якоря  $i_a$  и обмотки возбуждения  $i_f$ , что является справедливым при отсутствии насыщения машины и пропорциональности реакции якоря току главной цепи.

На ранних этапах исследований переходных процессов в машинах постоянного тока [47] при расчете внезапного короткого замыкания шунтового генератора допускалось следующее:

- компенсационная обмотка отсутствует;
- предшествующим режимом является холостой ход при  $U_{ном}$ ;
- учитывается насыщение только зубцовой зоны якоря и поверхностного слоя полюсов;
- поток рассеяния главных полюсов принимается пропорциональным току возбуждения;
- щетки машины расположены на геометрической нейтрали;
- частота вращения ротора (якоря) — неизменная.

В этом случае решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы при КЗ генератора постоянного тока, относительно тока якоря имеет вид [47]:

$$i_{at} = i_{a\infty} - i'_a e^{-t/T_a} + (i'_a - i_{a\infty}) e^{-t/T_f},$$

где  $i'_a$  — максимальный ток якоря;  $i_{a\infty}$  — установившийся ток якоря;  $T_a$  — постоянная времени цепи якоря;  $T_f$  — постоянная времени цепи возбуждения;  $t$  — текущее время.

При неучете насыщения магнитной системы машины:

постоянную времени цепи возбуждения, с, можно определить по формуле

$$T_f = \frac{L_f}{R_f} = \frac{2pw_f\Phi_0(1 + \sigma_f)K_i}{U_{f0}},$$

где  $L_f$  — индуктивность обмотки возбуждения;  $R_f$  — активное сопротивление обмотки возбуждения;  $p$  — число пар главных полюсов машины;  $w_f$  — полное число витков обмотки возбуждения;  $\Phi_0$  — полезный поток при номинальном напряжении холостого хода;  $\sigma_f$  — отношение фиктивного потока рассеяния к полезному потоку при холостом ходе машины;  $K_i$  — отношение полной МДС возбуждения к МДС воздушного зазора при холостом ходе машины;  $U_{f0}$  — напряжение возбуждения при холостом ходе,

постоянную времени цепи якоря, с, можно определить по формуле

$$T_a = L_a / R_a,$$

где  $L_a$  — полный коэффициент самоиндукции цепи якоря;  $R_a$  — полное сопротивление цепи якоря, равное сумме сопротивлений обмоток цепи якоря  $R$  и эквивалентного переходного сопротивления  $R'_3$  ( $R_a = R + R'_3$ ).

Эквивалентное переходное сопротивление можно определить по следующей эмпирической формуле:

$$R'_3 = \frac{e_r K_\beta}{I_{\text{ном}}},$$

где  $e_r$  — реактивная ЭДС при номинальном режиме работы машины;  $K_\beta$  — коэффициент перекрытия щеткой коллекторных пластин;  $I_{\text{ном}}$  — номинальный ток якоря машины.

При коротком замыкании реактивная ЭДС возрастает, благодаря чему ток якоря существенно ограничивается.

Полный коэффициент самоиндукции  $L_a$  в процессе короткого замыкания изменяется. Приближенное значение коэффициента можно определить [47] по следующему выражению:

$$L_a = A \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} \frac{1}{2\pi \frac{pn_{\text{ном}}}{60}},$$

где  $A = 0,6$  — коэффициент, равный для некомпенсированных машин,  $A = 0,15$  для компенсированных машин;  $U_{\text{ном}}$  — номинальное напряжение якоря машины;  $n_{\text{ном}}$  — номинальная частота вращения ротора (якоря), об/мин.

Для определения параметров  $i'_a$  и  $i_{a\infty}$  необходимо решить систему трансцендентных уравнений, составленных на основе баланса намагничивающих сил и потоков. В результате получаются сложные расчетные выражения [47], которые требуют графоаналитической обработки характеристики намагничивания. Причем исходные данные расчетных выражений имеют слабую связь с паспортными данными машины постоянного тока.

Попытка усовершенствовать методику расчета предприняли авторы [48]. Целью работы была разработка и экспериментальная проверка на основе единой теории общей методики расчета переходных процессов в машинах постоянного тока с учетом следующих основных факторов:

- нелинейности кривых намагничивания магнитных систем главных и добавочных полюсов машины;
- изменения магнитного рассеяния главных полюсов;

- индуктивности цепи якоря;
- взаимной индуктивности между цепями якоря и возбуждения;
- реакции якоря;
- изменения переходного падения напряжения в контакте щеток и коллектора;
  - вихревых токов массивных частей магнитных систем главных и добавочных полюсов;
  - изменения скорости вращения ротора;
  - вращающихся маховых масс агрегата.

Для учета перечисленных факторов производится количественный анализ переходных процессов в машинах постоянного тока, выводятся определенные аналитические зависимости и дается оценка влияния разных факторов на переходные процессы.

В частности, при расчетах коротких замыканий предлагается не учитывать нелинейность кривой намагничивания, принять линейную зависимость  $A_w$  реакции якоря, пренебречь вихревыми токами и принять постоянство частоты вращения ротора.

В дальнейшем, при проведении экспериментальных исследований, выяснилось, что расчетные значения наибольших токов короткого замыкания, определенные по формулам, приведенным в [47, 48], получаются завышенными. Объясняется это тем, что падение напряжения под щеткой и увеличение реакции якоря от токов в короткозамкнутых секциях происходит не пропорционально току якоря.

Результаты экспериментальных исследований коротких замыканий машин постоянного тока обобщены, например в [49]. Для машин разной мощности и систем возбуждения была разработана единая расчетная методика. Основные положения этой методики приводятся в п. 4.3.3.

В работах [49, 50] рекомендуется использовать в инженерной практике упрощенные расчетные формулы, которые позволяют определить приближенное значение пика тока КЗ по (4.14) и (4.15).

Для решения практических задач можно руководствоваться ориентировочными кратностями максимальных (пиковых) значений токов КЗ по отношению к номинальным токам машин, приведенными в табл. 4.1 по опытным заводским данным.

В дальнейшем методы расчета коротких замыканий машин постоянного тока совершенствовались благодаря уточнению исходных данных и параметров схем замещения и влияния отдельных факторов на точность расчетов переходных процессов [51—55].

В [51] приводятся и анализируются точные и эмпирические формулы для индуктивностей якорной цепи. Результирующая индуктивность обмоток цепи якоря  $L_{я}$  полностью компенсированной машины постоянного тока равна сумме индуктивностей последовательно

Таблица 4.1

Ориентировочные кратности максимальных (пиковых) значений токов КЗ для машин постоянного тока напряжением 110—750 В в зависимости от произведения мощности машин на частоту вращения якоря

Расчетный параметр $P_{\text{ном}} n_{\text{ном}}$ , кВт · (об/мин)	Кратности максимальных (пиковых) токов КЗ для машин напряжением, В		
	110	230	600—750
Компенсированные машины			
100 000	—	12—8	—
250 000	—	13—9	15—12
300 000	—	15—10	15—12
1 200 000	—	—	16—15
Некомпенсированные машины			
5000	5—4	6,5—4	—
10 000	6,5—5,5	6,5—4	—
100 000	7,5—6,5	7—6	—
150 000	7,5—6,5	7—6	—
800 000	—	14—8	—

соединенных обмоток: якоря  $L_a$ , компенсационной  $L_k$  и добавочных полюсов  $L_d$ .

При КЗ увеличивается ток якоря машины и в массивных деталях возникают значительные вихревые токи. При этом индуктивность якорной цепи незначительно уменьшается, так как поток рассеяния компенсационной обмотки и обмотки якоря не связан с массивными деталями, и лишь поток добавочных полюсов находится во взаимодействии с токами, наведенными им в станине. Поэтому при расчетах переходных процессов пренебрегают уменьшением индуктивности якорной цепи из-за демпфирования. Насыщение магнитопровода также не сказывается на значении индуктивности якорной цепи.

В [51] точные формулы для определения  $L_a$ ,  $L_k$ ,  $L_d$  приведены в строгом соответствии с теорией и практикой электромашиностроения. Эмпирические формулы преобразованы в упрощенные по отношению к точным.

Методика расчета коротких замыканий в машинах постоянного тока [49], усовершенствованная в части определения расчетных параметров крупных машин, апробированная при проектировании и экспериментальных исследованиях, была взята за основу при разработке государственного стандарта [21].

#### 4.3.3. Расчет токов КЗ машин постоянного тока

Исходные данные для расчета, их условные обозначения, базисные условия и расчетные методики приняты в соответствии с ГОСТ 29176-91.

Исходные данные номинального режима машины:

$P_{\text{ном}}$  — активная мощность (мощность на валу), кВт;

$U_{\text{ном}}$  — напряжение якоря, В;

$I_{\text{ном}}$  — ток якоря, А;

$I_{f\text{ном}}$  — ток обмотки возбуждения, А;

$n_{\text{ном}}$  — частота вращения якоря, об/мин;

Начальные значения параметров режима:

$E_0$  — ЭДС машины при холостом ходе, В;

$I_{f0}$  — ток обмотки возбуждения при холостом ходе, А;

$n_0$  — частота вращения якоря в момент КЗ, об/мин.

Дополнительные параметры режима:

$A \cdot S$  — линейная нагрузка якоря при номинальном режиме работы машины, А/см;

$Aw_{rq}$  — ампер-витки поперечной реакции якоря при номинальном режиме работы машины;

$Aw_{\text{п}}$  — ампер-витки последовательной обмотки при номинальном режиме работы машины;

$Aw_{fx}$  — ампер-витки возбуждения при холостом ходе машины.

Другие параметры, используемые при расчетах токов КЗ:

$N_a$  — число проводников обмотки якоря;

$w_f$  — число витков обмотки возбуждения;

$w_{\text{п}}$  — число витков последовательной обмотки;

$a$  — число пар параллельных ветвей якорной обмотки;

$a_f$  — число параллельных ветвей обмотки возбуждения;

$a_{\text{п}}$  — число параллельных ветвей последовательной обмотки;

$\sigma$  — коэффициент магнитного рассеяния главных полюсов;

$p$  — число пар полюсов машины;

$b_k$  — коэффициент (ширина) коммутационной зоны;

$e_R$  — реактивная ЭДС короткозамкнутой секции обмотки якоря, В;

$\beta_k$  — число перекрытых щеткой коллекторных пластин;

$\Delta U_{\text{щ}}$  — переходное падение напряжения щеточного контакта, В;

$R_w$  — активное сопротивление обмотки добавочных полюсов и компенсационной обмотки, Ом;

$R_{\text{п}}$  — активное сопротивление последовательной обмотки, Ом;

$R_{щ}$  — переходное сопротивление щеточного контакта, Ом;  
 $R_{внш}$  — активное сопротивление внешней сети (цепи КЗ), Ом,  
 которое определяется по § 4.2.

