

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Методические рекомендации для  
самостоятельной работы обучающихся по дисциплине**

**Б1.В.ДВ.10.02 ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**

**Направление подготовки 35.03.06 Агроинженерия**

**Профиль образовательной программы «Электрооборудование и электротехнологии»**

**Форма обучения заочная**

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. Организация самостоятельной работы .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Методические рекомендации по самостоятельному изучению вопросов .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Методические рекомендации по подготовке к занятиям .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 Лабораторная работа 1,2 (ЛР 1,2) Переходные электромагнитные процессы в синхронной машине. ....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Лабораторная работа 3 (ЛР 3) Переходные процессы в сети с источником бесконечной мощности. Влияние нагрузки на ток КЗ. ....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 Лабораторная работа 4 (ЛР 4) Переходные электромеханические процессы в ЭЭС. ....</b>	<b>17</b>
<b>3.4 Лабораторная работа 5 (ЛР 5) Определение динамической устойчивости ЭЭС. ....</b>	<b>17</b>
<b>3.5 Лабораторная работа 6 (ЛР 6) Определение статистической устойчивости ЭЭС. Пределы мощности и пределы устойчивости. ....</b>	<b>17</b>

# 1. ОРГАНИЗАЦИЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

## 1.1. Организационно-методические данные дисциплины

№ п.п.	Наименование темы	Общий объем часов по видам самостоятельной работы (из табл. 5.1 РПД)				
		подготовка курсового проекта (работы)	подготовка реферата/эссе	индивидуальные домашние задания (ИДЗ)	самостоятельное изучение вопросов (СИБ)	подготовка к занятиям (ПкЗ)
1	2	3	4	5	6	7
1	Переходные электромагнитные процессы в синхронной машине	-	-	-	30	8
2	Расчет переходных процессов	-	-	-	56	
3	Устойчивость электроэнергетических систем.	-	-	-	28	8
4	Переходные процессы в узлах нагрузки	-	-	-	51	

## 2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОМУ ИЗУЧЕНИЮ ВОПРОСОВ

### 2.1 Причины возникновения КЗ.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

**Короткое замыкание** — электрическое соединение двух точек электрической цепи с различными значениями потенциала, не предусмотренное конструкцией устройства и нарушающее его нормальную работу. Короткое замыкание может возникать при нарушении изоляции токоведущих элементов или вследствие механического соприкосновения элементов, работающих без изоляции. Также коротким замыканием называют состояние, когда сопротивление нагрузки меньше внутреннего сопротивления источника питания.

#### **Виды коротких замыканий**

*В трёхфазных электрических сетях различают следующие виды коротких замыканий:*

- Однофазное (замыкание фазы на землю);
- Двухфазное (замыкание двух фаз между собой);
- Двухфазное на землю (2 фазы между собой и одновременно на землю);
- Трёхфазное (3 фазы между собой).

*В электрических машинах возможны короткие замыкания:*

- Межвитковые — замыкание между собой витков обмоток ротора или статора;
- Замыкание обмотки на металлический корпус.

#### **Методы защиты**

*Для защиты от короткого замыкания принимают специальные меры:*

- Ограничивающие ток короткого замыкания:
  - устанавливают токоограничивающие электрические реакторы
  - применяют расщепление электрических цепей т.е. отключение секционных и шиносоединительных выключателей
  - используют понижающие трансформаторы с расщепленной обмоткой низкого напряжения
  - используют отключающее оборудование — быстродействующее коммутационные аппараты с функцией ограничения тока короткого замыкания т.е. плавкие предохранители, автоматические выключатели
- Применяют устройства релейной защиты для отключения поврежденных участков цепи

#### **Причины возникновения коротких замыканий**

Основной причиной возникновения коротких замыканий является **нарушения изоляции электрооборудования.**

Нарушения изоляции вызываются:

1. *Перенапряжениями* (особенно в сетях с изолированными нейтральными),
2. *Прямыми ударами молнии,*
3. *Старением изоляции,*
4. *Механическими повреждениями изоляции, проездом под линиями негабаритных механизмов,*
5. *Неудовлетворительным уходом за оборудованием.*

Часто причиной повреждений в электрической части электроустановок являются *неквалифицированные действия обслуживающего персонала.*

### 2.2 Последствия КЗ

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

*Последствия короткого замыкания* в литературе не описаны. Согласно опыту автора повреждение в этом случае имеет локальный характер и выводит аппаратуру из строя, но не сопровождается разрушением компонентов, за исключением, возможно, батарей и проводников питания.

*Последствиями коротких замыканий* являются резкое увеличение тока в короткозамкнутой цепи и снижение напряжения в отдельных точках системы.

О *последствиях короткого замыкания* всегда нужно помнить и не допускать эксплуатации источника без плавких предохранителей в его электрической цепи. Для профилактики следует чаще проверять состояние изоляции всех токоведущих частей.

Для предупреждения *последствий короткого замыкания* применяется быстродействующая релейная защита, выключатели, плавкие и автоматические предохранители. Автоматическая защита электродвигателей от многофазных замыканий и токов перегрузки обеспечивается с помощью автоматов серии А с встроенным максимальным током расцепителем мгновенного действия.

