

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Программа, методические указания
и контрольные задания
Для студентов заочного факультета,
обучающихся в сокращенные сроки
(7 семестр)

Казань 2009

5. Содержание лабораторных работ

Лабораторная работа 1. «Регистрация и отображение тока трехфазного короткого замыкания» (4 часа).

6. Литература

Основная

1. Крючков И.П. Переходные процессы в электроэнергетических системах. Учебник для вузов / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. – М: Издательский дом МЭИ, 2008. – 472 с.
2. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 283 с.

Дополнительная

3. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: Учебное пособие / И.П. Крючков, Б.Н. Неклепаев и др. – 2-е изд. – М.: ИЦ АКАДЕМИЯ, 2006. – 416 с.
4. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд. НЦ ЭНАС, 2004. – 152 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ «ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» (7 СЕМЕСТР)

Программа дисциплины состоит из введения и семи разделов. Ниже по каждому разделу приводятся ссылки на литературу с указанием глав, параграфов и страниц учебника, в которых излагается данная тема. Номер учебника, указанный в квадратных скобках, соответствует его номеру в списке литературы.

Приводятся вопросы для самопроверки, на которые следует отвечать после изучения каждой темы. Если при ответе на вопросы возникают затруднения, необходимо вернуться к изучению данного вопроса по литературным источникам.

Для самоконтроля усвоения материала темы приводится перечень знаний и умений, которыми должен владеть студент после теоретического изучения материала, проработки вопросов.

ВВЕДЕНИЕ

Литература: [1], Введение, с. 5–7; [2], Введение, с.5–9.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое переходные процессы?
2. Какие переходные процессы бывают в электрических системах?
3. Чем характеризуются электромагнитные переходные процессы?
4. Чем характеризуются электромеханические переходные процессы?

Должен знать: основные особенности электромагнитных переходных процессах; допущения, принимаемые при исследовании переходных процессов; назначение расчетов.

Должен уметь: определять причины и источники возникновения переходных процессов; представлять последствия переходных процессов для электрической системы.

РАЗДЕЛ 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ: МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Литература: [1], с. 12–49; [2], с. 22–36.

Вопросы для самопроверки

1. Каковы причины возникновения и последствия переходных процессов?
2. Какие допущения принимаются при исследовании переходных процессов?
3. Перечислите основные виды коротких замыканий.
4. Что такое система относительных единиц и система именованных единиц?
5. Для чего необходимы схемы замещения основных элементов электрической системы?
6. В чем особенность математической модели синхронной машины?

4. При выполнении заданий ход решения нужно комментировать пояснениями: какие применяются формулы или уравнения. Все необходимые расчеты должны быть выполнены полностью.

5. Работы, не отвечающие всем перечисленным требованиям, проверяться не будут и будут возвращаться для переделки.

Если проверяющий преподаватель предлагает внести в решения те или иные исправления или дополнения и прислать их для повторной проверки, то это следует сделать в короткий срок. Рекомендуется при выполнении контрольного задания оставлять в конце тетради несколько чистых листов для всех дополнений и исправлений в соответствии с указаниями преподавателя. Вносить изменения в первоначальный текст задания после его проверки запрещается. К заданию, высылаемого на повторную проверку (если оно выполнено в другой тетради), должно обязательно прилагаться незачетное задание.

На экзамене необходимо представить зачетное по данной дисциплине контрольное задание, в котором все отмеченные преподавателем погрешности должны быть исправлены.

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При проектировании электрических систем расчет токов КЗ проводят в объеме, необходимом для выбора (проверки) электрических аппаратов, токоведущих частей и изоляторов всех напряжений в аварийном режиме и для решения вопросов об их ограничении при выборе схем электрических соединений. Для проверки электрических аппаратов и проводников на термическую и электродинамическую стойкости при КЗ следует найти в рассматриваемом присоединении начальное значение периодической составляющей тока $I_{\text{п0}}$ и ударный ток $i_{\text{уд}}$. Для выбора выключателей по отключающей способности требуется найти периодическую $I_{\text{пт}}$ и аperiodическую $i_{\text{ат}}$ составляющие тока КЗ к моменту t размыкания дугогасительных контактов выключателя (для современных выключателей $t \leq 0,2$ с [1,2,3,4]).

Расчет токов КЗ для выбора аппаратов не требует большой точности, поэтому при его выполнении обычно принимают ряд допущений и не учитывают [1,2]:

- активные сопротивления элементов системы (исключение составляют кабельные линии, у них активное сопротивление превышает индуктивное);
- сдвиг по фазе ЭДС источников питания (ИП);

- насыщение магнитных систем электрических машин, ток намагничивания трансформаторов (его принимают равным нулю);

- емкостные токи воздушных линий напряжением ниже 330 кВ и кабельных линий до 110 кВ включительно.

Прежде чем приступить к расчету токов КЗ, необходимо выбрать расчетные условия КЗ, то есть составить расчетную схему, наметить места расположения точек КЗ, найти расчетное время протекания тока КЗ через данный проводник или аппарат, выбрать расчетный вид КЗ.

Согласно ПУЭ [3] для проверки аппаратов и проводников на термическую и электродинамическую стойкости и для выбора выключателей по отключающей способности расчетным видом является трехфазное КЗ.

Расчет токов при трехфазном КЗ выполняют в следующем порядке:

а) для рассматриваемой электрической установки составляют расчетную схему;

б) по расчетной схеме составляют электрическую схему замещения;

в) определяют параметры схемы замещения и путем постепенных преобразований приводят ее к наиболее простому виду так, чтобы источник питания или группа источников были связаны с точкой КЗ одним результирующим сопротивлением;

г) по закону Ома определяют начальное значение периодической составляющей тока КЗ $I_{\text{п0}}$;

д) определяют ударный ток $i_{\text{уд}}$;

е) определяют значение аperiodической составляющей тока КЗ $i_{\text{ат}}$;

ж) по методу типовых кривых определяют значение $I_{\text{пт}}$ для моментов времени до 0,5 с [1, 2, 3, 4].

При расчете несимметричных КЗ дополнительно составляют схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА И ВЫБОР РАСЧЕТНОЙ ТОЧКИ КЗ

Расчетная схема – это однолинейная электрическая схема рассматриваемой или проектируемой установки, в которую включены все источники питания и все связи между ними. Расчетная схема установки для расчета токов КЗ должна отражать нормальный режим её работы.

На расчетной схеме сети в однолинейном изображении указываются источники питания (энергосистема, генераторы) и элементы сети (линии электропередачи, трансформаторы, реакторы), связывающие источники питания с точками КЗ.