Базисные условия для определения величин в относительных единицах следующие:

$$U_{\bar{c}} = U_{ном}; \quad I_{\bar{c}} = I_{ном}; \quad R_{\bar{c}} = U_{\bar{c}}/I_{\bar{c}}.$$

При составлении схемы замещения сети, питаемой от машины постоянного тока, учитывают индуктивные сопротивления обмоток машины и активные сопротивления элементов цепей машины и внешней сети.

Схема замещения для расчета токов при КЗ полюсов сети постоянного тока приведена на рис. 4.6.

В общем случае машины постоянного тока имеют две обмотки возбуждения (самовозбуждения и независимого возбуждения). При математическом описании переходных процессов эти обмотки допустимо заменять одной эквивалентной обмоткой возбуждения.

**Расчет токов КЗ в сети, питаемой от машины постоянного тока.** Токи КЗ в цепи якоря ( $i_{dt}$ ) и в цепи обмотки возбуждения ( $i_{ft}$ ) машины постоянного тока в произвольный момент времени определяют по формулам:

$$i_{dt} = i_{d\infty} - i'_{d0} e^{-t/T'_d} + (i'_{d0} - i_{d\infty}) e^{-t/T'_f}; \quad (4.7)$$

$$i_{ft} = i_{f\infty} + (i_{f0} - i'_{f0}) e^{-t/T'_d} + (i'_{f0} - i_{f\infty}) e^{-t/T'_f}, \quad (4.8)$$

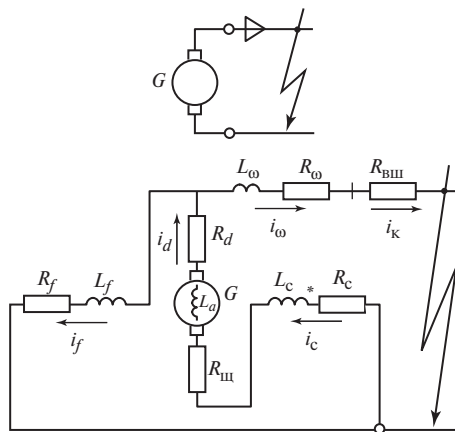


Рис. 4.6. Электрическая схема и схема замещения сети, питаемой от машины постоянного тока

где  $i_{d\infty}$  — установившийся ток КЗ в цепи якоря;  $i_{f\infty}$  — установившийся ток КЗ в цепи обмотки возбуждения;  $i'_{d0}$  — переходный ток КЗ в цепи якоря в начальный момент;  $i'_{f0}$  — переходный ток КЗ в цепи обмотки возбуждения в начальный момент;  $T'_d$  — переходная постоянная времени цепи якоря, с;  $T'_f$  — переходная постоянная времени, цепи обмотки возбуждения, с;  $t$  — время от начала КЗ, с.



Составляющие токов якоря и обмотки возбуждения при КЗ в сети, питаемой от машины постоянного тока, показаны на рис. 4.7.

В наиболее общем случае возбуждение машины постоянного тока осуществляется двумя обмотками (самовозбуждения и независимого возбуждения). При математическом описании переходных процессов эти обмотки согласно [49] можно заменить одной эквивалентной обмоткой возбуждения.

Начальный переходный ток цепи якоря ( $i'_{d0}$ ), А, при КЗ в этой цепи определяют по формуле

$$i'_{d0} = e_0 / R'_{d0}, \quad (4.9)$$

где  $e_0$  — начальная ЭДС, равная ЭДС холостого хода машины, В;  $R'_{d0}$  — начальное переходное сопротивление цепи якоря, Ом.

$$R'_{d0} = R_{\text{я}} + \beta \frac{\sigma - 1}{\sigma} R_{\sigma};$$

$\beta$  — коэффициент, учитывающий реакцию якоря при запаздывающей коммутации, определяемый как

$$\beta = (Aw_{\text{як}} + b_{\text{к}}AS) / Aw_{\text{як}};$$

$\sigma$  — коэффициент, учитывающий магнитное рассеяние главных полюсов, значение которого находится в пределах  $1,15 \leq \sigma \leq 1,18$ .

Суммарное активное сопротивление цепи якоря ( $R_{\text{я}}$ ) в омах с учетом активного сопротивления внешней сети до точки КЗ определяют, используя выражение

$$R_{\text{я}} = R_{\text{а1}} + (\Delta U_{\text{щ}} + e_R \beta_{\text{к}}) / I_{\text{ном}} + R_{\text{вщ}},$$

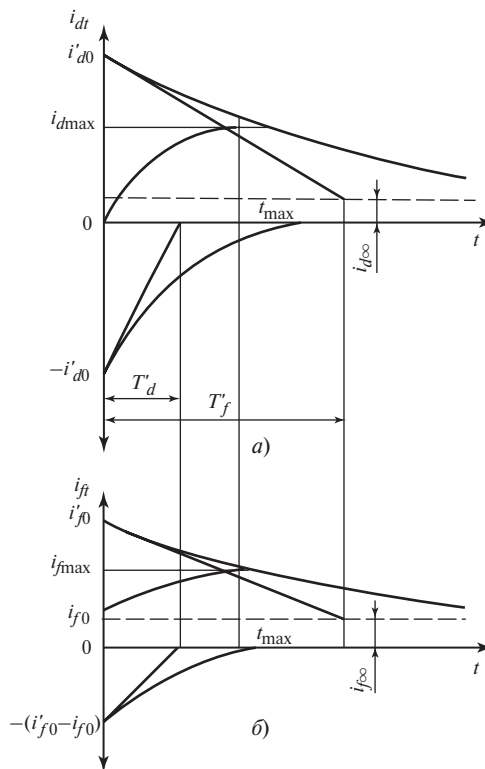


Рис. 4.7. Расчетные составляющие токов якоря и обмотки возбуждения при КЗ машины постоянного тока

причем суммарное активное сопротивление обмоток якорной цепи машины ( $R_{a1}$ ), Ом, рекомендуется принимать равным

$$R_{a1} = 1,24(R_a + R_w + R_{\Pi}).$$

Установившийся ток цепи якоря ( $i_{d\infty}$ ), А, при КЗ в этой цепи и независимом возбуждении машины определяют по формуле

$$i_{d\infty} = e_{\infty}/R_d, \quad (4.10)$$

где  $e_{\infty}$  — ЭДС якоря в установившемся режиме КЗ, равная ЭДС холостого хода машины, В;  $R_d$  — сопротивление цепи якоря в установившемся режиме КЗ, Ом, равно  $R_d = R_{\text{я}} + (\beta - \gamma)R_{\text{б}}$ , где  $\gamma$  — коэффициент компаундирования машины, который для машин постоянного тока нормального исполнения при учете реакции коммутационных токов меньше  $\beta$  и определяется по формуле

$$\gamma = Aw_{\Pi}/Aw_{\text{фк}}.$$

Установившийся ток цепи якоря ( $i_{d\infty}$ ), А, при КЗ в этой цепи и самовозбуждении машины определяют по формуле

$$i_{d\infty} = Ke_0/(R_{a2} + R_{\text{вш}}), \quad (4.11)$$

где  $K = 0,05—0,15$ .

Суммарное активное сопротивление обмоток якорной цепи и щеток (без учета изменения падения напряжения под щетками при КЗ) ( $R_{a2}$ ), Ом, определяют по выражению

$$R_{a2} = 1,24(R_a + R_w + R_{\Pi}) + R_{\text{щ}}.$$

*Расчет постоянных времени.* Постоянная времени цепи якоря ( $T_d$ ), с, при неучете взаимоиндукции с обмоткой возбуждения определяется по формуле

$$T_d = T_{\text{я}} = L_{\text{я}}/R_{\text{я}},$$

где  $L_{\text{я}}$  — суммарная индуктивность обмоток цепи якоря, Гн, которая равна  $L_{\text{я}} = L_a + L_{\Pi} + L_w$ ,  $L_a$  — индуктивность якорной обмотки, Гн;  $L_{\Pi}$  — индуктивность последовательной обмотки, Гн;  $L_w$  — индуктивность компенсационной обмотки и обмотки добавочных полюсов, Гн.

Постоянную времени обмотки возбуждения ( $T_f$ ), с, при неучете взаимоиндукции с якорной и последовательной обмотками определяют по формуле

$$T_f = L_f/R_f,$$

где  $L_f$  — индуктивность обмотки возбуждения, Гн;  $R_f$  — активное сопротивление обмотки возбуждения, Ом, равное  $R_f = E_0 / I_{f0}$ .

Переходная постоянная времени обмотки возбуждения ( $T'_f$ ), с, определяется по формуле

$$T'_f = T_f(R'_{d0} / R_d).$$

Переходная постоянная времени цепи якоря ( $T'_{d0}$ ), с, в предположении, что обмотка возбуждения является сверхпроводящей, равна

$$T'_{d0} = T_d(R'_я / R'_{d0}).$$

Переходная постоянная времени цепи якоря ( $T'_d$ ), с, с учетом активного сопротивления обмотки возбуждения определяется по формуле

$$T'_d = T'_{d0} \frac{T'_f}{T'_f - T'_{d0}}.$$

Начальный переходный ток в цепи обмотки возбуждения ( $i'_{f0}$ ), А, при КЗ во внешней сети равен

$$i'_{f0} = i_{f0}(R_d / R'_d), \quad (4.12)$$

где  $R'_d = R'_{d0}(1 - 2T'_{d0} / T'_f)$ .

Если машина постоянного тока имеет независимое возбуждение, то при коротком замыкании во внешней сети принимают  $i_{f\infty} = i_{f0}$ , если же машина имеет самовозбуждение, то  $i_{f\infty}$  близок к нулю.

Время от момента возникновения КЗ до момента, когда ток в цепи якоря оказывается максимальным, ( $t_{\max}$ ), с, определяют по выражению

$$t_{\max} = 2,3 T'_{d0} \left( \frac{T'_f}{T'_d} \right) \lg \frac{i'_d}{i'_d - i_{d\infty}},$$

где  $i'_d = e_0 / R'_d$ .