Для уменьшения *последствий коротких замыканий* необходимо как можно быстрее отключить поврежденный участок, что достигается применением быстродействующих выключателей и релейной защиты с минимальной выдержкой времени. Немаловажную роль играют автоматическое регулирование и форсировка возбуждения генераторов, позволяющие поддерживать напряжение в аварийном режиме на необходимом уровне. Все электрические аппараты и токоведущие части электрических станций должны быть выбраны таким образом, чтобы исключалось их разрушение при прохождении по ним наибольших возможных токов к.

Для устранения *последствия короткого замыкания* между витками индукторов необходимо предусматривать устройство максимальной токовой защиты, автоматически отключающее печи.

Для предупреждения *последствий короткого замыкания* применяется быстродействующая релейная защита, выключатели, плавкие и автоматические предохранители. Автоматическая защита электродвигателей от многофазных замыканий и токов перегрузки обеспечивается с помощью автоматов серии А с встроенным максимальным током расцепителем мгновенного действия.

Таким образом, *последствия короткого замыкания* в какой-либо точке системы могут при определенных условиях распространиться на всю систему и вызвать повреждение в той или другой ее части. Для того чтобы повреждение, вызвавшее короткое замыкание, не получило распространения в системе, необходимо быстро отключить поврежденный элемент. В ряде случаев, исходя из условий устойчивости параллельной работы, требуется отключить короткое замыкание за 0,1 - 0,3 сек. Отключение за такое время осуществляется с помощью релейной защиты.

### **2.3 Уравнения переходного процесса в синхронной машине с учетом влияния демпферных контуров.**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

*Уравнения синхронных машин* принято записывать для системы координат  $d$ ,  $q$ , связанных с обмотками ротора.

*Уравнения синхронной машины* могут быть значительно упрощены путем надлежащей замены переменных. Для этого в уравнения вводится ряд фиктивных токов, напряжений и потокосцеплений, являющихся функциями действительных токов, напряжений и потокосцеплений. Это дает уравнения с новыми переменными, решив которые, можно далее определить действительные электрические величины как функции времени. Такая подстановка могла бы рассматриваться только как чисто математическая операция, и с этой точки зрения ее было бы необходимым физически интерпретировать подставляемые величины.

*Уравнения синхронной машины с демпферными контурами, при сделанном в § 28 допущении в отношении этих контуров, даются выражениями с тем лишь отличием, что из всех уравнений напряжения короткозамкнутых демпферных контуров должны быть оставлены только два - одно для продольного и другое для поперечного эквивалентных демпферных контуров.*

*Уравнения синхронных машин принято записывать для системы координат  $d, q$ , связанной с обмотками ротора.*

*Чтобы уравнения синхронной машины записать в относительных единицах, необходимо все составляющие уравнений разделить на базисные величины.*

*Аналитические исследования уравнений синхронной машины будут упрощены, если эти уравнения записать в системе относительных единиц.*

## **2.4 Виды КЗ. Схемы замещения нулевой последовательности трехфазных воздушных линий электропередачи и кабелей**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