За расчетное напряжение каждой электрической ступени (при приближенном приведении) принимают средние номинальные напряжения $U_{ср}$, кВ, согласно следующей шкале [3]: 770; 515; 340; 230; 154; 115; 37; 24; 20; 18; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,69; 0,525; 0,40; 0,23; 0,127. Приняв для каждой ступени среднее напряжение, считают, что номинальные напряжения всех элементов, включенных на данной ступени, равны ее среднему значению.

На рис. 1 показан пример расчетной схемы.

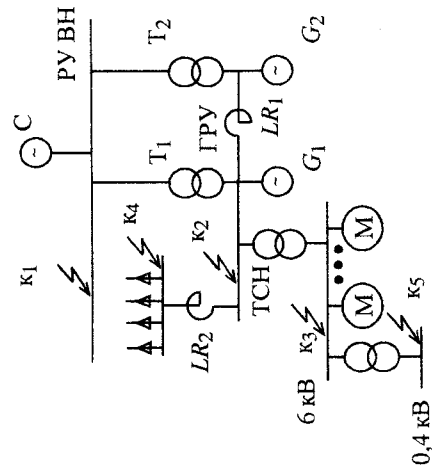


Рис. 1. Расчетная схема электростанции

На расчетной схеме указываются точки КЗ, для которых необходимо найти токи КЗ (точки к1-к5).

Распределительные устройства (РУ) напряжений 35 кВ и выше для упорядочения рекомендуется условно показывать на расчетных схемах одной прямой, не расшифровывая схемы РУ.

Расчетную точку КЗ отмечают для выбора аппаратов и токоведущих частей каждого присоединения. Ее местоположение выбирают так, чтобы через данный аппарат или проводник проходил наибольший возможный ток КЗ. Исключением являются аппараты в цепи реактированных присоединений, которые выбирают по короткому замыканию за реактором. Не следует искусственно усложнять условия, применяя наложение ремонтных режимов, или ориентироваться на временные схемы.

В качестве расчетных точек принимают следующие точки КЗ:

1) на электростанции со сборными шинами генераторного напряжения – на шинах РУ повышенных (ВН или СН) и генераторного напряжения (ГРУ), за реактором на кабельном присоединении, на шинах распределительных подстанций;

2) на электростанции, построенной по блочному принципу – на шинах РУ повышенных напряжений, при наличии выключателя в цепи генератора – на генераторном напряжении, а также на сборных шинах РУ собственных нужд (СН) при питании их от рабочего и от резервного источника питания.

Расчетное время КЗ $t_{расч}$ оценивают в зависимости от цели расчета: для проверки оборудования на электродинамическую стойкость $t_{расч} = 0$ (для тока $I_{д0}$) и $t_{расч} = 0,01с$ (для тока $I_{д}$); для проверки выключателей на отключающую способность $t_{расч} = \tau$ (определяется как сумма минимально возможного времени действия релейной защиты $t_{р.з} = 0,01с$ и собственного времени отключения выключателя $t_{с.в}$); проверка на термическую стойкость требует вычисления импульса квадратичного тока КЗ (интеграла Джоуля) за время отключения $t_{откл}$ равного сумме времени действия основной защиты ближайшего выключателя и полного времени отключения этого выключателя.

Исключение составляют аппараты и проводники присоединений генераторов мощностью 60 МВт и выше, для которых расчетное время $t_{откл}$ учитывают особые требования к надежности этих присоединений, следует принимать равным 4 с (учитывая возможность отказа основных защит и отключение генератора от резервной защиты).

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

После того как расчетная схема и расчетные точки определены, приступают к составлению эквивалентной схемы замещения и находят сопротивление ее элементов. Схема замещения представляет собой ту же расчетную однолинейную схему, в которой все элементы представлены (замещены) своими сопротивлениями (либо индуктивными, либо полными). В большинстве случаев элементы схемы представлены в схеме замещения своими индуктивными сопротивлениями (в случае, когда $R > 1/3X$, производится учет их активного сопротивления, то есть схема замещения представляется полным сопротивлением или комплексным).

Для упрощения расчетов сопротивления элементов схемы выражают в относительных единицах, то есть в долях или процентах от некоторой заданной (базисной) величины.

В эквивалентную схему замещения входят:

- 1) источники энергии (система, синхронные генераторы и компенсаторы, а также мощные синхронные и асинхронные двигатели и обобщенная нагрузка, когда они подключены непосредственно к точке КЗ);
- 2) все элементы электрической цепи, связывающие источники энергии с местом повреждения (трансформаторы, автотрансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы).

Источники энергии представляют в схеме замещения источниками ЭДС с соответствующими сопротивлениями. Магнитная связь обмотки трансформаторов заменяется электрической. Поскольку ток холостого хода (намагничивания) пренебрегают, то двухобмоточный трансформатор представляется одним сопротивлением, трехобмоточные трансформатор или автотрансформатор – тремя сопротивлениями, соединенными в звезду. Трансформаторы с расщеплением обмотки низшего напряжения (НН), двоянные реакторы учитывают трехлучевыми схемами замещения.

Сопротивления всех элементов схемы замещения рекомендуется выражать в относительных единицах при принятых базисных условиях, коэффициенты трансформации трансформаторов принимают равными отношению средних номинальных напряжений, соответствующих принятой в ГОСТ 27514-87 шкале: эти же напряжения принимают за базисные U_B : 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770 кВ.

В схеме замещения все сопротивления обозначают дробью, в числителе указывают порядковый номер элемента, а в знаменателе – величину сопротивления в относительных или именованных единицах.

Параметры элементов (сопротивления) системы электроснабжения рассчитывают по формулам табл. 1.