Ток машины, замыкающийся через внешнюю короткозамкнутую сеть (см. схему замещения на рис. 4.6), определяют как

$$i_{kt} = i_{dt} - i_{ft}. \quad (4.13)$$

В области максимальных токов допустимо считать

$$i_{k \max} = i_{d \max}.$$

Упрощенные расчеты токов КЗ. При неполных исходных данных максимальное значение тока КЗ ( $i_{\text{max}}$ ) в относительных единицах допустимо определять по одной из формул:

$$i_{* \text{к max}} = \frac{e_0}{R_{* \text{я}} + (\sigma - 1) / \sigma}; \quad (4.14)$$

$$i_{* \text{к max}} = \frac{e_0}{R_{* \text{вщ}} + \frac{\Delta P_{\text{я}}}{P_{\text{ном}}} + \frac{2 + (0,3 P_{\text{ном}} / D_{\text{я}})}{U_{\text{ном}}} + M}, \quad (4.15)$$

где  $\Delta P_{\text{я}}$  — потери активной мощности в цепи якоря машины, кВт;  $D_{\text{я}}$  — диаметр якоря, см;  $M$  — коэффициент, учитывающий влияние реакции якоря и потоков рассеяния для некомпенсированных машин принимают  $M = 0,05$  и для компенсированных машин  $M = 0,025$ ;

$$R_{* \text{я}} = R_{\text{я}}(I_{\text{ном}} / U_{\text{ном}}); \quad R_{* \text{вщ}} = R_{\text{вщ}}(I_{\text{ном}} / U_{\text{ном}}).$$

При отсутствии полной информации об исходных параметрах, максимальное значение тока КЗ от машины постоянного тока можно оценить, исходя из опытных данных, приведенных в табл. 4.1.

Учет электрической дуги и увеличения активного сопротивления кабеля. При определении минимального значения тока КЗ от машины постоянного тока учитывают влияние электрической дуги и увеличение активного сопротивления кабеля.

Методика учета дуги аналогична изложенной в § 4.2.

Значения коэффициента  $K_{\text{д}}$  для электроустановок с машинами мощностью до 100—150 кВт допустимо определять по кривой 2 на рис. 4.3, а для электроустановок с генераторами большой мощности (ток КЗ до 140 кА) — по кривым рис. 4.8.

При учете увеличения активного сопротивления кабеля вследствие его нагрева токами КЗ, используют методику учета аналогичную изложенной в § 3.2.

**Определение параметров схем замещения машин постоянного тока.** Индуктивности обмоток машины постоянного тока и активное сопротивление

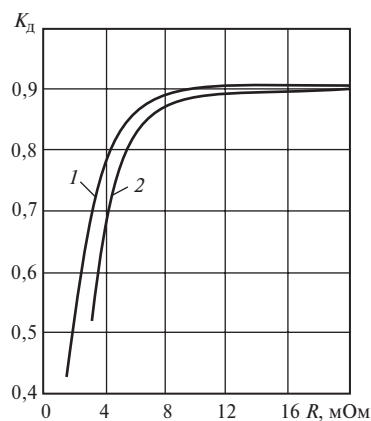


Рис. 4.8. Зависимость коэффициента  $K_{\text{д}}$  для генераторов постоянного тока напряжением 220 В (1) и 440 В (2) от сопротивления цепи КЗ

тивление обмотки якоря рекомендуется рассчитывать по формулам, приведенным в Приложении 1.

#### 4.3.4. Расчет короткого замыкания машины постоянного тока

Машина ПН-45 работает в режиме холостого хода генератора при самовозбуждении. Серийная обмотка включена согласно с шунтовой обмоткой.

Номинальные данные:  $P_{\text{ном}} = 5,4$  кВт;  $U_{\text{ном}} = 230$  В;  $I_{\text{ном}} = 23,47$  А;  $I_{f\text{ном}} = 0,7$  А;  $n_{\text{ном}} = 2100$  об/мин,  $2p = 4$ .

Исходные данные:

$N_a = 812$ ;  $E_0 = 230$  В;  $I_{f0} = 0,71$  А;  $n = 1500$  об/мин;  $w_f = 2300$ ;  $w_c = 9$ ;  $a = 1$ ;  $a_f = 1$ ;  $a_c = 1$ ;  $\sigma = 1,15$ ;  $A \cdot S = 190$  А/см;  $A \cdot W_{rq} = 425$ ;  $b_k = 3,16$  см;  $e_r = 1,84$  В;  $\Delta U_{\text{щ}} = 2,0$  В;  $\beta_k = 2,21$ ;  $R_{a1} = 1,24(R_a + R_w + R_c) = 0,799$  Ом,  $R_{a2} = 1,24(R_a + R_w + R_c) + R_{\text{щ}} = 0,885$  Ом.

Базисные условия для определения величин в относительных единицах:

$U_{\text{б}} = U_{\text{ном}} = 230$  В;  $I_{\text{б}} = I_{\text{ном}} = 23,5$  А;  $R_{\text{б}} = U_{\text{б}}/I_{\text{б}} = 9,787$  Ом;  $R_{*a1} = R_{a1}/R_{\text{б}} = 0,0815$ ;  $R_{*a2} = R_{a2}/R_{\text{б}} = 0,0905$ ;  $R_{*я} = R_{*a1} + \frac{\Delta U_{\text{щ}} + e_r \beta_k}{U_{\text{б}}} = 0,108$ ;  $E_0 = E_0/U_{\text{б}} = 1,0$ ;  $I_{f0} = I_{f0}/I_{\text{б}} = 0,71/23,5 = 0,03$ .

Расчет постоянных времени:

$R_f = E_0/I_{f0} = 230/0,71 = 325$  Ом;  $L_f = \frac{120w_f a \sigma E_0}{a_f N_a n I_{f0}} = 84,5$  Гн;  $T_f = L_f/R_f = 84,5/325 = 0,26$  с;  $L_a = \frac{5}{2pn} \frac{U_{\text{ном}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{5 \cdot 230}{4 \cdot 1500 \cdot 23,5} = 8,18$  мГн;  $L_c = L_f \left( \frac{w_c}{w_f} \frac{a_f}{a_c} \right)^2 = 84,5 \left( \frac{9}{2300} \cdot \frac{1}{1} \right)^2 = 1,29$  мГн;  $L_{я} = 8,18 + 1,29 = 9,47$  мГн;  $T_d = T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}} = \frac{9,47 \cdot 10^{-3}}{0,108 \cdot 9,787} = 0,009$  с.

Коэффициент, учитывающий реакцию якоря при запаздывающей коммутации:

$$\beta = \frac{A w_{rq} + b_k A S}{A w_{fx}} = \frac{425 + 3,16 \cdot 190}{2 \cdot 2300 \cdot 0,71} = 0,314.$$

Коэффициент компаундирования машины:

$$\gamma = \frac{w_c}{w_{fx}} \frac{1}{I_{*f0}} = \frac{9}{2300} \frac{1}{0,03} = 0,129.$$

Полное сопротивление цепи якоря в установившемся КЗ:

$$R_{*d} = R_{*я} + (\beta - \gamma) = 0,108 + (0,314 - 0,219) = 0,293.$$

Переходное сопротивление цепи якоря при КЗ с учетом шунтовой обмотки возбуждения:

$$R'_{*d0} = R_{*я} + \beta \frac{\sigma - 1}{\sigma} = 0,108 + 0,314 \frac{0,15}{1,15} = 0,149.$$

Переходные постоянные времени:

$$T'_{d0} = T_d \frac{R_{*я}}{R'_{*d0}} = 0,009 \cdot \frac{0,108}{0,149} = 0,00652 \text{ с};$$

$$T'_f = T_f \frac{R'_{*d0}}{R_{*d}} = 0,260 \cdot \frac{0,149}{0,293} = 0,132 \text{ с};$$

$$T'_d = T'_{d0} \frac{T'_f}{T'_f - T'_{d0}} = 0,00652 \cdot \frac{0,132}{0,132 - 0,00652} = 0,0069 \text{ с}.$$

Переходное сопротивление цепи якоря при коротком замыкании с учетом активного сопротивления шунтовой обмотки:

$$R'_{*d} = R'_{*d0} \left( 1 - 2 \frac{T'_{d0}}{T'_f} \right) = 0,149 \cdot 0,91 = 0,135.$$

Расчет токов короткого замыкания. Переходный ток в цепи якоря:

$$i'_{*d0} = \frac{e_{*0}}{R'_{*d0}} = \frac{1}{0,149} = 6,7; \quad i'_{*d} = \frac{e_{*0}}{R'_{*d}} = \frac{1}{0,135} = 7,44.$$

Переходный ток в цепи обмотки возбуждения:

$$i'_{*f0} = i_{*f0} \frac{R_{*d}}{R'_{*d}} = 0,03 \cdot \frac{0,293}{0,135} = 0,065.$$

Установившийся ток в цепи якоря:

$$i_{*d\infty} = \frac{1}{6} \frac{1}{R_{*a2}} = \frac{1 \cdot 1}{6 \cdot 0,0905} = 1,84.$$

Установившийся ток в цепи обмотки возбуждения:

$$i_{*d\infty} = 0.$$

Функции токов, изменяющихся во времени:

$$i_{*dt} = 1,84 + (6,7 - 1,84)e^{-t/0,132} - 6,7e^{-t/0,0069};$$

$$i_{*ft} = 0 + (0,065 - 0)e^{-t/0,132} - (0,065 - 0,030)e^{-t/0,0069};$$

$$i_{*kt} \approx i_{*dt}.$$

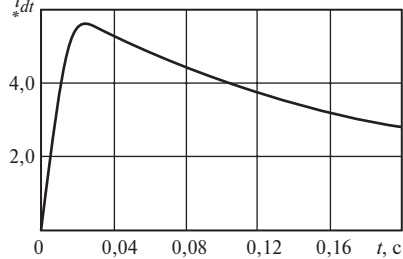


Рис. 4.9. Изменение тока якоря при коротком замыкании машины постоянного тока

Момент времени, которому соответствуют максимальные (пиковые) токи, определяется:

$$t_{\max} = 2,3T'_{d0} \lg\left(\frac{i'_{*d}}{i'_{*d} - i_{*d\infty}}\right) \frac{T'_f}{T'_d} =$$

$$= 2,3 \cdot 0,00652 \cdot \lg\left(\frac{6,7}{6,7 - 1,84}\right) \frac{0,132}{0,0069} = 0,0213 \text{ с.}$$

Максимальные (пиковые) токи в относительных единицах:

$$\text{в цепи якоря } i'_{*d\max} = 5,67;$$

$$\text{в цепи короткого замыкания } i_{*k\max} = i_{*d\max} = 5,67.$$

Максимальные (пиковые) токи в именованной системе единиц:

$$i_{k\max} = i_{*k\max} I_{\sigma} = 5,67 \cdot 23,5 = 133 \text{ А};$$

$$i_{f\max} = i_{*f\max} I_{\sigma} = 0,05 \cdot 23,5 = 1,17 \text{ А.}$$

Изменение тока короткого замыкания во времени показано на рис. 4.9. Ток якоря при КЗ машины в течение 0,02 с достигает пикового значения (5,65 отн. ед.) и затем медленно затухает.

#### 4.4. Расчет токов КЗ при электроснабжении электроустановок от трехфазных вентильных преобразователей

##### 4.4.1. Особенности расчета коротких замыканий в электроустановках с вентильными преобразователями

Методам расчета токов КЗ и переходных процессов в электроустановках, содержащих статические преобразователи тока и напряжения, посвящено значительное число работ.