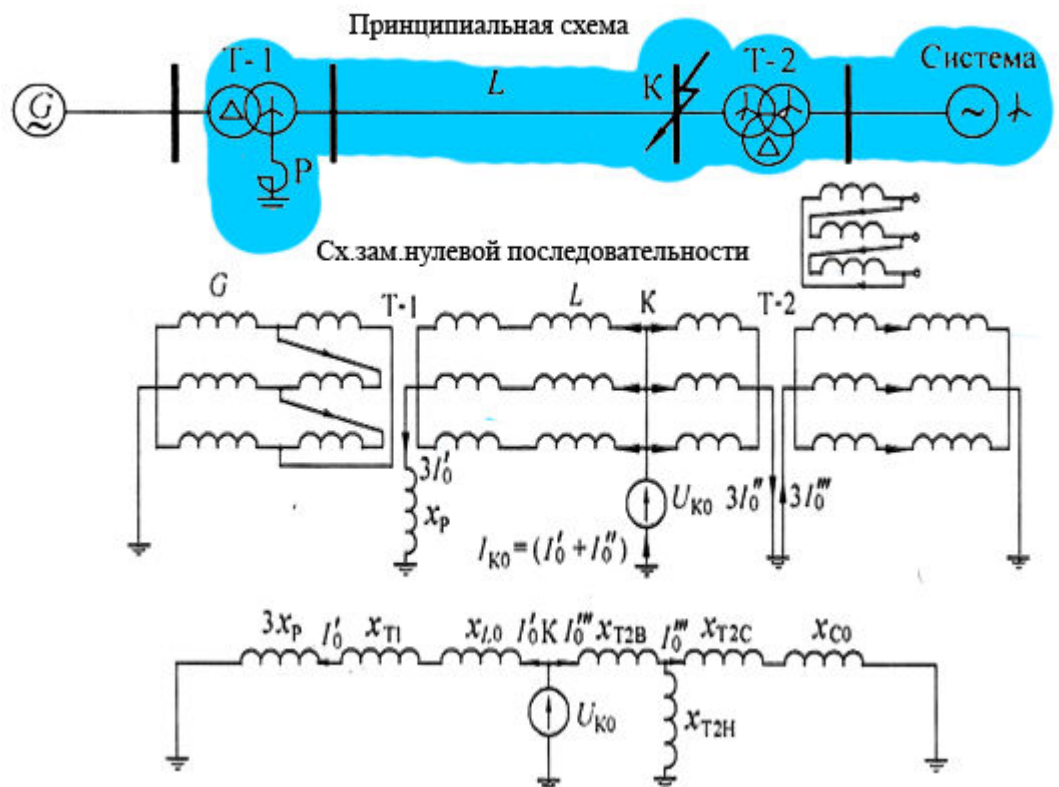
### **Виды коротких замыканий**

*В трёхфазных электрических сетях различают следующие виды коротких замыканий:*

- Однофазное (замыкание фазы на землю);
- Двухфазное (замыкание двух фаз между собой);
- Двухфазное на землю (2 фазы между собой и одновременно на землю);
- Трёхфазное (3 фазы между собой).

*В электрических машинах возможны короткие замыкания:*

- Межвитковые — замыкание между собой витков обмоток ротора или статора;
- Замыкание обмотки на металлический корпус.
- Схема замещения нулевой последовательности по конфигурации сильно отличается от других схем. Существуют значительные отличия и в величинах сопротивлений.
- Прежде всего, в месте КЗ напряжение равно напряжению нулевой последовательности.



•  
• Как видно из рисунка, схема замещения своим началом имеет точку КЗ, а ограничивается она путями протекания токов нулевой последовательности. Как уже отмечалось, симметричная система токов нулевой последовательности существенно отличается от прямой и обратной. Она представляет собой систему трех переменных токов, совпадающих по фазе и имеющих одинаковую амплитуду. Эти токи являются, по существу, разветвлением однофазного переменного тока, для которого три провода трехфазной цепи составляют один прямой провод, а обратным служит земля или четвертый (нулевой) провод.

## 2.5 Преобразование исходных схем замещения в эквивалентные результирующие

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Для определения *результатирующего сопротивления* от генераторов до точки короткого замыкания производят преобразование схем замещения в эквивалентные, в которых вся схема замещения заменяется одним результирующим сопротивлением, равным  $X_{рез}$ .

Для определения *результатирующего сопротивления* производим ряд последовательных преобразований схемы.

Для подсчета *результатирующего сопротивления* схемы замещения, аналогичной схеме, нужно: а) просуммировать активные и индуктивные сопротивления каждой генераторной ветви; б) вычислить эквивалентные активные и индуктивные сопротивления всех генераторных (параллельных) ветвей и сложить эти сопротивления с соответствующими сопротивлениями короткозамкнутой ветви.

$Z$  являются *результатирующими сопротивлениями* схем замещения прямой и нулевой последовательности относительно точки аварии.

Таким образом, *результатирующее сопротивление* равно сумме термического сопротивления изоляции  $R$ .

В режиме считывания *результатирующее сопротивление* этих диодов, определяемое начальным участком их вольт-амперных характеристик, значительно меньше входного

сопротивления каскада на Т4, что позволяет получить высокий коэффициент передачи сигнала.

## 2.6 Определение периодической составляющей тока КЗ методом спрямленных характеристик для установившегося режима.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Определение периодической составляющей тока короткого замыкания от мощных генераторов

Параметры отечественных мощных генераторов существенно отличны от параметров генераторов малой и средней мощности.

Использование расчетных кривых для мощных машин приводит к значительным погрешностям.

На основе упрощенных уравнений Парка - Горева для синхронной машины с использованием ЭВМ получены кривые изменений периодических составляющих тока к. з. мощных турбо- и гидрогенераторов. Расчеты проведены для следующих исходных условий:

1. Генератор до к. з. работал с номинальной нагрузкой; нагрузка подключена на стороне высшего напряжения трансформатора блока

Схема к определению токов короткого замыкания от мощных генераторов.



2. В качестве основной принята вентильная независимая система возбуждения с постоянной  $T_e = 0$ . Расчеты выполнены также для электромашиного возбудителя (резервное возбуждение) с  $T_e = 0.25$  с. Потолочное возбуждение принято для турбогенераторов  $2U_{\text{н}}$ , для гидрогенераторов  $1.8U_{\text{н}}$ .

3. Короткое замыкание рассмотрено на выводах генератора и за трансформатором блока

Кривые, представленные на рис. 38-18 - 38-20, дают зависимость

$$\gamma_t = \frac{I_{\text{пт}}}{I^*} = f(t).$$

где  $I_{\text{пт}}$  - периодическая составляющая тока к. з. в момент  $t$ ;  $I^*$  - периодический (сверхпереходный) ток в момент  $t=0$ .