Таблица 1
Параметры элементов системы электроснабжения при расчетах токов КЗ

Наименование элемента	Выражение сопротивлений	
	В именованных единицах	В относительных единицах
1	2	3
Система	$x_c = \frac{U_{\text{ср. ном}}^2}{S_{\text{КЗ}}}$	$x_c = \frac{S_B}{S_{\text{КЗ}}}$
Синхронный генератор	$x_d = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_d = x_d(\text{НОМ}) \frac{S_B}{S_{\text{НОМ}}}$
Синхронный двигатель	$x_d = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_d = x_d(\text{НОМ}) \frac{S_B}{S_{\text{НОМ}}}$
$t = 0$ Асинхронный двигатель	$x_m = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{k_{\text{п}} S_{\text{НОМ}}}$	$x_m = \frac{S_B}{k_{\text{п}} S_{\text{НОМ}}}$
$t = \infty$	$x_m = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_m = \frac{S_B}{S_{\text{НОМ}}}$
$t = 0$ Обобщенная нагрузка	$x_{\text{нг}} = 0,35 \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_{\text{нг}} = 0,35 \frac{S_B}{S_{\text{НОМ}}}$
	$x_{\text{нг}} = 1,2 \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$	$x_{\text{нг}} = 1,2 \frac{S_B}{S_{\text{НОМ}}}$
Трансформатор двухобмоточный	$x_{\text{т}} = \frac{u_{\text{к}} \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$	$x_{\text{т}} = \frac{u_{\text{к}} \% S_B}{100 S_{\text{НОМ}}}$
	$x_{\text{в}} = \frac{u_{\text{кв}} \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$	$x_{\text{в}} = \frac{u_{\text{кв}} \% S_B}{100 S_{\text{НОМ}}}$
Трехобмоточный трансформатор, Автотрансформатор	$x_{\text{с}} = \frac{u_{\text{кс}} \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$	$x_{\text{с}} = \frac{u_{\text{кс}} \% S_B}{100 S_{\text{НОМ}}}$
	$x_{\text{н}} = \frac{u_{\text{кн}} \% U_{\text{НОМ}}^2}{100 S_{\text{НОМ}}}$	$x_{\text{н}} = \frac{u_{\text{кн}} \% S_B}{100 S_{\text{НОМ}}}$

Окончание табл. 1

1	2	3
Реактор одинарный	$x_p = \frac{x_r \% U_{\text{рном}}}{100 \sqrt{3} I_{\text{рном}}}$	$x_p = \frac{x_r \% I_B U_{\text{рном}}}{100 I_{\text{рном}} U_B}$
Реактор двоярный ($x_{\text{ном}}, k_{\text{св}}$) (сопротивления лучей)	$x_1 = k_{\text{св}} x_{\text{ном}};$ $x_2 = x_3 =$ $= (1 + k_{\text{св}}) x_{\text{ном}}$	$x_1 = k_{\text{св}} x_{\text{ном}} \frac{S_B}{U_{\text{ном}}^2};$ $x_2 = (1 + k_{\text{св}}) x_{\text{ном}} \frac{S_B}{U_{\text{ном}}^2};$ $x_3 = x_3$
Воздушная или кабельная линия	$R = r_{\text{уд}} l$ $x = x_{\text{уд}} l$	$R = r_{\text{уд}} l \frac{S_B}{U_B^2}$ $x = x_{\text{уд}} l \frac{S_B}{U_B^2}$
Трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения	$x_B = \frac{i_{\text{квн}} \% U_{\text{ном}}^2}{100 S_{\text{ном}}} \times$ $\times \left(1 - \frac{k_p}{4}\right)$ $x_{\text{н1}} = \frac{i_{\text{квн}} \% U_{\text{ном}}^2 k_p}{100 S_{\text{ном}} 2};$ $x_{\text{н1}} = x_{\text{н2}};$ $k_p = 4 \left(\frac{i_{\text{квн1}}}{i_{\text{квн}}} - 1 \right) = 3,5$	$x_B = \frac{i_{\text{квн}} \% S_B}{100 S_{\text{ном}}} \left(1 - \frac{k_p}{4}\right)$ $x_{\text{н1}} = \frac{i_{\text{квн}} \% S_B k_p}{100 S_{\text{ном}} 2};$ $x_{\text{н1}} = x_{\text{н2}}$ $k_p = 4 \left(\frac{i_{\text{квн1}}}{i_{\text{квн}}} - 1 \right) = 3,5$

Величина базисной мощности S_B на всех ступенях одна и та же. Обычно задают базисные значения мощности и напряжения, а по ним находят базисный ток I_B , где напряжение выражают в киловольтах (кВ), мощность – в мегавольтамперах (МВА), ток – в килоамперах (кА).

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} U_B} \tag{1}$$

Мощность КЗ в точке замыкания равна:

$$S_{\text{к}} = \sqrt{3} U_{\text{ном}} I_{\text{к}} \tag{2}$$

Для расчета токов КЗ в относительных единицах все сопротивления и ЭДС схемы замещения приводят к базисным условиям (в индексе параметра указывают символ «Б», заключенный в круглые скобки) [1].

Относительные значения ЭДС, напряжения, тока, мощности и сопротивления при базисных условиях можно записать так:

$$E_{(Б)} = E/E_B; U_{(Б)} = U/U_B; I_{(Б)} = I/I_B; S_{(Б)} = S/S_B; x_{(Б)} = x/x_B. \tag{3}$$

Звездочка в выражениях (3) указывает на то, что параметр выражен в относительных единицах.

За основную (базисную) ступень обычно принимают ту, на которой произошло КЗ. Базисное напряжение и ток произвольно выбирают для одной (основной) ступени, а для всех других ступеней приведенные напряжения находят из соотношений [1, 2, 3, 4] (при точном приведении):

$$\begin{cases} U_B = 1/(k_1 k_2 \dots k_n) U_B; \\ I_B = (k_1 k_2 \dots k_n) I_B; \\ \text{или } I_B = S_B / \sqrt{3} U_B, \end{cases} \tag{4}$$

где $k_1 k_2 \dots k_n$ – фактические коэффициенты трансформации между смежными по схеме ступенями напряжения, они определяются в направлении от основной ступени к той ступени, где определяются базисные величины [1].

Если параметры элементов расчетной схемы заданы в относительных единицах, приведенных к номинальным условиям ($S_{\text{ном}}$ и $U_{\text{ном}}$), то для приведения параметров к базисным условиям производят пересчет по формулам [3]:

$$\begin{cases} E_{(Б)} = E_{(\text{ном})} U_{\text{ном}} / U_B; \\ x_B = x_{\text{ном}} I_B U_{\text{ном}} / (U_{\text{ном}} U_B); \\ \text{или} \\ x_B = x_{\text{ном}} S_B U_{\text{ном}}^2 / (S_{\text{ном}} U_B^2) \end{cases} \tag{5}$$

При составлении схемы замещения приходится устранять магнитные связи, приводя все величины к одной ступени напряжения, к основной.