Все методики имеют общую теоретическую основу, однако они разрознены или предназначены для теоретических расчетов аварийных режимов вентилей преобразовательных установок. Наибольшее признание в инженерной практике получили [50, 56—59].

Расчетные методики распространяются на трехфазные управляемые и неуправляемые выпрямители, выполненные по симметричной мостовой схеме, а также по схеме две обратные звезды с уравнительным реактором. Расчету подлежат короткие замыкания относительно небольшой электрической удаленности. Оценка расчетных токов КЗ необходима для выбора вентилей и их проверки на термическую стойкость. Промышленный выпрямитель состоит из преобразовательного трансформатора  $T$  и вентильного устройства  $UZ$  (рис. 4.10). Преобразовательный трансформатор подключается к шинам переменного тока, а вентильное устройство — к шинам постоянного тока (через реактор  $LR$ , если таковой имеется в электроустановке).

В мощных электроустановках (электролизных, плавильных, тяговых и др.) к шинам переменного тока и шинам постоянного тока может быть подключено несколько параллельно работающих агрегатов. Количество таких агрегатов учитывается при расчетах КЗ на общих шинах или в распределительной сети постоянного тока. Эти расчеты выполняются для выбора проводников, коммутационных аппаратов и защит.

Короткие замыкания в цепи постоянного тока могут быть двух видов: КЗ полюсов и КЗ полюса на землю в сети с заземленным полюсом или заземленным нулевым проводом вентильного преобразователя.

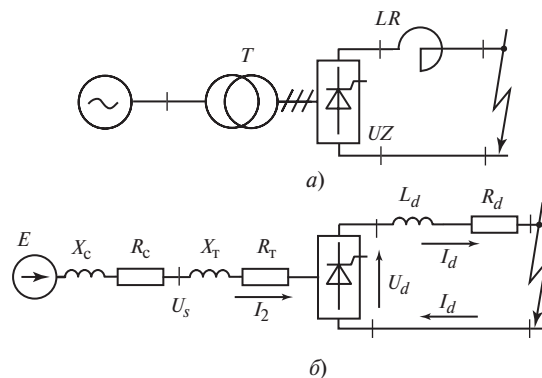


Рис. 4.10. Расчетная электрическая схема (а) и схема замещения (б) электроустановки с выпрямительным агрегатом



Методики расчета таких видов КЗ различаются лишь в определении расчетных параметров схем замещения.

Короткое замыкание, возникающее на участке цепи между вентильным устройством и отключающим аппаратом, считается внутренним, КЗ, возникающее за отключающим аппаратом — внешним.

Внутреннее КЗ выпрямителя опасно для вентилях неуправляемого (диодного) выпрямителя. Короткое замыкание неуправляемого выпрямителя является трехфазным КЗ преобразовательного трансформатора, которое может быть отключено только выключателем переменного тока. Время отключения выключателя переменного тока составляет 100—200 мс. Такая длительность КЗ преобразователя может оказаться недопустимой для вентилях, так как вентили могут оказаться в режиме теплового пробоя.

Внутреннее КЗ также опасно для управляемого (тиристорного) выпрямителя, но его вентили оказываются в более легком режиме, чем вентили неуправляемого выпрямителя. Тиристорный выпрямитель, как правило, имеет электронную защиту, которая практически мгновенно, вслед за возникновением КЗ, снимает импульсы зажигания со всех вентилях. Вентили, не обтекаемые током КЗ, запираются и их коммутация прекращается. Вентили, проводящие ток КЗ, горят только в течение проводящего полупериода и в дальнейшем их горение не возобновляется. Таким образом, короткое замыкание управляемого выпрямителя является двухфазным КЗ преобразовательного трансформатора, продолжительность которого нормально составляет 10—12 мс.

Основное назначение реактора  $LR$ , включаемого в цепь полюса (или цепь нулевого провода) является сглаживанием пульсаций выпрямленного тока при нормальной работе и ограничение тока при возникновении короткого замыкания. Реактор располагают вблизи вентильного устройства с тем, чтобы уменьшить вероятность возникновения КЗ между вентильным устройством и реактором. Необходимость установки реактора диктуется требованиями, предъявляемыми к качеству электроэнергии на постоянном токе. Индуктивность реакторов мощных промышленных установок обычно не превышает 50 мГн [50].

При выборе вентилях и проверке их на термическую стойкость используются следующие паспортные характеристики полупроводниковых приборов:

$I_{уд}$  — ударный неповторяющийся ток прибора, А, — амплитуда синусоидального тока длительностью 10 мс при максимально допустимой температуре перехода (без приложения обратного напряжения);

$\int i^2 dt$  — защитный показатель,  $A^2 \cdot c$ , — максимально допустимое значение интеграла Джоуля в интервале времени 10 мс;

$R_d$  — дифференциальное сопротивление прибора, Ом.

**Расчет токов при коротком замыкании полюсов неуправляемого выпрямителя при отсутствии сглаживающего реактора.**

Поскольку короткое замыкание полюсов неуправляемого выпрямителя эквивалентно трехфазному короткому замыканию преобразовательного трансформатора, то расчет последнего производится обычным порядком, принятым для трехфазных цепей переменного тока. Параметры схемы замещения (рис. 4.11) следует привести к ступени напряжения вторичной (вентильной) обмотки в именованной системе единиц. Следует принять:  $L_d = 0$ ,  $R_d = 0$ . С учетом специфики вентильных схем расчету подлежит:

— амплитуда периодической составляющей тока фазы преобразовательного трансформатора, А, (одной обмотки)  $I_m$ ;

— максимальная амплитуда тока короткого замыкания ( $I_{max}$ ), А;

— ударный ток, протекающий в полупроводниковом приборе ( $I_{уд}$ ), А;

— тепловое действие тока КЗ на полупроводниковый прибор ( $I_{эф}^2 t_k$ ),  $A^2 \cdot c$ ;

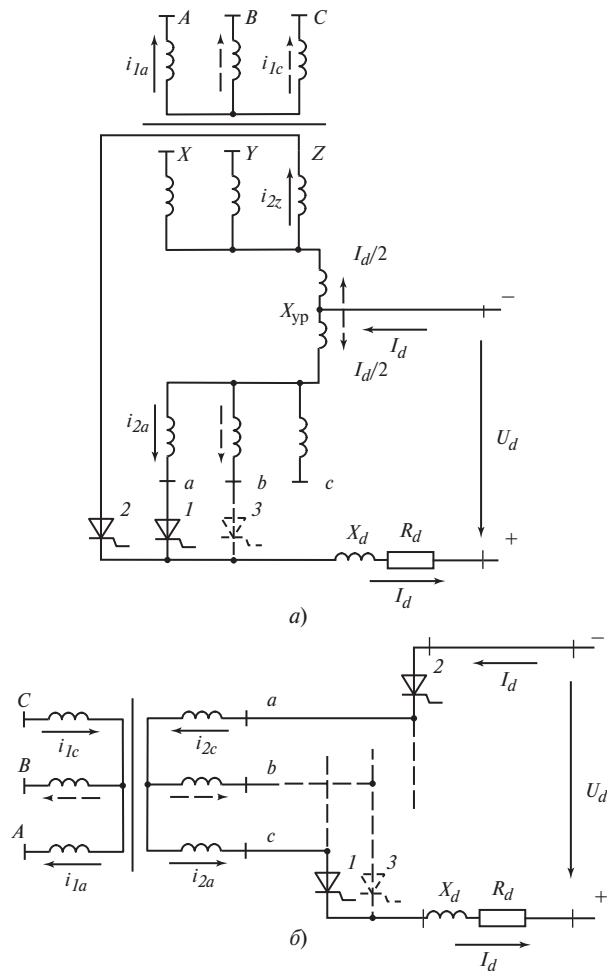
— максимальное значение выпрямленного тока в месте повреждения ( $I_{dmax}$ ), А;

— среднее значение выпрямленного тока в месте повреждения при установившемся режиме КЗ ( $I_{dy}$ ), А.

**Расчет токов при коротком замыкании полюсов неуправляемого выпрямителя при наличии сглаживающего реактора.** При наличии реактора в цепи выпрямленного тока обычно принимают два допущения: выпрямленный ток идеально сглажен ( $L_d = \infty$ ) и активное сопротивление реактора пренебрежимо мало ( $R_d = 0$ ).

Сглаживающий реактор препятствует резкому увеличению выпрямленного тока при возникновении КЗ в его цепи, поэтому расчету подлежит установившийся режим преобразования.

При КЗ выпрямителя за реактором среднее значение выпрямленного напряжения  $U_d$  на зажимах вентильного устройства равно нулю (как и в точке КЗ). Однако оно имеет значительную переменную составляющую, которую воспринимает реактор. В те моменты времени, когда  $U_d < 0$ , ток  $I_d$  поддерживается за счет расхода электромагнитной энергии реактора. В другие моменты, когда  $U_d > 0$ , реактор энергию запасает.



**Рис. 4.11. Схемы замещения преобразователей при их работе группами по 2—3 вентилей:**  
 а — две обратные звезды с уравнильным реактором;  
 б — трехфазная мостовая

При установившемся режиме короткого замыкания трехфазного мостового выпрямителя его вентили включаются поочередно группами по 3—4 вентилей с углами коммутации  $\gamma = \pi + 3$ , с вынужденными углами включения  $\alpha = \alpha_{\text{вын}} = \pi/6$ . При этом вентильная обмотка оказывается в режиме трехфазного короткого замыкания. В выпрямителе, собранном по схеме две обратные звезды с уравни-

тельным реактором, вентили включаются постоянно группами по три вентилia в каждом плече выпрямителя. При этом обе вентильные обмотки находятся в режиме трехфазного замыкания. Точку КЗ оба плеча выпрямителя подпитывают параллельно и практически независимо, как выпрямители, собранные по схеме трехфазная звезда, с общим нулевым выводом. В обоих случаях длительность включения каждого проводящего вентиля может достигать  $\pi$ .

Среднее значение выпрямленного тока в месте повреждения при установившемся режиме короткого замыкания преобразователей зависит от выпрямления:

— трехфазная мостовая

$$I_{dy} = I_m,$$

— две обратные звезды с уравнительным реактором

$$I_{dy} = 2I_m,$$

где  $I_m$  — амплитуда периодического фазного тока вентильной обмотки при ее трехфазном коротком замыкании.