Для определения тока  $I_{\text{пт}}$  в килоамперах необходимо вначале вычислить сверхпереходный ток  $I^*$ . При к. з. на выводах

$$I^* = \frac{E'}{x_d} I_{\text{н.г.}}, \text{ кА},$$

при к. з. за трансформатором блока

$$I^* = \frac{E'}{x_d + x_T} I_{\text{н.г.}}, \text{ кА},$$

где  $E'$  - сверхпереходная э. д. с. генератора, о. е.;  $I_{\text{н.г.}}$  - номинальный ток генератора, кА;  $I_{\text{н.г.}}$  - то же, но приведенный к ступени высшего напряжения ВН

трансформатора, кА;  $x_d''$  - сверхпереходное индуктивное сопротивление генератора, о. е.;  $x_T$  - индуктивное сопротивление трансформатора, приведенное к номинальной мощности генератора, о. е.

Искомый периодический ток равен

$$I_{\text{п}} = \gamma I''.$$

Здесь  $\gamma$  определяется по кривым рис. 38-18-38-20 для заданного момента  $t$ .

## 2.7 Метод расчетных кривых

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

*Метод расчетных кривых* не позволяет с приемлемой точностью определить токи, необходимые для выбора высоковольтных выключателей, особенно при современных крупных генераторах.

*Метод расчетных кривых* основан на применении специальных расчетных кривых изменения токов к.

*Метод расчетных кривых* применяют при проверке аппаратов и токоведущих частей по условиям к.

*Метод расчетных кривых* применяют при проверке аппаратов и проводников по условиям к.

Суть *метода расчетных кривых* состоит в том, что для одиночного генератора, работающего в предшествующем режиме с номинальной нагрузкой, периодическая составляющая тока короткого замыкания однозначно определяется электрической удаленностью генератора от места повреждения.

Распространение *метода расчетных кривых* на сложные схемы с большим числом генераторов по существу соответствует допущению, что все участвующие в схеме генераторы могут быть заменены одним генератором суммарной номинальной мощности, поставленным в некоторые средние условия по отношению к точке короткого замыкания. Ошибка от такой замены зависит от того, в какой мере реальные условия отдельных генераторов отличаются от указанных средних. На этом вопросе ниже остановимся более подробно, а сейчас проследим порядок выполнения расчета при замене всех генераторов одним генератором суммарной мощности или, как говорят, по общему изменению.

## 2.8 Учет влияния электропередачи или вставки постоянного тока на ток КЗ в объединенных системах переменного тока

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Влияние электропередачи постоянного тока (ЭПТ) или вставки постоянного тока на ток КЗ в сети переменного тока в наибольшей мере проявляется на начальной стадии переходного процесса, как показано на рис. 5.17. При КЗ на стороне выпрямителя и при КЗ на стороне инвертора ЭПТ уменьшает ток КЗ, так как и выпрямительная, и инверторная установки потребляют реактивную мощность из примыкающих систем переменного тока.

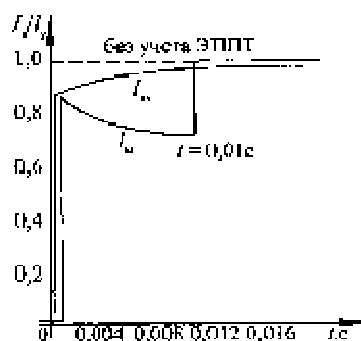


Рис. 5.17. Изменение огибающих периодических токов в месте повреждения:

**$I_{kv}$ -при трехфазном КЗ на линии переменного тока сети выпрямителя;**

**$I_{ki}$ - при трехфазном КЗ на линии переменного тока сети инвертора**

Короткое замыкание в сети переменного тока на стороне выпрямительной установки вызывает разгрузку ЭППТ по току, поэтому влияние последней на ток КЗ с течением времени ослабевает. Как видно по изменению огибающей по амплитудам периодической составляющей тока  $I_{kv}$ , в момент наступления амплитудного значения этой составляющей (при  $t = 0,01$  с) влиянием ЭППТ уже можно пренебречь.

Таким образом, мостовые выпрямители не подпитывают ток место повреждения в сети переменного тока. Поэтому их не следует учитывать при выборе и проверке коммутационной аппаратуры по условиям КЗ.

Короткое замыкание в сети переменного тока на стороне инверторной установки вызывает перегрузку ЭППТ по току, поэтому ее влияние на ток КЗ с течением времени усиливается, ток  $I_{ki}$  в месте повреждения уменьшается. Однако к моменту наступления амплитудного значения этого тока, а более вероятно (при близких КЗ) - еще раньше, инверторные мосты опрокидываются и уже не оказывают влияния на режим сети.

Таким образом, мостовые инверторы ЭППТ, так же как и мостовые выпрямители, не подпитывают ток место повреждения и их не следует учитывать при выборе и проверке коммутационной аппаратуры сети переменного тока по условиям КЗ.

## **2.9 Параметры элементов электроустановок постоянного тока, необходимые для расчета переходных процессов.**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Элементы электроустановок — трансформаторы, генераторы, электродвигатели, аппараты, провода, кабели, шины и т.п. — должны выбираться такой мощности или с такой длительно допустимой нагрузкой (такого сечения), которые необходимы, чтобы предотвратить чрезмерный их нагрев в условиях нормальной эксплуатации. В послеаварийных режимах допускаются перегрузки, приводящие лишь к ускорению старения изоляции, но не угрожающие ее разрушением или расстройством работы установки.