Для приведения используют известные из курса электрических машин соотношения [3] (приведенные величины обозначают кружочком):

$$\left. \begin{aligned} \circ E &= E(k_1 k_2 \dots k_n) \\ \circ U &= U(k_1 k_2 \dots k_n); \\ \circ I &= I / ((k_1 k_2 \dots k_n)); \\ \circ x &= x(k_1 k_2 \dots k_n)^2. \end{aligned} \right\} (6)$$

Здесь коэффициенты трансформации $k_1 k_2 \dots k_n$, также определяются в направлении от основной ступени к той ступени, на которой производится пересчет величин. Это есть точное приведение.

Значения сопротивлений и ЭДС, найденные по формулам табл. 2 и приведенные к основной ступени, указывают на составленной схеме замещения. Каждому элементу схемы присваивают определенный порядковый номер, сохраняемый до конца расчета.

Средние значения сверхпереходных ЭДС и сопротивлений источников приведены в табл. 2.

Таблица 2
Средние значения сверхпереходных ЭДС и сопротивлений [1]

Источники	$E''_{ном}$	$x''_{дном}$
Турбогенератор 100-500 МВт	1,13	0,2
То же до 100 МВт	1,08	0,126
Синхронный компенсатор	1,2	0,2
Синхронный двигатель	1,1	0,2
Асинхронный двигатель	0,9	0,2
Обобщенная нагрузка	0,85	0,25

Для системы неограниченной мощности $E''_{ном} = 1$.

Удельные значения индуктивных сопротивлений на фазу линий можно принимать, исходя из средних значений, указанных в табл. 3.

Таблица 3
Средние удельные (погонные) индуктивные сопротивления воздушных и кабельных линий электропередачи [4]

Тип линии электропередачи	$x_{уд}$, Ом/км
Одноцепная ВЛ 6-220 кВ	0,4
Одноцепная ВЛ 220-330 кВ при расщеплении на 2 провода в фазе	0,32
Одноцепная ВЛ 500 кВ при расщеплении на 3 провода в фазе	0,28
Трехжильный кабель: 6-10 кВ, 35 кВ	0,08
Одножильный маслонаполненный кабель 110 кВ	0,12
	0,18

Активное сопротивление линии находят по выражению:

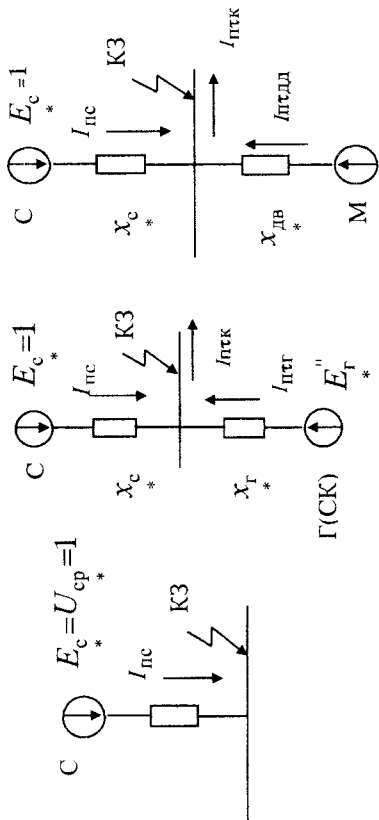
$$R = \frac{l \cdot 1000}{\gamma F}, \quad (7)$$

где l – длина линии, км; F – сечение провода, мм²; γ – удельная проводимость материала токоведущих проводников, м/(Ом·мм²) [для меди $\gamma_m = 58$ м/(Ом·мм²), для алюминия: $\gamma_a = 34,6$ м/(Ом·мм²)].

После того как схема замещения составлена и определены сопротивления всех элементов, она упрощается или свертывается относительно точки КЗ по известным из курса ТОЭ правилам. Упрощение состоит в том, что точки приложения ЭДС объединяются и ЭДС схемы заменяются эквивалентной ЭДС $E_{экв}$. Сопротивления схемы путем последовательного и параллельного сложения, трансформации из треугольника в звезду и обратно превращаются в суммарное или результирующее сопротивление x одного элемента.

Основные формулы преобразования схем известны из курса ТОЭ и приведены в таблице 4.

Способ расчета токов трехфазного КЗ выбирают в зависимости от вида расчетной схемы и места расположения расчетной точки КЗ. Все многообразные расчетных случаев может быть сведено к трем характерным конечным схемам замещения, представленным на рис. 2.



а) «Система»; б) «Генератор-система»; в) «Двигатель-система»

В сложных системах электроснабжения несколько генерирующих ветвей, участвующих в подпитке точки КЗ, могут быть отделены от нее некоторым общим сопротивлением x_m (рис. 3, а). Чтобы найти долевое участие каждого источника в создании общего тока КЗ, нужно преобразовать исходную схему в эквивалентную условно-радиальную схему многолучевой звезды (11), по концам лучей которой располагаются источники питания, а в центре ее — точка КЗ (рис. 3, в). Порядок преобразования схемы таков: а) находим эквивалентное сопротивление генерирующих ветвей

$$x_{э\text{кв}} = 1 / \sum_{k=1}^n Y_k;$$

б) рассчитываем коэффициенты токораспределения каждого из лучей,

$$c_1 = x_{э\text{кв}} / x_1; c_2 = x_{э\text{кв}} / x_2; \dots; c_k = x_{э\text{кв}} / x_k;$$

в) находим результирующее сопротивление эквивалентной схемы (рис. 3, б)

$$x_{\text{рез}} = x_{э\text{кв}} + x_m;$$

г) используя ранее найденные коэффициенты токораспределения c_1, c_2, \dots, c_n , находим сопротивление лучей условно-радиальной схемы:

$$x_{1m} = x_{\text{рез}} / c_1; x_{2m} = x_{\text{рез}} / c_2; \dots; x_{nm} = x_{\text{рез}} / c_n.$$

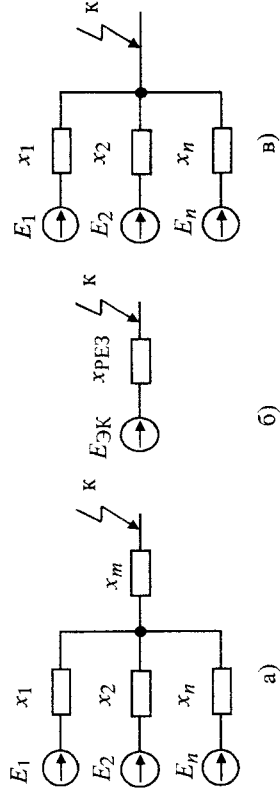


Рис. 3. Преобразование схемы сети к условно-радиальной

РАСЧЕТ ТОКОВ ТРЕХФАЗНОГО КЗ В СХЕМАХ ВИДА «СИСТЕМА», «ГЕНЕРАТОР-СИСТЕМА» И «ДВИГАТЕЛЬ-СИСТЕМА»

Расчет токов короткого замыкания в схеме вида «система»

Когда расчетная точка КЗ электрически удалена от всех источников, то схема замещения преобразуется в конечную однолучевую схему с параметрами эквивалентного источника, условно названного «системой» (С). Такая схема получается при расчете токов КЗ в РУ повышенных напряжений электростанций (точки k_1 на рис. 1), в сетях 6 – 10 кВ, питаемых от электростанций через реакторы (точка k_4 на рис. 1, а), а также в РУ 6 – 10 кВ подстанций, к которым не подсоединены непосредственно высоковольтные двигатели (М) или синхронные конденсаторы (СК).