**Расчет токов при коротком замыкании полюсов управляемого выпрямителя.** Управляемый выпрямитель, как правило, имеет катодный реактор, индуктивность которого должна быть достаточной, чтобы ограничить ток короткого замыкания в начальной фазе переходного процесса до значения, допустимого для тиристорov, а при необходимости — таким, чтобы обеспечить сглаживание пульсаций выпрямленного тока при нормальном режиме работы. Уравнительный реактор (при схеме выпрямления две обратные звезды) предназначен для обеспечения шестифазного режима преобразования энергии при нормальных условиях. Он имеет небольшую индуктивность, быстро насыщается при значительном увеличении выпрямленного тока. Поэтому при расчетах токов КЗ его индуктивностью обычно пренебрегают.

При возникновении КЗ полюсов выпрямителя и успешной работе электронной защиты тиристорov могут иметь место следующие виды КЗ:

— однократное двухфазное КЗ вентильной обмотки преобразовательного трансформатора — при трехфазной мостовой схеме выпрямления;

— однократное однофазное КЗ каждой вентильной обмотки преобразовательного трансформатора — при схеме выпрямления две обратные звезды с уравнительным реактором.

Методика расчетов токов при коротких замыканиях полюсов управляемого и неуправляемого выпрямителей должна охватывать все возможные случаи аварийных условий, которые учитываются

при выборе и проверке электрооборудования и защит вентильного преобразователя промышленной электроустановки. В полном объеме методика приведена в п. 4.4.2.

#### **4.4.2. Расчет токов КЗ трехфазных вентильных преобразователей**

**Расчет токов при коротком замыкании полюсов выпрямительного преобразователя.** При составлении схемы замещения (рис. 4.10) параметры элементов расчетной схемы следует привести к ступени напряжения вторичной (вентильной) обмотки преобразовательного трансформатора в системе именованных единиц. Расчет параметров схем замещения сети переменного тока и преобразовательных трансформаторов осуществляют по [38].

Схемы замещения трехфазных вентильных преобразователей, выполненных по схеме две обратные звезды с уравнительным реактором и по трехфазной мостовой схеме, приведены на рис. 4.11.

Катодный реактор с параметрами  $X_d, R_d$  при оценке условий КЗ следует рассматривать как токоограничивающий, а при оценке условий нормальной работы нагрузки на постоянном токе — как сглаживающий.

Расчеты токов КЗ в установках, выполненных по схеме двенадцатифазного преобразования, выполняют с применением ЭВМ, используя, например, матрично-топологические методы расчета разветвленных цепей.

*Расчетные условия.* Токи КЗ для выбора и проверки агрегатного оборудования по условиям КЗ, а также для выбора защитных устройств рассчитывают при наиболее тяжелых условиях:

— КЗ полюсов выпрямителя не сопровождается дугowymi явлениями в месте повреждения (исключая электроустановки с токами КЗ выше 100 кА);

— момент возникновения КЗ совпадает с моментом открытия какого-либо вентиля.

Расчету подлежат амплитуда периодической составляющей фазного тока вторичной обмотки преобразовательного трансформатора, максимальное значение тока КЗ в цепи переменного тока и вентилях, ударный ток, протекающий в полупроводниковом приборе, максимальное и среднее значения выпрямленного тока в месте повреждения.

Кроме того, проверяют тепловое действие тока КЗ на полупроводниковый прибор.

*Расчет токов в случае КЗ полюсов неуправляемого выпрямительного агрегата при отсутствии (без учета) катодного реактора.* При расчете токов в случае, когда неуправляемый выпрямитель не

имеет катодного реактора, учитывают, что КЗ полюсов такого выпрямителя эквивалентно трехфазному КЗ вторичных (вентильных) обмоток преобразовательного трансформатора.

Амплитуду периодической составляющей фазного тока вторичной (вентильной) обмотки преобразовательного трансформатора ( $I_m$ ) в амперах определяют по выражению

$$I_m = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}}, \quad (4.16)$$

где  $E$  — действующее значение фазной ЭДС трехфазной системы переменного тока, В;  $R_\Sigma$  — суммарное активное сопротивление элементов одной фазы переменного тока, Ом;  $X_\Sigma$  — суммарное индуктивное сопротивление элементов одной фазы переменного тока, Ом.

Указанные параметры следует определять по формулам:

$$E = U_{\text{ном}2} / \sqrt{3}; \quad R_\Sigma = R_c + R_T + R_A + R_B;$$

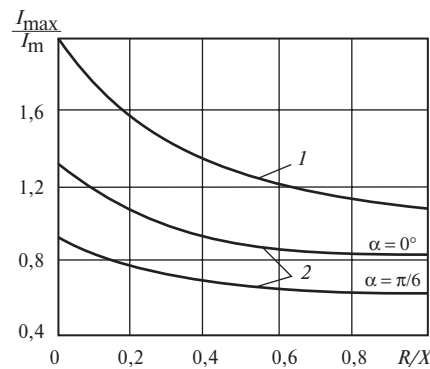
$$R_B = R_D / (n/m); \quad X_\Sigma = X_c + X_T$$

где  $U_{\text{ном}2}$  — линейное напряжение вторичной (вентильной) обмотки, В;  $R_c, X_c$  — эквивалентные активное и индуктивное сопротивления системы переменного тока, Ом;  $R_T, X_T$  — активное и индуктивное сопротивления преобразовательного трансформаторного тока, отнесенные к одной вентильной обмотке, Ом;  $R_A$  — активное сопротивление анодных проводников, Ом;  $R_B$  — активное сопротивление вентиля с учетом  $n$  последовательно и  $m$  параллельно соединенных полупроводниковых приборов, Ом.

Максимальное значение тока КЗ в цепи переменного тока и вентиля ( $I_{\text{max}}$ ), А, определяют по соотношению

$$I_{\text{max}} = (I_{\text{max}}/I_m)I_m, \quad (4.17)$$

где  $I_{\text{max}}/I_m$  — ударный коэффициент цепи КЗ, определяемый по кривой 1 на рис. 4.12 в зависимости от отношения  $R/X$  короткозамкнутой цепи.



**Рис. 4.12.** Зависимости отношения максимальной амплитуды тока КЗ к амплитуде периодической составляющей этого тока от отношения  $R/X$  короткозамкнутой цепи:

1 — неуправляемый выпрямитель; 2 — управляемый выпрямитель с электронной защитой

Ударный ток, протекающий в полупроводниковом приборе, ( $i_{уд}$ ) в амперах определяют с учетом  $m$  параллельных ветвей в цепи группового вентиля, т.е.

$$i_{уд} = I_{max} / m. \quad (4.18)$$

Тепловое действие тока КЗ на полупроводниковый прибор проверяют, используя соотношение

$$I_{эф}^2 t_k \leq m \int_0^{t_k} i^2 dt, \quad (4.19)$$

где  $t_k$  — продолжительность короткого замыкания, с;  $I_{эф}$  — эффективное значение тока, протекающего через вентиль во время КЗ, которое допустимо принимать равным  $I_{эф} = I_{max} / \sqrt{2}$  при  $t_k \leq 20$  мс и  $I_{эф} = I_m \sqrt{2}$  при  $t_k > 20$  мс.

Максимальное значение выпрямленного тока в месте повреждения ( $I_{dmax}$ ) в амперах определяют по формулам:

при выполнении преобразователей по схеме две обратные звезды с уравнительным реактором

$$I_{dmax} = 2I_{max}; \quad (4.20)$$

при выполнении преобразователей по трехфазной мостовой схеме

$$I_{dmax} = I_{max}. \quad (4.21)$$

При наличии в цепях групповых вентилях моста анодных реакторов следует использовать формулу

$$I_{dmax} = 2,61I_m,$$

где  $I_m = \sqrt{2}E / (X_{\Sigma} + X_{ар})$ ;  $X_{ар}$  — индуктивное сопротивление анодного реактора, Ом.

Среднее значение выпрямленного тока в месте повреждения при установившемся режиме КЗ определяют по формулам:

при выполнении преобразователей по схеме две обратные звезды с уравнительным реактором

$$I_{dy} = (6/\pi)I_m; \quad (4.22)$$

при выполнении преобразователей по трехфазной мостовой схеме

$$I_{dy} = (3/\pi)I_m. \quad (4.23)$$

*Расчет токов в случае КЗ полюсов неуправляемого выпрямителя при наличии (при учете) катодного реактора. Если неуправляемый*

выпрямитель имеет катодный реактор, то при расчете токов допустимо считать, что выпрямленный ток идеально сглажен.

Расчетным режимом в рассматриваемом случае следует считать установившийся режим КЗ (так как начальные токи КЗ существенно ограничены катодным реактором). При этом учитывают, что в установившемся режиме КЗ полюсов неуправляемого выпрямителя с катодным реактором приводит к трехфазному КЗ вторичных (вентильных) обмоток преобразовательного трансформатора.

Среднее значение выпрямленного тока в месте повреждения в установившемся режиме КЗ ( $I_{dy}$ ) в амперах определяют по формулам:

— без учета активных сопротивлений цепей постоянного тока и выполнении преобразователей по схеме две обратные звезды с уравнильным реактором

$$I_{dy} = 2I_m; \quad (4.24)$$

— с учетом активных сопротивлений цепей постоянного тока и той же схеме выпрямления

$$I_{dy} = \frac{1,01E}{\sqrt{(3/8R_\Sigma + R_{d\Sigma})^2 + (3/8X_\Sigma)^2}}; \quad (4.25)$$

— без учета активных сопротивлений цепей постоянного тока и выполнении преобразователей по трехфазной мостовой схеме

$$I_{dy} = I_m; \quad (4.26)$$

— с учетом активных сопротивлений цепей постоянного тока и той же схеме выпрямления

$$I_{dy} = \frac{2,02E}{\sqrt{(3/2R_\Sigma + R_{d\Sigma})^2 + (3/2X_\Sigma)^2}}, \quad (4.27)$$

где  $R_{d\Sigma}$  — суммарное активное сопротивление короткозамкнутых цепей постоянного тока выпрямительного агрегата, Ом, которое в общем случае равно

$$R_{d\Sigma} = R_d + R_{ош} + R_{кб} + R_{пк} + R_{тк}, \quad (4.28)$$

где  $R_d$  — сопротивление катодного реактора, Ом;  $R_{ош}$  — сопротивление ошиновки, Ом;  $R_{кб}$  — сопротивление выводных кабелей, Ом;  $R_{пк}$  — переходное сопротивление контактных соединений, Ом;  $R_{тк}$  — сопротивление токовых катушек, Ом.

При определении минимального значения тока в установившемся режиме КЗ необходимо учитывать влияние на ток КЗ активного сопротивления электрической дуги, возникшей в месте КЗ, а также



увеличение активного сопротивления жил кабеля вследствие его нагрева током КЗ.

В этом случае суммарное активное сопротивление цепи КЗ равно

$$R_{d\Sigma l} = R_d + R_{\text{ош}} + K_v R_{\text{кб}} + R_{\text{пк}} + R_{\text{тк}} + R_d,$$

где  $K_v$  — коэффициент увеличения активного сопротивления кабеля, определяемый по (3.19) или в соответствии с рис. 3.13, 4.2 и 4.3 в зависимости от сечения кабеля, тока и продолжительности КЗ, а также по (3.20) с учетом теплоотдачи в изоляцию;  $R_d$  — активное сопротивление дуги, определяемое по (3.13).