В проектах электроустановок с электроприемниками, характеристики которых могут ухудшать качество электроэнергии в питающей их сети (электродвигатели, работающие в повторно-кратковременном, перемежающемся режимах, сварочные аппараты, дуговые электропечи и т.п.), а также с электроприемниками, получающими электроэнергию от вентильных преобразователей, должны предусматриваться меры для поддержания качества электроэнергии, установленного ГОСТом на нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения.

В случаях, когда от рассматриваемой сети питаются только указанные электроприемники, должно быть обеспечено качество электроэнергии, необходимое для их нормальной работы, а качество электроэнергии, соответствующее ГОСТу, должно быть обеспечено в точках связи рассматриваемой сети с сетью общего назначения.

На чертежах планов и разрезов помещений и наружных установок должны быть обозначены границы взрывоопасных и пожароопасных зон, класс помещения по условиям среды в соответствии с требованиями ПУЭ, категория и группа взрывоопасных смесей, могущих образоваться в этих помещениях, а также, по возможности, наименование взрывоопасных или пожароопасных газов и паров.

## **2.10 Силы в трехфазной линии при двухфазном коротком замыкании**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

При *двухфазном коротком замыкании* электродинамические силы получаются большими, чем при трехфазном, если предположить, что ударный ток в обоих случаях одинаков.

При *двухфазном коротком замыкании* на линии или в сети 6 кВ собственных нужд понижается напряжение между поврежденными фазами, вследствие чего нарушается симметрия линейных напряжений и на выходе фильтра реле РНФ-1М появляется напряжение обратной последовательности. Якорь последнего отпадает и замыкает контакты в цепи катушки промежуточного реле 13РП, которое подает 1 на контакты токовых реле.

При *двухфазном коротком замыкании* действует один канал напряжения и все три канала тока.

При *двухфазных коротких замыканиях* ток появляется только в двух поврежденных фазах и соответственно в реле, подключенных к трансформаторам тока поврежденных фаз.

При *двухфазных коротких замыканиях* ток в реле зависит от того, какие фазы повреждены.

При *двухфазных коротких замыканиях* на землю реле работает так же, как и при чистых двухфазных замыканиях.

При *двухфазном коротком замыкании* электродинамические силы получаются большими, чем при трехфазном, если предположить, что ударный ток в обоих случаях одинаков.

При *трехфазных и двухфазных коротких замыканиях* между фазами Л и С обтекаются током и действуют оба реле, а при двухфазных коротких замыканиях между фазами АВ и ВС обтекается током и действует одно реле.

При *трехфазных и двухфазных коротких замыканиях* и протекании симметричного тока нагрузки защита не работает, так как сумма токов трех фаз равна нулю; при однофазных же коротких замыканиях ток протекает только по одной фазе и сумма токов трех фаз равна току в поврежденной фазе, от которого реле срабатывает.

## **2.11 Токоограничивающие устройство со сверхпроводниками**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Применение токоограничивающих устройств в электронных сетях. Повышение токов недлинного замыкания (КЗ, сопровождающееся повышением электродинамических и термических воздействий на оборудование, приводит к росту повреждений обмоток генераторов, синхронных компенсаторов, трансформаторов, реакторов и других электронных аппаратов. Сверхнормативные токи КЗ могут повреждать выключатели, обеспечивающие локализацию и ликвидацию аварийных ситуаций в системе, что приводит к повышению масштабов последствий КЗ, в том числе за счёт появления пожаров на энергообъектах. Обозначенные происшествия понижают надежность работы электроэнергетических систем. Наибольший уровень токов недлинного замыкания, определяющий требования к электронным аппаратам и оборудованию, становится критичным параметром и ограничивающим фактором развития электронных систем. Величина наибольшего уровня тока КЗ – это технико-экономический параметр, определяющий необходимость ограничения тока КЗ либо подмену оборудования на новое (если это может быть), способное выдержать увеличенные значения токов КЗ. Беря во внимание, что 2-ой путь является высокзатратным, главные способы решения трудности связаны с применением методов и мероприятий по ограничению уровней токов КЗ. В настоящее время в сетях промышленных компаний, электростанций и подстанций напряжением до 35 кВ ограничение токов КЗ достигается, в основном, за счёт внедрения токоограничивающих реакторов и трансформаторов с расщепленными обмотками. В сетях напряжением выше 35 кВ основными являются схемно-технические решения, обеспечивающие секционирование сети и компанию автоматического деления сети при аварийных ситуациях. Но все эти решения приводят к понижению надежности электроснабжения потребителей, повышению утрат в системе, понижению свойства напряжения на его шинах, потому что ограничение токов КЗ достигается за счёт роста