Схемы замещения в этих случаях составляют для начального момента времени КЗ ($t = 0$) и потому все источники входят в них своими сверхпереходными параметрами.

Периодическую составляющую тока КЗ от системы $I_{\text{пс}}$ в этом случае можно считать незатухающей, неизменной по амплитуде. Аperiodическая составляющая тока КЗ от системы $i_{\text{ас}}$ изменяется по экспоненциальному закону с постоянной времени $T_{\text{ас}}$, определяемой соотношением результирующих индуктивного x_c и активного R_c сопротивлений схемы.

Значения токов КЗ, необходимые для выбора проводников и аппаратов, определяются так:

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ от системы равно:

$$I_{п0с} = I_{пс} = I_B E_c / x_c = I_B / x_c \quad *$$

Периодическая составляющая тока КЗ от системы к моменту τ не меняется:

$$I_{пст} = I_{п0с} = I_{пс} \quad (8)$$

Апериодическая составляющая тока КЗ от системы к моменту времени

$$i_{аст} = \sqrt{2} I_{пст} e^{-\tau/T_a} \quad (9)$$

Ударный ток от системы (источника С):

$$i_{удс} = K_{уд} \sqrt{2} I_{пст} \quad (10)$$

где $K_{уд} = 1 + e^{-0,01/T_{ас}}$ – ударный коэффициент, который можно определить из табл. 4 для характерных расчетных точек КЗ на подстанциях и электростанциях. Там же приведены некоторые обобщенные значения x_c/R_c постоянной времени $T_{ас}$.

Таблица 4

Обобщенные показатели для схемы вида «система»

Место короткого замыкания	x_c/R_c	$T_{ас}, с$	$K_{уд}$
РУ повышенного напряжения станции	40	0,13	1,92
РУ генераторного напряжения станции	20	0,06	1,85
Ветвь «Генератор-трансформатор»	30-50	0,1-0,2	1,9-1,95
РУ повышенного напряжения подстанции	15	0,05	1,80
РУ вторичного напряжения подстанции	20	0,06	1,85
За кабельной линией 6 – 10 кВ	3	0,01	1,40
За трансформатором с $S_{ном} \leq 1$ МВА	6,3	0,02	1,60
За линейным реактором на подстанции	18-20	0,06	1,85
За линейным реактором на станции	30	0,1	1,9
Ветвь асинхронного двигателя	6,3	0,02	1,6

Расчет токов короткого замыкания в схеме вида «генератор-система»

Если электрическая удаленность некоторых источников (генераторов) от расчетной точки КЗ равна нулю, то их следует выделить особо (источник – «генератор» Г), объединив все остальные источники в один эквивалентный – «система» С. В результате получим двухлучевую схему замещения (рис. 2, б).

Схема такого вида типична для выбора тоководущих частей и электрических аппаратов на генераторном напряжении станции (точка К₂, рис. 1), где в источник Г выделяют генератор G1, а также на стороне 6-10 кВ подстанций в местах присоединения синхронных компенсаторов.

Периодическая составляющая тока КЗ от источника С ($I_{пс}$), как и в предыдущем случае, может быть принята незатухающей. Периодическая составляющая тока КЗ от источника Г ($I_{пг}$) изменяется во времени по сложному закону, ее обычно ищут с помощью типовых кривых.

Апериодические составляющие тока КЗ от обоих источников затухают по экспоненте с постоянными времени $T_{ас}$ и $T_{аг}$, определяемыми параметрами своих ветвей.

Периодические и апериодические составляющие тока в месте КЗ определяют суммированием соответствующих токов обоих источников.

Расчет токов короткого замыкания от источника С («Система»)

Токи КЗ от источника С определяют аналогично предыдущему случаю (п. 4.1). Постоянную времени $T_{ас}$ в этом случае можно принять равной 0,06 с.

Расчет токов короткого замыкания от источника Г («Генератор»)

Начальное значение периодической составляющей тока источника Г находят через его сверхпереходные параметры $- \Delta C E_G^*$ и сопротивление $x_{Г}^*$:

$$I_{п0г} = I_B \frac{E_G^*}{x_{Г}^*} \quad (11)$$

Удаленность фиксируется отношением $I_{п0г}/I_{номг}$ — где $I_{номг}$ — номинальный ток генератора (кА), приведенный к той ступени, где находится точка КЗ $I_{номг}$ определяется так:

$$I_{номг} = P_{номг} / (\sqrt{3} U_{срКЗ} \cos \Phi_{номг}), \quad (12)$$

где $P_{номг}$ и $\cos \Phi_{номг}$ — номинальная мощность, МВт, и коэффициент мощности генератора соответственно; $U_{срКЗ}$ — среднее значение напряжения той ступени, на которой находится точка КЗ, кВ.

Расчет периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени t с использованием метода типовых кривых производят в следующем порядке:

а) определяют начальное значение периодической составляющей тока в месте КЗ от генератора $I_{п0г} = E'' / (x_d'' + x)$ и находят отношение $I_{п0г}/I_{номг}$. При наличии нескольких однотипных генераторов в выражение (12) вместо $P_{номг}$ подставляют суммарную мощность всех генераторов;

б) по найденному параметру $I_{п0г}/I_{номг}$ выбирают нужную кривую на рис. 4, а по ней для заданного $t = \tau$ определяют кратность искомого тока по отношению к начальному $\gamma_\tau = I_{птг}/I_{п0г}$;

в) определяют действующее значение периодической составляющей тока КЗ от генератора (или группы генераторов) в момент времени t :

$$I_{птг} = \gamma_\tau I_{п0г}.$$

Кривые рис. 4 справедливы для турбогенераторов мощностью от 12 до 800 МВт, гидрогенераторов до 500 МВт и всех крупных синхронных коммутаторов.