Значение тока дугового КЗ можно также определять по (3.23).

*Расчет токов при КЗ полюсов управляемого выпрямителя.* Если управляемый выпрямитель не имеет электронной защиты вентилей (тиристоров) и быстродействующей системы регулирования углов, то расчет токов при КЗ полюсов выпрямителя следует производить, как указано выше. При этом расчету подлежат амплитуда периодической составляющей тока короткозамкнутой цепи, максимальное значение тока этой цепи и ударный ток, протекающий в полупроводниковом приборе. Кроме того, проверяют тепловое действие на полупроводниковый прибор.

Если управляемый выпрямитель имеет электронную защиту вентилей (тиристоров), то учитывают, что при возникновении КЗ полюсов выпрямителя и успешной работе электронной защиты имеют место:

1) при выполнении преобразователей по трехфазной мостовой схеме (см. рис. 4.11, б) — однократное двухфазное КЗ вентильной обмотки преобразовательного трансформатора;

2) при выполнении преобразователей по схеме две обратные звезды с уравнильным реактором (см. рис. 4.11, а) — однократное однофазное КЗ каждой вентильной обмотки преобразовательного трансформатора.

Амплитуду периодической составляющей тока коротко замкнутой цепи (обмоток трансформатора, вентилей и катодного реактора ( $I_m$ )) в амперах определяют по выражениям:

— при выполнении преобразователей по схеме две обратные звезды с уравнильным реактором

$$I_m = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{(R_\Sigma + R_{d\Sigma})^2 + (X_\Sigma + \omega L_d)^2}}; \quad (4.29)$$

— при выполнении преобразователей, по трехфазной мостовой схеме

$$I_m = \frac{\sqrt{3} \sqrt{2} E}{\sqrt{(2R_\Sigma + R_{d\Sigma})^2 + (2X_\Sigma + \omega L_d)^2}}, \quad (4.30)$$

где  $\omega$  — угловая частота переменного тока, 1/с.

Максимальное значение тока короткозамкнутой цепи (обмоток трансформатора, вентиля и катодного реактора) ( $I_{\max}$ ) в амперах определяют по формуле (4.18), а входящий в нее ударный коэффициент цепи КЗ  $I_{\max}/I_m$  — по кривой 2 на рис. 4.12 в зависимости от отношения  $R/X$  короткозамкнутой цепи и угла включения  $\alpha$  вентиля преобразователя.

Ударный ток, протекающий в полупроводниковом приборе, ( $i_{уд}$ ) в амперах определяют с учетом  $m$  параллельных ветвей в цепи группового вентиля, используя формулу (4.18).

Тепловое действие тока КЗ на полупроводниковый прибор проверяют, используя соотношение

$$(i_{уд}/\sqrt{2})^2 t_k \leq \int_0^{t_k} i^2 dt, \quad (4.31)$$

где  $t_k$  — продолжительность короткого замыкания, с, которая, в зависимости от отношения  $R/X$  короткозамкнутой цепи, составляет 12—15 мс.

Если управляемый выпрямитель имеет быстродействующую систему регулирования углов включения (без блокировки импульсов управления), то токи КЗ в произвольный момент времени рассчитывают методом математического моделирования переходных процессов с применением ЭВМ.

#### **4.5. Расчет токов КЗ в электроустановках, получающих питание одновременно от аккумуляторных батарей, машин постоянного тока и статических преобразователей**

Развитие методов расчета токов КЗ включает методику расчета токов КЗ в электроустановках, питаемых разными типами источников энергии, с учетом их совместного влияния на ток КЗ и таких факторов как электрическая дуга и увеличение активного сопротивления проводников короткозамкнутых цепей.

Методика аналитических расчетов тока КЗ зависит от типа электроустановки, ее расчетной схемы и положения расчетной точки КЗ. При этом возможны следующие случаи:

а) исходная расчетная схема электроустановки содержит один или несколько однотипных отличающихся по параметрам источников питания;

б) исходная расчетная схема содержит различные источники энергии (машины постоянного тока — М, аккумуляторные батареи — АБ и преобразователи — П). При этом расчетная точка КЗ может находиться на общих сборных шинах установки (при металлическом КЗ К2, рис. 2.1, б) или за общим сопротивлением (К1).

При определении минимального значения тока КЗ в электроустановках, питаемых от однотипных источников энергии, используются изложенные выше рекомендации касающиеся радиальных цепей, питаемых от АБ, машин постоянного тока или преобразователей. В электроустановках с машинами постоянного тока влияние устойчивой дуги учитывается с помощью кривых  $K_d = f(R_k)$ , разработанных по данным экспериментов и приведенных на рис. 4.3 и 4.8. При этом значения коэффициента  $K_d$  для электроустановок с машинами мощностью до 100—150 кВт допустимо определять по кривой 2 рис. 4.3, для электроустановок с генераторами большой мощности (ток КЗ до 140 кА) — по кривым рис. 4.8. Тепловой спад тока КЗ можно учитывать, используя расчетную методику (см. § 3.3) или расчетные кривые рис. 3.18, 4.2, 4.3.

При расчете КЗ через самопогасающую дугу сопротивление дуги и другие параметры режима к моменту погасания дуги можно определить с помощью разработанной программы для ЭВМ или кривых рис. 3.11. Учет теплового спада тока КЗ в этом случае не обязателен. Изменение параметров аккумуляторных батарей можно учитывать в соответствии с § 3.2.

При расчете коротких замыканий в электроустановках питаемых от разных типов источников энергии результирующий ток металлического КЗ (точка К2, рис. 2.1, б) определяется как сумма токов отдельных источников, примыкающих непосредственно к месту КЗ.

Результирующий ток при металлическом КЗ продолжительностью не более 0,1 с за общим для различных источников сопротивлением (точка К1, рис. 2.1, б) определяется как сумма скорректированных значений токов КЗ от этих источников.

$$I_{\Sigma K1}(t) = \beta_{AB} I_{AB}(t) + \beta_M I_M(t) + \beta_P I_P(t),$$

где  $I_{AB}(t)$ ,  $I_M(t)$ ,  $I_P(t)$  — токи КЗ соответственно аккумуляторных батарей, машин постоянного тока и преобразователей, рассчитанные для

каждого источника без учета их взаимного влияния;  $\beta_{AB}$ ,  $\beta_M$ ,  $\beta_\Pi$  — коэффициенты коррекции токов отдельных источников, которые для условий металлического КЗ в общем виде определяются по выражению:

$$\beta = R_{др}(R_i + R_k) / (R_{др}R_i + R_iR_k + R_kR_{др}),$$

где значения  $R_i$  и  $R_{др}$  определяются в зависимости от типа источника:

$$\text{АБ: } R_{iAB} = R_{вт} + R_{кб AB}; \quad R_{др AB} = (R_{ип} + R_{им}) / R_{ип}R_{им};$$

$$\text{М: } R_{им} = R_A + R_{кб M}; \quad R_{др M} = (R_{iAB} + R_{ип}) / R_{iAB}R_{ип};$$

$$\text{П: } R_{ип} = U / I_{кп} - R_k; \quad R_{др П} = (R_{iAB} + R_{им}) / R_{iAB}R_{им},$$

где  $R_{кб AB}$ ,  $R_{кб M}$  и  $R_{кб П}$  — соответственно активные сопротивления цепей подключения АБ, М и П к сборным шинам постоянного тока;  $R_{вт}$  — внутреннее сопротивление аккумулятора;  $R_A$  — сопротивление якоря машины постоянного тока;  $U$  — напряжение в точке КЗ в нормальном режиме.

Расчет токов КЗ выполненный по изложенной методике для условий соответствующих экспериментам в схеме рис. 2.1 указывает на удовлетворительное совпадение результатов расчета и данных экспериментов. Так, при КЗ за общим сопротивлением ( $R_k = 113$  мОм, табл. 2.1) коэффициенты коррекции соответственно имели значения  $\beta_{AB} = 0,37$  и  $\beta_{ОДГ} = 0,68$ . При этом погрешность расчета тока КЗ по сравнению с экспериментом для АБ составляла 5,7 %, для ОДГ — 7 %.

При определении тока КЗ с учетом нелинейности короткозамкнутой цепи коэффициенты коррекции определяются с учетом увеличения активного сопротивления проводников, влияния электрической дуги и изменения внутреннего сопротивления аккумуляторной батареи. Например, коэффициент коррекции для АБ ( $\beta_{ABt}$ ) определяется по выражению:

$$\beta_{ABt} = \frac{\gamma_t(R_{втt} + R_{кб AB}K_{91} + R_kK_{92} + R_{дt})}{\gamma_t(R_{втt} + R_{кб AB}K_{91}) + (R_{втt} + R_{кб AB}K_{91})(R_kK_{92} + R_{дt})} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{+ (R_kK_{92} + R_{дt})\gamma_t};$$

$$\gamma_t = \frac{(R_\Pi + R_{кб П}K_{93})(R_A + R_{кб M}K_{94})}{(R_\Pi + R_{кб П}K_{93}) + (R_A + R_{кб M}K_{94})},$$

где  $R_{дt}$ ,  $R_{втt}$  и  $K_{9i}$  соответственно сопротивление дуги в месте КЗ, сопротивление аккумуляторной батареи и коэффициенты увеличения

активного сопротивления жил кабельных линий, которые определяются с помощью приведенных выше моделей.

Методика расчета тока КЗ в электроустановке питаемой от разных источников энергии предусматривает использование расчетных кривых изменения коэффициентов коррекции для определенных моментов времени в зависимости от степени увеличения активного сопротивления проводников и сопротивления дуги. На рис. 4.13 приведены кривые изменения указанных коэффициентов в виде функций  $\beta_{AB} = f(R_{др}, s_{кб}, l_{кб})$  и  $\beta_{п} = f(R_{др}, s_{кб}, l_{кб})$  для различной продолжительности КЗ ( $t_k = 1$  и 2 с) в электроустановке, питаемой аккумуляторной батареей типа СК-24 и преобразователем.