суммарного реактанса сети. Трудности ограничения токов КЗ является очень животрепещущей для всех государств мира. Решением этой задачи занимаются фактически все большие электротехнические компании, международные научные организации, такие как СИГРЭ и IEEE, научно-исследовательские центры и Университеты в почти всех странах, в том числе и в РФ. В особенности остро неувязка проявляется в сетях напряжением 110-220 кВ. Об актуальности препятствия не один раз заявляли представители Мосэнерго, Ленэнерго, ФСК ЕЭС и её структурные подразделения. Возникновения новых технологий и материалов, связанных с преобразовательной техникой и явлением сверхпроводимости, резвые прогресс в элементной базе силовой электроники и высокотемпературных сверхпроводников материалах (ВТСП) дают возможность сотворения токоограничивающих устройств последнего поколения, владеющих качествами, которые позволят открыть дорогу к обильному применению этих устройств в электроэнергетике. Эти характеристики могут быть сформулированы в виде общих технических требований к токоограничителям (ТО), в согласовании с которыми ТО должны - обеспечивать ограничение значений ударного и установившегося токов КЗ до допустимого (данного) уровня; - иметь быстродействие не ниже 2-3 мс; - не оказывать существенного воздействия на обычный режим работы сети, сначала на уровень напряжений; - не вносить существенных нелинейных искажений в характеристики режима сети, в особенности при обычном режиме ее работы; - иметь автоматическое срабатывание и восстановление после устранения тока КЗ; - иметь постоянные свойства при изменении схемы сети; - не оказывать отрицательного воздействия на функционирование других частей сети и систем защиты (к примеру, на пуск движков, работу АПВ и т.д.). Сразу с реализацией функции токоограничения новые устройства могут обеспечить быстродействующее отключение тока (за время наименее полупериода частоты питающей сети).

### **2.12 Токоограничивающие устройства трансформаторного типа**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Основной элемент ТОУ - трансформатор последовательного выключения. В обмотку НН включено нелинейное сопротивление. При  $I_K$  и разомкнутой вторичной обмотки магнитопровод трансформатора ненасыщен.

В схеме 1 токоограничение производится размыканием вторичной обмотки Т ограничителем ударного тока (ОТ) или другим безинерционным аппаратом. В схеме 2 - тиристорным коммутатором. В схеме 3 - вторичная обмотка замкнута на емкостное сопротивление. Это позволяет компенсировать падение напряжения в первичной цепи ТОУ. Тиристорный коммутатор позволяет регулировать входное сопротивление ТОУ, а ОТ размыкает вторичную обмотку при КЗ в первичной цепи. В схеме 4 аналогичные назначения имеют конденсаторная батарея и тиристорный коммутатор. Ограничение  $I_K$  достигается шунтированием вторичной обмотки.

В схеме 5 во вторичную обмотку включен вторичный трансформатор ТР. Он играет роль регулировочного трансформатора. Реактор  $L$  нормально шунтирован выключателем. При КЗ во внешней цепи отключается выключатель В1. Если необходимо, то отключается В2. В схеме 6 трансформатор ТЗ является разделительным. Выключатель В1 нормально включен. При КЗ во внешней цепи В1 отключается. Если необходимо, то отключается В2.

### **2.13 Токоограничивающие устройства реактно-вентильного типа.**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

В настоящее время ведутся работы по созданию новых типов токоограничивающих устройств для систем электроснабжения промышленных предприятий. К ним относятся тиристорные то-коограничивающие выключатели, реакторно-вентильные и резонансные *токоограничивающие устройства*. Значительная потеря напряжения в нормальном режиме работы цепи не позволяет устанавливать индивидуальные и групповые реакторы

большого сопротивления. Поэтому для случаев, когда требуются значительные ограничения тока КЗ, разрабатывают специальные более сложные устройства, так называемые БТУ - безынерционные *токоограничивающие устройства*. Другим достоинством данного способа токоограничения является то, что благодаря демпфирующему резистору, обтекаемому при коротких замыканиях током цепи, происходит изменение фазы тока короткого замыкания, что благотворно сказывается на режиме отключения цепи. Как правило, коэффициент мощности цепи при коротком замыкании в достаточно мощной энергосистеме не превышает 0,1 либо, в крайнем случае, 0,2, а здесь при наличии резонансного *токоограничивающего устройства* этот коэффициент повышается до 0,4 и даже до 0,5, что приводит к несколько неожиданному результату, а именно: столь заметное облегчение условий коммутации цепи, обусловленное повышением ее коэффициента мощности, может сказаться даже в большей степени, чем создаваемый этой установкой эффект токоограничения, ради которого она вообще разрабатывалась. Токоограничивающее устройство (ТОУ) - это устройство, включаемое последовательно в цепь. Его сопротивление при рабочем токе и токе перегрузки мало, а при КЗ значительно. *Токоограничивающее устройство* должно ограничивать первую полуволну тока до уровня, соответствующего электродинамической стойкости установленного оборудования, а также последующий ток до уровня, не превышающего номинальный ток отключения выключателей, установленных в сети. В большинстве случаев ТОУ не является отключающим устройством.

#### 2.14 Расчет переходного восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя при отключении КЗ в трех фазных эффективно заземленных сетях.