Использование метода типовых кривых в сложной схеме с несколькими генераторами, различно удаленными от места повреждения, сопряжено с большими погрешностями (>10%) и нецелесообразно.

Если генераторы и система связаны с точкой КЗ общим элементом (сопротивлением) x_k (рис. 5), то периодическую составляющую $I_{птг}$ в месте КЗ в любой момент времени $t = \tau$ находят, используя совместно типовые кривые рис. 4, а и кривые $\gamma_\tau = f(I_{п0г}/I_{п0})$ при различных значениях параметра $(I_{п0г}/I_{п0})$ (рис. 4, б).

Для определения периодического тока $I_{птг}$ от источника Г к моменту t расхождения контактов выключателя рекомендуется использовать типовые кривые, приведенные на рис. 4, а.

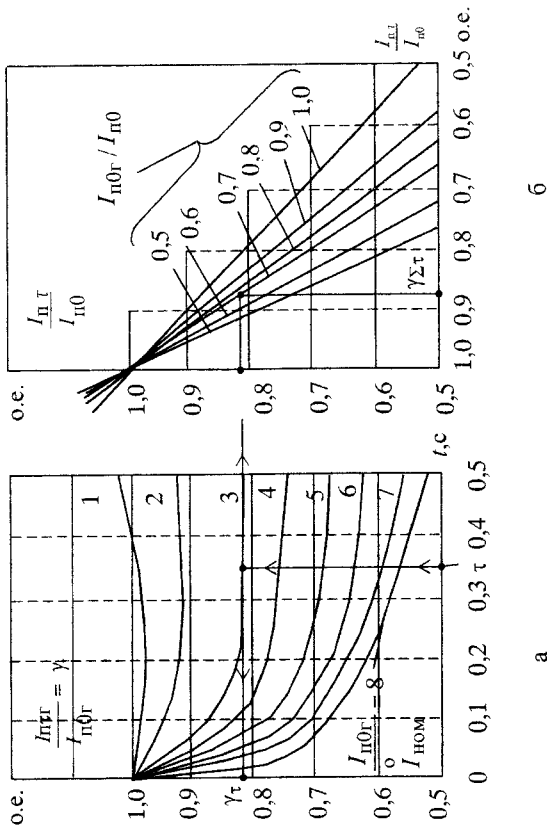


Рис. 4. Типовые кривые

По типовым кривым можно определить с допустимой погрешностью периодическую составляющую тока в момент t в схеме, где один или несколько находящихся в одинаковых условиях генераторов через общий элемент (сопротивление) подпитывают точку КЗ (рис. 4, а). Допустимо применение типовых кривых для расчета тока в сложной схеме, где генератор совместно с системой через общий элемент (сопротивление) подпитывают место КЗ

Кривые рис. 4, а представляют собой рассчитанные на ЭВМ временные зависимости периодической составляющей тока трехфазного КЗ от генератора $I_{птг}$, отнесенной к начальному току $I_{п0г}$, построенные при разных удаленностях точки КЗ от генератора. Кривые на рис. 4, б позволяют найти ток КЗ при питании КЗ от генератора и системы одновременно.

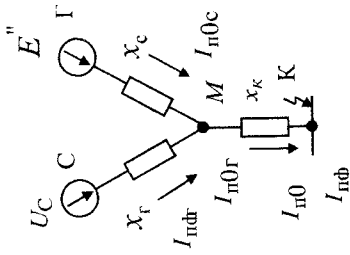


Рис. 5. Схема замещения вида «Генератор-система» с общим сопротивлением

Здесь $I_{п0}$ — начальное значение периодической составляющей тока в месте КЗ (результатирующий ток от генераторов и от системы).

Тогда расчет периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени ведут в следующем порядке:

а) преобразуют ранее составленную схему замещения и находят результирующие сопротивления ветвей x_r и x_c до узловой точки М (рис. 5), а также общее сопротивление x_k ;

б) определяют начальные значения периодических составляющих токов в месте КЗ: суммарного $I_{п0}$ и ветви генератора $I_{п0г}$ и по ним, используя формулу (12), находят параметры $I_{п0г}/I_{номг}$ и $I_{п0г}/I_{п0}$;

в) по кривой рис. 4, а для найденного параметра $I_{п0г}/I_{номг}$ и для времени $t = \tau$ находят кратность γ_t . По ней и по кривой рис. 4, б, соответствующей найденному параметру $I_{п0г}/I_{п0}$, находят суммарную кратность $\gamma_t = (I_{пт}/I_{п0})$;

г) определяют действующее значение периодической составляющей тока в месте КЗ в момент времени τ , когда источники Г и С связаны с точкой КЗ через общее сопротивление x_k :

$$I_{пт} = \gamma_t I_{п0}$$

Апериодическая составляющая точка КЗ от источника Г к моменту размыкания контактов выключателя τ может быть определена либо по формуле:

$$i_{атг} = \sqrt{2} I_{п0г} e^{-\tau/T_{аг}} \quad (13)$$

либо по кривым $e^{-\tau/T_{аг}} = f(T_{аг}, \tau)$ при известных величинах τ и $T_{аг}$ [1].

Ударный ток от источника Г:

$$i_{удг} = k_{уг} \sqrt{2} I_{п0г} \quad (14)$$

$$\text{где } k_{уг} = 1 + e^{-0,01/T_{аг}} \quad (15)$$

Значения постоянных времени $T_{аг}$ и ударных коэффициентов $k_{удг}$ для некоторых турбогенераторов приведены в табл. 5. Во всех остальных случаях $T_{аг}$ находят из справочной литературы [3, 4], а $k_{удг}$ определяют по формуле (15).

Таблица 5
Значения постоянной времени и ударного коэффициента для генераторов

Тип турбогенератора	$T_{аг}, с.$	$k_{удг}$
ТВС-30	0,212	1,96
ТВФ-60-2	0,245	1,965
ТВФ-100-2	0,417	1,98
ТВФ-120-2	0,404	1,98
ТВВ-165-2	0,408	1,98
ТВВ-200-2	0,30	1,97
ТГВ-200	0,546	1,985
ТГВ-300	0,54	1,985
ТВМ-300	0,392	1,98
ТВВ-320-2	0,368	1,975
ТВВ-500-2	0,361	1,975
ТГВ-500	0,468	1,985
ТВВ-800-2 (ТГВ-800)	0,44	1,985

Расчет токов короткого замыкания в схеме вида «Двигатель-система»

Схема замещения вида «двигатель-система» (М-С) (рис. 2, в) рекомендуется для расчета токов КЗ в электроустановках с высоковольтными двигателями, которые непосредственно связаны с точкой КЗ, например, в РУ 6–10 кВ собственных нужд тепловых электростанций и в РУ промышленных подстанций при наличии двигателей, подсоединенных непосредственно к шинам РУ.