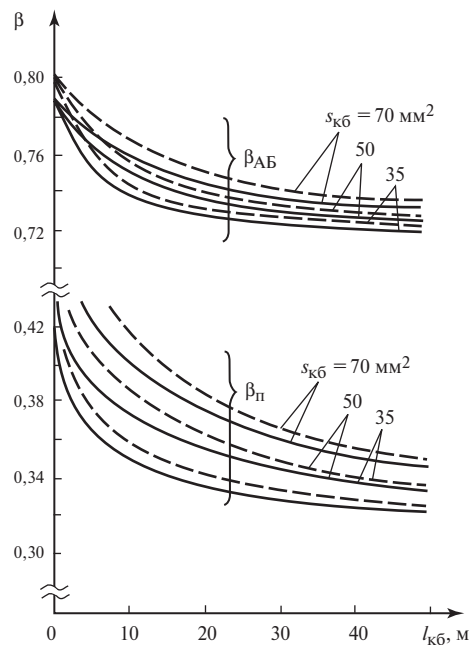


Рис. 4.13. Зависимости  $\beta_{AB} = f(R_{др}, s_{кб}, l_{кб})$  и  $\beta_{п} = f(R_{др}, s_{кб}, l_{кб})$  при КЗ в кабельной линии через устойчивую дугу при  $t_k = 1$  с (штриховые кривые) и  $t_k = 2$  с (сплошные кривые)

#### 4.6. Практическая методика расчета тока КЗ в электроустановке большой мощности

В результате анализа многочисленных опытов КЗ в электроустановках большой мощности разработана методика расчета тока КЗ [8]. Методика содержит основные расчетные зависимости, рекомендуемые для использования при проектировании электроустановок постоянного тока, состоящих в основном из электрических машин.

1. Напряжение на дуге (при расчетных токах металлического КЗ, в диапазоне 15—70 кА)

$$U_d = 60 + 20a \quad (a \geq 1,0 \text{ см})$$

или

$$U_d = 70 \sqrt{a} \quad (a \geq 0,5 \text{ см}),$$

где  $a$  — расстояние между электродами.

2. Максимальное (критическое) напряжение на дуге

$$U_{д \max} = E - \frac{130R_{ц}}{R_{ц} + 8} \text{ В,}$$

где  $R_{ц}$  — результирующее сопротивление короткозамкнутой цепи, мОм;  $E$  — ЭДС источника питания, В.

3. Ток реального металлического КЗ при наличии дуги нулевой длины

$$I_{к \max} = \frac{E - 50}{R_{ц}} \text{ кА.}$$

4. Минимальный ток КЗ через дугу

$$I_{к \min} = \frac{130}{R_{ц} + 8} \text{ кА.}$$

5. Максимальное время горения дуги в установках напряжением 230 В

$$t_{д \max} = \left( \frac{690}{R_{ц}} - 40 \right) \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

6. Максимальное расстояние между электродами, при котором еще возможно устойчивое горение дуги

$$a_{д \max} = \left[ \frac{E}{20} - 6,5 \frac{R_{ц}}{R_{ц} + 8} - 3 \right] \text{ см.}$$

Пример. Рассмотрим использование некоторых рекомендаций применительно к электроустановке постоянного тока (рис. 4.14). Исходные данные: генераторы G1, G2, G3:  $P_{ном} = 500$  кВт,  $I_{ном} = 2180$  А,  $U_{ном} = 239$  В,  $R_{я} = 7,7$  мОм. Электродвигатель Д:  $U_{ном} = 220$  В,  $I_{ном} = 4900$  А,  $R_{я} = 8,5$  мОм.

1. Определим ток на который следует ориентироваться при расчете электродинамической стойкости шин ГРЩ. При сведении всех ЭДС и сопротивлений к эквивалентным получаем  $E_{э} = 235$  В,  $R_{э} = 1,96$  мОм.

Ток металлического КЗ в точке  $K_1$

$$I_{к \max} = \frac{235}{1,96} = 120 \text{ кА.}$$

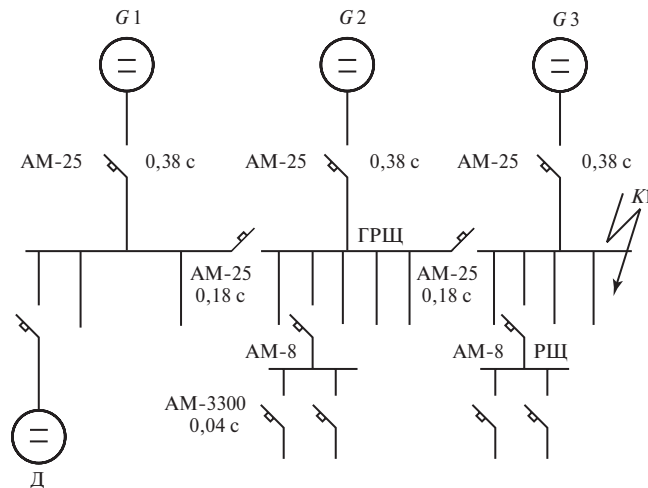


Рис. 4.14. Схема типовой установки постоянного тока

При использовании рекомендаций по учету дуги нулевой длины

$$I_{к \max} = \frac{235 - 50}{1,96} = 94 \text{ кА.}$$

2. Для исключения устойчивых КЗ на шинах ГРЩ расстояние между шинами разной полярности

$$a \geq \left[ \frac{235}{20} - 6,5 \frac{1,96}{1,96 + 8} - 3 \right] = 7,5 \text{ см.}$$

3. Определим, каковы должны быть уставки расцепителей максимального тока генераторных автоматов, чтобы автоматы срабатывали при всех видах КЗ. При расчете исходим из того, что точку КЗ подпитывает только один генератор. При этом минимальный ток КЗ

$$I_{к \min} = \frac{130}{7,7 + 8} = 8,3 \text{ кА.}$$

Так как номинальный ток генератора составляет 2180 А, то уставка генераторного автомата, выраженная в долях номинального тока генератора, должна быть

$$k_y \leq \frac{8,3}{2,18} = 3,8.$$

4. Для обеспечения избирательности следовало бы выбрать следующие уставки по времени автоматических выключателей: на автоматах фидеров потребителей — без выдержки времени; на автома-

тах фидеров РЩ — 0,18 с; на автоматах секционных — 0,38 с и на генераторных автомата — 0,63 с.

Расчеты максимальных токов КЗ (например, в точке  $K_1$ ) показывают, что через секционные автоматы протекают токи КЗ, значительно превышающие 50 кА. Основываясь на приведенных выше рекомендациях, уставку во времени секционных автоматов следует понизить до 0,18 с, однако при этом придется отказаться от выдержек времени на автоматах фидеров РЩ, т.е. от избирательности срабатывания автоматов фидеров потребителей и РЩ.



## ПРИЛОЖЕНИЕ

---

### ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

---

Индуктивность обмотки возбуждения машины постоянного тока  $L_f$ , Гн

$$L_f = \frac{120\omega_f\sigma_a E_0}{N_a n_0 a_f I_{f0}}.$$

Индуктивность серийной (компаундной) обмотки  $L_c$ , Гн

$$L_c = L_f \left( \frac{\omega_c}{\omega_f} \frac{a_f}{a_c} \right)^2.$$

Индуктивность якорной обмотки ( $L_a$ ), Гн, для некомпенсированных машин

$$L_a = A_1 \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} \frac{1}{2\pi \frac{pn_0}{60}} K_H = 5 \frac{1}{2pn_0} \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}},$$

где  $K_H$  — коэффициент насыщения магнитной системы главных полюсов машины. Для компенсированных машин

$$L_a = A_2 \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} \frac{1}{2\pi \frac{pn_0}{60}} = 3 \frac{1}{2pn_0} \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}}.$$

Индуктивность якорной цепи компенсированных машин  $L_{я}$ , Гн

$$L_{я} = L_a + L_k + L_d,$$

где  $L_a$  — индуктивность обмотки якоря;  $L_k$  — индуктивность компенсационной обмотки;  $L_d$  — индуктивность обмотки добавочных полюсов.

Индуктивность якорной цепи генераторов  $L_{я}$ , Гн

$$L_{я} = 0,15 \frac{U_{\text{НОМ}}}{I_{\text{НОМ}}} \frac{1}{p\omega_0},$$

где  $\omega_0$  — основная угловая частота вращения якоря, 1/с;  $p$  — число пар главных полюсов.

Индуктивность якорной цепи нереверсивных быстроходных машин  $L_{я}$ , Гн

$$L_{я} = 19,1 \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}} \frac{C_x}{pn_0},$$

где  $C_x = 0,1$  — для двигателей;  $C_x = 0,2$  — для генераторов.

Индуктивность якорной цепи различных групп машин постоянного тока  $L_{я}$ , Гн

$$L_{я} = \lambda \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}} \frac{1}{p\omega_0},$$

где  $\lambda$  — безразмерный коэффициент, учитывающий особенность конструкции машины постоянного тока. Его рассчитывают по данным заводского формуляра. При ориентировочных расчетах допустимо использовать средние значения указанного коэффициента, приведенные в табл. П1.

Активное сопротивление обмотки якоря  $R_a$ , Ом

$$R_a = (0,36l_a + 0,45\tau) \frac{U_{НОМ}}{I_{НОМ}} \frac{J_a}{U_K(a/p)} 10^{-3},$$

Таблица П1

Расчетные параметры для машин постоянного тока

Группа машин постоянного тока	Значение расчетного параметра		
	1	$\lambda_{ср}$	$T_{я}$ , с
Тихоходные реверсивные прокатные двигатели	0,075—0,125	0,100	0,025—0,070
То же, с двухходовой обмоткой якоря	0,065—0,100	0,085	0,040—0,060
Быстроходные нереверсивные прокатные двигатели специальные	0,060—0,070	0,065	0,012—0,020
Генераторы постоянного тока с одноходовой обмоткой якоря	0,140—0,175	0,157	0,018—0,030
Быстроходные нереверсивные прокатные двигатели	0,080—0,115	0,097	0,020—0,030
Генераторы постоянного тока с двух- и трехходовыми обмотками	0,115—0,145	0,130	0,020—0,035
Шахтные подъемные двигатели постоянного тока	До 0,26	До 0,25	До 0,1

где  $l_a$  — длина магнитопровода без вентиляционных каналов, см;  $\tau$  — полюсное деление, см;  $J_a$  — плотность тока в обмотке якоря, А/мм<sup>2</sup>;  $U_k$  — межсегментное напряжение на коллекторе, В, которое следует определять по формуле

$$U_k = \frac{U_{\text{ном}} I_{\text{ном}}}{\pi r A_i (a/p)},$$

$A_i$  — линейная нагрузка якоря, А/см;  $r$  — радиус якоря, см.