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Кривая восстанавливающегося напряжения, появляющегося на контактах выключателя сразу после погасания в нем дуги, может быть одночастотной или многочастотной. Вообще говоря, так называемая одночастотная кривая также является многочастотной, по крайней мере двухчастотной, поскольку кроме собственной частоты сети в ней присутствует частота 50 Гц. Однако частота восстанавливающегося напряжения сети по крайней мере на порядок выше рабочей частоты, так что в очень короткие рассматриваемые промежутки времени процессы, происходящие с частотой 50 Гц, по отношению к высокочастотным колебательным процессам могут рассматриваться как неизменные.

Процесс восстановления напряжения при одночастотной кривой характеризуется следующими показателями: частотой восстанавливающегося напряжения  $f_v$ ; скоростью повышения восстанавливающегося напряжения коэффициентом превышения амплитуды  $U_{Bm}/U_{B0\text{врт}} = K_a$ , т.е. отношением наибольшей амплитуды восстанавливающегося напряжения к наибольшей амплитуде возвращающегося напряжения промышленной частоты.

Частота восстанавливающегося напряжения наряду со скоростью его повышения служит в стандартах всех стран, в том числе и в ГОСТ, для характеристики успешности процесса отключения коротких замыканий в различных точках сети. На рис. 4-17 показан способ приведения величин к одночастотному контуру при отключении удаленного короткого замыкания не дальше 5

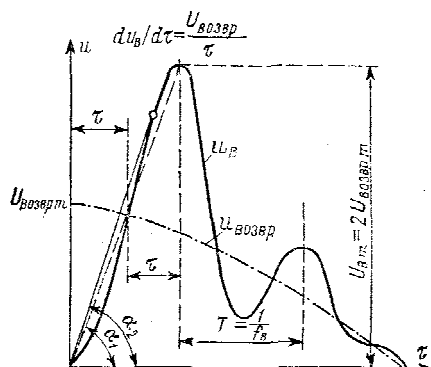
Здесь  $U_{B0\text{вр т}}$  — возвращающееся напряжение, т. е. напряжение рабочей частоты, появляющееся на контактах выключателя после окончательного гашения дуги;

$$K_a = \frac{U_{Bm}}{U_{B0\text{врт м}}} = \frac{du_B/d\tau}{U_{B0\text{врт м}}} 2\tau =$$

$$= \frac{du_B/d\tau}{2f_v U_{B0\text{врт м}}}; \quad (4-17)$$

$$f_v = \frac{du_B/d\tau}{2K_a U_{B0\text{врт м}}}; \quad (4-18)$$

$$\frac{du_B}{d\tau} = 2K_a f_v U_{B0\text{врт м}}. \quad (4-19)$$



Из рис. 4-17 можно установить, что средняя скорость восстановления напряжения (в В/мкс)

$$\frac{du_B}{d\tau} = 2 \cdot 2f_B \cdot 1,5 \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 4,9f_B U.$$

а максимальная

$$\left| \frac{du_B}{d\tau} \right|_{\text{ср}} = \text{tg } \alpha_1 = 4f_B U_{\text{возвр}} m \cdot 10^{-6},$$

Обычно считают, что

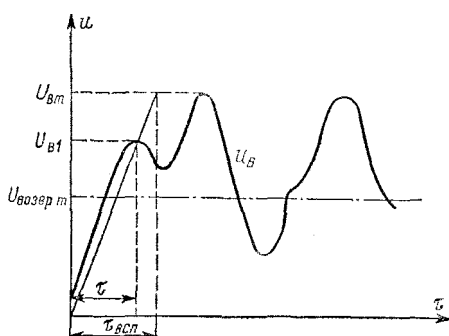
$$\left| \frac{du_B}{d\tau} \right|_{\text{макс}} = \text{tg } \alpha_2.$$

В тех случаях когда форма кривой восстанавливающегося напряжения отклоняется от синусоидальной, рекомендуется замещать многочастотную несинусоидальную кривую одночастотной, как показано на рис. 4-18, используя вспомогательный коэффициент твсп =  $\frac{27}{7\lambda}$ , где  $7\lambda$  — период одночастотной кривой. Если принять для упрощения, что размыкаемый контур состоит из сосредоточенных постоянных R, L и C (рис. 4-19), то для одночастотного восстанавливающегося напряжения можно написать следующее выражение:

$$u_B = U_{\text{воавр}} \sqrt{2} (1 - e^{-\delta/\tau} \cos \omega_B \tau),$$

где  $U_{\text{воавр}}$  — действующее значение рабочего напряжения;  $\delta = Rj(2L)$  — декремент затухания контура;  $\omega_B = 1/\sqrt{LC}$  —  $2\pi f_B$  — угловая частота контура.

$$f_B = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$



Отсюда собственная частота

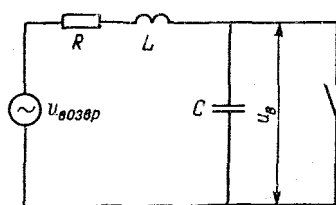


Рис. 4-19. Простейший колебательный контур после отключения(4-24).

Рис. 4-18. Определение параметров многочастотной кривой восстанавливающегося напряжения.

Если пренебречь затуханием тока и падением напряжения в стволе дуги, то наибольшее значение восстанавливающегося.