Для упрощения расчетов группу электродвигателей (в общем случае это асинхронные и синхронные двигатели) объединяют в один эквивалентный двигатель (источник М) суммарной мощности с усредненными параметрами. При КЗ в непосредственной электрической близости электродвигатели ведут себя как генераторы, подпитывающие место КЗ. Изменением частоты вращения за время от начала КЗ до его отключения для высоковольтных двигателей обычно можно пренебречь. Вся остальная часть схемы с удаленными источниками свертывается в ветвь «система». В итоге, как и в предыдущем случае, получается двухлучевая конечная схема замещения. Поэтому общий подход к расчету токов КЗ в данном случае аналогичен подходу к расчету в схеме вида «генератор-система». Отличие состоит в методике определения токов КЗ от источника М «двигатель».

Расчет токов КЗ от источника М «Двигатель»

Ток КЗ от группы электродвигателей может быть рассчитан путем индивидуального учета каждого двигателя или группового учета. Для выбора электрических аппаратов и токоведущих частей рекомендуется применять более простой, но менее точный способ группового учета.

По этому способу группа двигателей, находящихся в непосредственной электрической близости от места КЗ, рассматривается как один эквивалентный двигатель.

Параметры эквивалентного двигателя можно определить расчетным путем, зная состав и характеристики двигателей, участвующих в подпитке места КЗ.

В результате таких расчетов были получены следующие параметры эквивалентного двигателя, которые могут быть рекомендованы для проектирования [1, 2, 3]:

Кратность пускового тока

$$I_{* \text{ пуск.д}} = k_{\text{п}} = 5,5$$

коэффициент мощности

$$\cos \varphi_{\text{д}} = 0,87$$

КПД

$$\eta_{\text{д}} = 0,94$$

постоянная времени затухания периодической

$$T_{\text{д}} = 0,07 \text{ с;}$$

постоянная времени затухания апериодической

$$T_{\text{ад}} = 0,04 \text{ с;}$$

ударный коэффициент

$$K_{\text{удд}} = 1,65.$$

Порядок расчета токов КЗ следующий:

а) определяют начальное значение периодической составляющей тока КЗ от эквивалентного двигателя (источника М) по формуле, кА:

$$I_{\text{п0д}} = I_{* \text{ пуск.д}} P_{\text{ном.д}} / \sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{дПд}} = 4,0 P_{\text{ном.д}} / \sqrt{3} U_{\text{ном}}, \quad (16)$$

где $P_{\text{номд}}$ – номинальная мощность эквивалентного двигателя М, равная сумме номинальных мощностей группы двигателей, МВт; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение двигателя М, кВ;

б) вычисляют периодическую и апериодическую составляющие тока КЗ к моменту τ соответственно:

$$I_{\text{птд}} = I_{\text{п0д}} e^{-\tau/T_{\text{д}}}, \quad (17)$$

$$i_{\text{атд}} = \sqrt{2} I_{\text{п0д}} e^{-\tau/T_{\text{ад}}}, \quad (18)$$

в) определяют ударный ток двигателя:

$$i_{\text{удд}} = k_{\text{удд}} \sqrt{2} I_{\text{п0д}}, \quad (19)$$

где $k_{\text{удд}} = e^{-0,01/\tau T_{\text{д}}} + e^{-0,01/\tau T_{\text{ад}}}$ – ударный коэффициент для двигателя.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОГО ИМПУЛЬСА КВАДРАТИЧНОГО ТОКА КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ (ИНТЕГРАЛА ДЖОУЛЯ)

Тепловой импульс квадратичного тока КЗ характеризует его термическое действие за время отключения $t_{отк}$:

$$B_K = \int_0^{t_{отк}} i_k^2(t) dt. \quad (20)$$

Определение B_K для оценки термической стойкости производится приближенным способом. При этом полный тепловой импульс разбивается на две составляющие - периодическую и аperiodическую:

$$B_K = B_{кп} + B_{ка}. \quad (21)$$

Импульс $B_{ка}$ определяют аналитически, учитывая экспоненциальный закон изменения аperiodической составляющей тока КЗ. Метод расчета импульса $B_{кп}$ выбирают в зависимости от вида расчетной схемы замещения.

Для схемы вида «система» вычисляют сразу тепловой импульс от полного тока КЗ по формуле:

$$B_K = I_{п0с}^2 (t_{отк} + T_{ас}). \quad (22)$$

Для схемы вида «Генератор-система» тепловой импульс от периодической составляющей тока КЗ рассчитывают по кривым изменения во времени относительных тепловых импульсов от периодической составляющей тока Q и от квадрата этого тока КЗ B (рис. 7) [4]. По кривым рис. 7 для расчетного времени отключения генератора определяют относительные значения тепловых импульсов (Q и B) (они всегда меньше единицы), а по ним находят тепловой импульс от периодической составляющей тока КЗ:

$$B_{кп} = (I_{п0с}^2 + 2I_{п0с}I_{п0г}Q + I_{п0г}^2 B) t_{отк}. \quad (23)$$

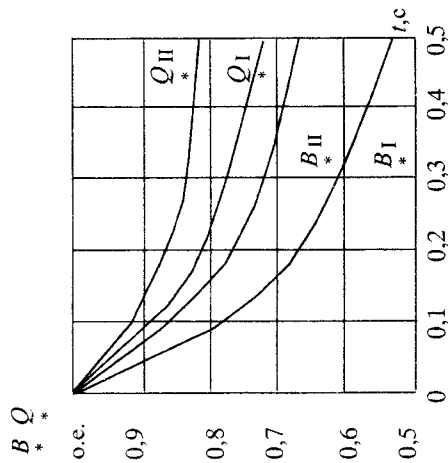


Рис. 7. Расчетные кривые нагрева: I - турбогенераторы;

II - гидрогенераторы и СК

Расчетные кривые относительных тепловых импульсов Q и B представлены на рис. 7 [1, 2, 4].