Суммарное сопротивление якорной и компенсационной обмоток и обмотки добавочных полюсов с учетом падения напряжения на щетках  $R_{\text{я}}$ , Ом

$$R_{\text{я}} \approx 2R_a.$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Электрическая часть станций и подстанций:** Учеб. для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова и др.; Под ред. А.А. Васильева. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с.
2. **Багоцкий В.С., Скудин А.М.** Химические источники тока. М.: Энергоиздат, 1981. 360 с.
3. **Беляев Б.В.** Работоспособность химических источников тока. М.: Связь, 1979. 112 с.
4. **Дасоян М.А., Агуф И.А.** Современная теория свинцового аккумулятора. Л.: Энергия, 1975. 312 с.
5. **Устинов П.И.** Стационарные аккумуляторные установки. М.: Энергия, 1970. 312 с.
6. **Хейфец И.Д., Якуб Ю.А.** Кислотные аккумуляторные батареи на понижающих подстанциях // Электрические станции. 1971. № 2. С. 47—51.
7. **Влияние обратимых двигатель-генераторов и статических преобразователей на ток КЗ в системе постоянного тока электростанций / В.В. Жуков, В.Ф. Казайкин, М.А. Шиша и др.** // Электрические станции. 1990. № 10. С. 44—48.
8. **Азовцев А.А., Рокотян Ю.В.** Короткие замыкания в мощных электроустановках постоянного тока // Судовая электромеханика и связь. 1968. Вып. 40. С. 3—15.
9. **Рюденберг Р.** Переходные процессы в электроэнергетических системах. М.: ИЛ. 1955. 715 с.
10. **Брон О.Б.** Электрическая дуга в аппаратах управления. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1954. 230 с.
11. **Брон О.Б.** О токах короткого замыкания в мощных низковольтных сетях // Электричество. 1959. № 6. С. 60—63.
12. **Залесский А.М.** Электрическая дуга отключения. М.—Л.: Госэнергоиздат, 1963. 170 с.
13. **Жуков В.В., Шиша М.А., Корючина И.Н.** Экспериментальные исследования дуговых коротких замыканий в системе постоянного тока электростанций и подстанций // Электрические станции. 1992. № 10. С. 51—57.
14. **Жуков В.В.** Расчет токов коротких замыканий в электроустановках, питаемых от аккумуляторных батарей // Электрические станции. 1996. № 9. С. 29—35.
15. **Hawrence E. Fisher.** Resistance of how — Woltage ACA Arcs // IEE Transaction of Industry and General Application. 1970. Vol. 1GA-6. № 6. С. 607—616.
16. **Кузнецов Ю.П., Адам Эль-Зейн.** Математическое моделирование и расчеты дуговых процессов при коротких замыканиях в сетях постоянного тока // Тезисы докл. ВНК «Токи короткого замыкания в энергосистемах». М., 1995. С. 64—67.
17. **Адам Абдалла Адам Эль-Зейн.** Исследование влияния дуговых процессов на короткие замыкания в цепи аккумуляторной батареи: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 1999. 20 с.

18. **Диагностика** электроустановок оперативного постоянного тока на подстанциях ОАО «Мосэнерго» / В.В. Балашов, Ю.П. Гусев, А.М. Поляков, В.А. Фещенко // Электрические станции. 2000. № 8.
19. **Гусев Ю.П., Дороватовский Н.М., Поляков А.М.** Оценка технического состояния аккумуляторных батарей электростанций и подстанций в процессе эксплуатации // Электро. 2002. № 5. С. 34—35.
20. **Поляков А.М.** Разработка методики и технических средств расчетного и экспериментального определения токов короткого замыкания от аккумуляторных батарей с учетом изменения их параметров в процессе эксплуатации: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М., 2001. 20 с.
21. **ГОСТ 29176-91.** Короткие замыкания в электроустановках. Методика расчета в электроустановках постоянного тока. М.: Издательство стандартов, 1992.
22. **Мирзоев А.Г., Трост Л.Е., Тимонин В.К.** Термическая стойкость и условия возгорания силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией // Электрические станции. 1988. № 4. С. 71—76.
23. **Гавриков В.М., Гамилко В.А., Евдокунин Г.А.** Математическое моделирование открытой дуги переменного тока. Деп. в Информэнерго № 28338-Эн88. С. 17.
24. **Математические** методы исследования динамики и проблемы управления низкотемпературной плазмой / О.Я. Новиков, В.Ф. Путько, В.В. Танаев и др. Новосибирск: Наука, 1991. 180 с.
25. **Кулаков П.А., Новиков О.Я., Тимошевский А.Н.** Устойчивость горения электрической дуги. Новосибирск: Наука, 1992. 160 с.
26. **Любиев О.Н.** Аналитическое описание аккумулятора как элемента электрической цепи // Изв. вузов. Электромеханика. 1971. № 11. С. 1190—1196.
27. **Математическое** моделирование свинцово-кислотных аккумуляторов / Ю.Я. Герасименко и др. // Изв. вузов. Электромеханика. 1975. № 3. С. 250—258.
28. **Сборник** работ по химическим источникам тока / ВНИАИ. Л.: Энергоиздат. Ленингр. отдел, 1981. 100 с.
29. **Гусев Ю.П., Поляков А.М.** Электрофизические процессы в аккумуляторах электростанций при коротких замыканиях // Известия РАН. Энергетика. 2001. № 4.
30. **Hiram Gu and T.V. Nguyen.** A mathematical model of lead-acid cell // USA.: Electrochemical Society. 1987. V 134. № 12.
31. **Дасоян М.А., Агуф И.А.** Основы расчета, конструирования и технологии производства свинцовых аккумуляторов. Л.: Энергия, 1978. 152 с.
32. **ГОСТ 825-73.** Аккумуляторы свинцовые стационарные с электродами большой поверхности. Технические условия.
33. **Воилов А.М., Эйгель Ф.И.** Контроль состояния аккумуляторов. М.: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.
34. **Рюденберг Р.** Эксплуатационные режимы электроэнергетических систем и установок. Л.: Энергия, 1981. 576 с.
35. **Таев И.С.** Основы теории электрических аппаратов. М.: Высшая школа, 1987. 330 с.

36. **Будкевич Г.В.** Дуговые процессы при коммутации электрических цепей. М.: Энергия, 1973. 270 с.
37. **Гумин М.И., Жуков В.В.** Управление, контроль и сигнализация на электрических станциях и подстанциях. Раздел 47. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 3. Производство, передача и распределение электрической энергии / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов), —8-е изд., испр. и доп. М.: Издательство МЭИ, 2002. 964 с.
38. **ГОСТ Р 50270-92.** Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжения до 1 кВ. М.: Издательство стандартов, 1992.
39. **Методические указания по расчету защит в системе постоянного тока тепловых электростанций и подстанций.** МУ 34-70-035-83. М.: СПО СОЮЗТЕХЭНЕРГО, 1983. 30 с.
40. **Дополнение к методическим указаниям по расчету защит в системе постоянного тока тепловых электростанций и подстанций.** МУ 34-70-035-83. М.: СПО СОЮЗТЕХЭНЕРГО, 1987. 6 с.
41. **Правила устройства электроустановок.** Минэнерго СССР. — 6-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 648 с.
42. **ГОСТ 28895-91.** Расчет термически допустимых токов короткого замыкания с учетом неадиабатического нагрева. М.: Издательство стандартов, 1991.
43. **Шелков Е.А.** Расчет нагрева проводников при коротком замыкании // Электрические станции. 1975. № 4. С. 36—39.
44. **Бабак Н.А.** Скорость движения короткой электрической дуги // Электричество. 1973. № 2. С. 28—32.
45. **Slepian J.** Theory of the dein circuit — brea ker. Tr. AIEE. 1929. № 4.
46. **Справочник по электрическим машинам:** В 2 т. / Под ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 456 с.
47. **Костенко М.П.** Электрические машины. Специальная часть. Л.—М.: Госэнергоиздат, 1949. 712 с.
48. **Ермолин Н.П.** Переходные процессы в машинах постоянного тока. М.: Энергия, 1974. 114 с.
49. **Упрощенные** способы расчета токов короткого замыкания машин постоянного тока // Сборник завода «Электросила». 1954. № 12. С. 31—40.
50. **Справочник по проектированию электроснабжения, линий электропередачи и сетей /** Под ред. Я.М. Большама, В.И. Круповича, М.А. Самовера. — 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергия, 1974. 696 с.
51. **Тищенко Н.А.** Динамическая устойчивость прокатных двигателей постоянного тока // Электричество. 1963. № 9. С. 1—10.
52. **Орел О.А., Акимов Л.В.** Определение динамических параметров двигателей постоянного тока методом короткого замыкания // Электротехника. 1971. № 2. С. 35—36.
53. **Файнберг Н.Ю., Орел О.А.** О методе расчета тока короткого замыкания двигателя постоянного тока // Электротехника. 1972. № 2. С. 35—37.
54. **Метод** расчета переходных процессов в электрических цепях с машинами постоянного тока / С.И. Карибов, В.Д. Тулупов и др. // Электротехника. 1960. № 3. С. 23—27.

55. **Кириевский Е.В., Степанов Г.Н., Фоменко Г.П.** Моделирование аварийных режимов машин постоянного тока для оценки релейной защиты // *Электричество*. 1976. № 2. С. 43—47.
56. **Толстов Ю.Г. Мосткова Г.П., Ковалев Ф.И.** Трехфазные силовые полупроводниковые выпрямители. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 175 с.
57. **Полупроводниковые выпрямители** / Под ред. Ф.И. Ковалева Г.П. Мостковой. М.: Энергия, 1978. 446 с.
58. **Глух Е.М., Зеленев В.Е.** Защита полупроводниковых преобразователей. М.: Энергия, 1982. 151 с.
59. **Каганов И.Л.** Промышленная электроника. М.: Высшая школа, 1968. 560 с.
60. **Патон Б.Е., Лебедев В.К.** Элементы расчетов цепей и аппаратов переменного тока для дуговой сварки. Киев: АН УССР, 1953. 144 с.
61. **Cassie A.M., Masson F.O.** Post arc conductivity in gasblast circuit-breakers. CIGRE. 1956. № 103.
62. **Жуков В.В.** Короткие замыкания в электроустановках напряжением до 1 кВ. М.: Издательство МЭИ, 2004. 192 с.

*Производственно-практическое издание*

**ЖУКОВ Василий Владимирович**

**КОРОТКИЕ ЗАМЫКАНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Редактор *Н.Л. Пароева*  
Художественный редактор *А.Ю. Землеруб*  
Технический редактор *Т.А. Дворецкова*  
Корректор *В.В. Сомова*

Набор и верстка выполнены на компьютерах Издательства МЭИ  
Оператор компьютерной верстки *Пустошинова Н.В.*

Подписано в печать с оригинала-макета 14.03.05	Формат 60×90 1/16	
Бумага офсетная	Гарнитура Таймс	Печать офсетная
Усл. печ. л. 10,0	Усл.-кр.-от. 11,0	Уч.-изд.л. 9,5
Тираж 500 экз.	Заказ №	С-002

Издательство МЭИ, 111250, Москва, Красноказарменная, д. 14.

ОАО «Типография № 9», 111033 Москва, Волочаевская ул., д. 40, кор. 4.