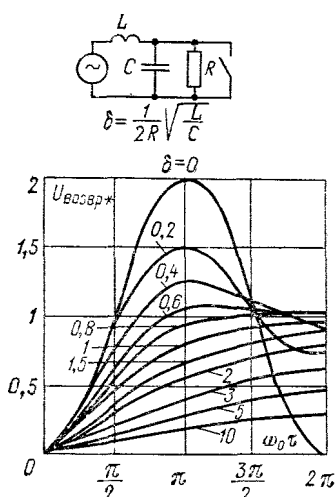


Рис. 4-20. Влияние активной нагрузки на возвращающееся напряжение определится выражением

$$U_{вм} = 2U_{возвр} \sqrt{2} = 2U_{возвр} m, \quad (4-25)$$

а крутизна кривой напряжения

$$du_B/d\tau = 4f_B U_{возвр} m. \quad (4-26)$$

Выражения (4-25) и (4-26) являются приближенными и несколько завышающими действительные значения восстанавливающегося напряжения, так как в реальных сетях эти напряжения, как правило, являются многочастотными, индуктивность и емкость — распределенными, а к отключаемому контуру обычно присоединены параллельные ответвления и емкость его возрастает.

Емкость сети уменьшает не только собственную частоту, но и коэффициент превышения амплитуды  $K_a$ , так как чем больше эта емкость, тем больше демпфирующее действие сети и тем ниже кривая восстанавливающегося напряжения.

Не меньшее влияние на коэффициент превышения амплитуды оказывает активная нагрузка сети, которая увеличивает затухание контура и, следовательно, также демпфирует восстанавливающееся напряжение, уменьшая его амплитуду и крутизну. На

рис. 4-20 показано действие активной нагрузки сети на амплитуду и крутизну восстанавливающегося напряжения.

### **2.15 Проверка гибких проводников линий электропередачи и распределительных устройств на возможность их опасного сближения и схлестывания при коротких замыканиях.**

При изучении вопроса необходимо обратить внимание на следующие особенности.

Воздушные линии электропередачи, находящиеся в эксплуатации, подвергаются периодическим проверкам и испытаниям после капитального ремонта и в межремонтный период.

Капитальные ремонты воздушных линий производятся в сроки, устанавливаемые системой ППР, а также по указаниям, приведенным в п.п. *контроль изоляторов, контроль соединений проводов и определение степени загнивания деталей деревянных опор* (ниже).

Объем проверок и испытаний, предусмотренных ПЭЭП, включает следующие работы

1. Проверка габаритов и регулировки проводов и тросов.
2. Контроль изоляторов.
3. Контроль соединений проводов.
4. Измерение сопротивления заземления опор и тросов, а также повторных заземлений нулевого провода.
5. Проверка правильности установки опор.
6. Внешние измерения.
7. Проверка тяжения в оттяжках опор.
8. Определение степени загнивания деталей деревянных опор.
9. Проверка срабатывания защиты линии до 1000В с заземленной нейтралью.

#### **Проверка габаритов и разрегулировки проводов и тросов.**

Проводится в межремонтный период.

Измерение стрел провеса проводов и тросов, расстояний между проводами и габаритов до земли и пересекаемых объектов производится по мере необходимости при подозрении о несоблюдении нормативных значений.

Фактическая стрела провеса проводов и тросов не должна отличаться от проектной величины более чем на  $\pm 5\%$  при условии соблюдения габаритов до земли и пересекаемых объектов.

Разрегулировка проводов любой фазы по отношению к другой фазе (на линиях с совместной подвеской - между проводами различных линий), а также разрегулировка тросов допускается не более чем на 10% проектного значения стрелы провеса провода (троса).

### **3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОДГОТОВКЕ К ЗАНЯТИЯМ**

**3.1 Лабораторная работа 1,2 (ЛР 1,2)** Переходные электромагнитные процессы в синхронной машине

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

1. Подготовить лабораторную работу.
2. Подготовить отчет.
3. Ответить на контрольные вопросы.

**3.2 Лабораторная работа 3 (ЛР 3)** Переходные процессы в сети с источником бесконечной мощности. Влияние нагрузки на ток КЗ.

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

1. Подготовить лабораторную работу.
2. Подготовить отчет.
3. Ответить на контрольные вопросы.

**3.3 Лабораторная работа 4 (ЛР 4)** Переходные электромеханические процессы в ЭЭС.

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

1. Подготовить лабораторную работу.
2. Подготовить отчет.
3. Ответить на контрольные вопросы.

**3.4 Лабораторная работа 5 (ЛР 5)** Определение динамической устойчивости ЭЭС.

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

1. Подготовить лабораторную работу.
2. Подготовить отчет.
3. Ответить на контрольные вопросы.

**3.5 Лабораторная работа 6 (ЛР 6)** Определение статистической устойчивости ЭЭС. Пределы мощности и пределы устойчивости.

При подготовки к занятию необходимо обратить внимание на следующие моменты.

1. Подготовить лабораторную работу.
2. Подготовить отчет.
3. Ответить на контрольные вопросы.