Другую составляющую $B_{ка}$ с учетом разновременности затухания аperiodических токов от системы и генератора находят по формуле [1, 2, 3]:

$$B_{ка} = I_{п0с}^2 T_{ас} + I_{п0г}^2 T_{аг} + 4I_{п0с}I_{п0г} / (1/T_{ас} + 1/T_{аг}). \quad (24)$$

Для схемы вида «двигатель-система» тепловые импульсы от периодической и аperiodической составляющих тока КЗ определяют отдельно:

$$B_{кп} = I_{п0с}^2 t_{отк} + 2I_{п0с}I_{п0д} T_{д} (1 - e^{-2t_{отк}/T_{д}}) + 0,5 I_{п0д}^2 T_{д}^2 (1 - e^{-2t_{отк}/T_{д}}); \quad (25)$$

$$B_{ка} = (I_{п0с} + I_{п0д})^2 T_{а} (1 - e^{-2t_{отк}/T_{а}}), \quad (26)$$

где $T_{а} = (T_{ас}I_{п0с} + T_{ад}I_{п0д}) / (I_{п0с} + I_{п0д})$ - обобщенная постоянная времени.

Выражения (25) и (26) даны для расчета B_K в случае преобладания в группе электродвигателей синхронных машин. Если в группе электродвигателей преобладают синхронные двигатели, то подсчитывают суммарный тепловой импульс так:

$$B_K = I_{п0с}^2 (t_{отк} + T_{а}) + I_{п0д}^2 (0,5 T_{д} + T_{а}) + 2I_{п0с}I_{п0д} (T_{д} + T_{а}). \quad (27)$$

После определения величин токов трехфазного КЗ данные сводят в табл. 6.

Таблица 6

Сводная таблица результатов расчета токов трехфазного КЗ

Точка КЗ	Место КЗ	Наименование источника, подпитывающего точку КЗ	Мощность источника, МВА	Результаты расчета		
				Ток КЗ, кА		T_a, c
				$I_{пт}$	$i_{уд}$	$k_{уд}$ о.е.
	Шины РУВН(СН)	Энергосистема Генератор (суммарное значение)				

ВАРИАНТЫ КОНТРОЛЬНОГО ЗАДАНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

Для заданной схемы электрической сети (рис. 1.1 для вариантов 1–10 или рис. 1.2 для вариантов 11–20) выполнить расчет трехфазного тока КЗ в заданной точке. При этом определить:

- Начальное значение периодической составляющей $I_{п0}$ тока КЗ и тока $I_{пт}$ для времени $t = 0,3 c$ и $t = \infty$. Определить тепловой импульс для $t = \tau$.
- Ударный ток $i_{уд}$ и мощность КЗ
- Действующее значение тока КЗ за первый период его изменения.

Исходные данные приведены в таблицах 1.1–1.3 и берутся в соответствии с шифром, состоящим из комбинации буквенных цифровых обозначений, например:

1.3.2.5

Первая цифра (1) обозначает номер схемы сети (в нашем случае – первая схема сети по рис. 1.1).

Вторая цифра (3) обозначает номер строки в табл. 1.1 и определяет характеристики ЛЭП.

Третья цифра (2) указывает режимы нейтралей трансформаторов, определяемые номером строки в табл. 1.2.

Четвертая цифра (5) определяет параметры генераторов, трансформаторов, нагрузки, реакторов и систем. Эта цифра указывает на номер строки в табл. 1.3.

Исходные данные для расчетов приведены в таблицах 1.1–1.4. При определении ударного коэффициента активное сопротивление системы принимать в соответствии с заданным значением коэффициента мощности системы $\cos\varphi_c = 0,92$, а активное сопротивление нагрузок учитывать с помощью $\cos\varphi_{нг} = 0,8$. Точки К1, К5, К6, К7 и К8 находятся посередине соответствующих линий.

Таблица 1.1

Характеристики линий электропередачи

Вариант	Длина линий, км				Удельные параметры, Ом/км	
	W_1	W_2	W_3	W_4	$x_0=x_{уд}$	$r_0=r_{уд}$
1	100	90	150	60	0,42	0,1
2	40	80	90	40	0,41	0,09
3	90	50	70	50	0,39	0,085
4	120	180	210	60	0,41	0,075
5	80	130	190	90	0,35	0,060
6	220	140	170	30	0,32	0,055
7	250	290	220	150	0,31	0,065
8	150	120	210	320	0,34	0,075
9	210	240	250	90	0,37	0,085
10	180	160	120	130	0,39	0,095

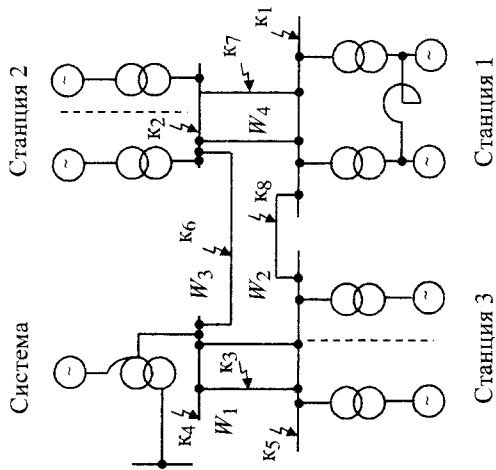


Рис. 1.1. Схема электрических соединений сети 1

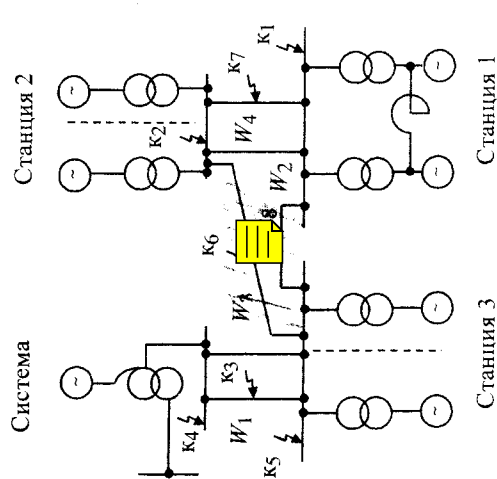


Рис. 1.2. Схема электрических соединений сети 2

Технические данные элементов электрической сети

Таблица 1.2

Вариант	Станция 1											
	Гурбогенераторы					Трансформаторы					Реакторы	
	Тип	x_d/R	"	x/R	Тип	Тип	x/R	Тип	Тип	x_p/R		
1	ТВФ-63	30			ТДЦ-80000/110	20			РБ-10-630-0,25	40		
2	ТВФ-110	30			ТДЦ-200000/110	20			РБ-10-1000-0,28	40		
3	ТВФ-120	90			ТДЦ-200000/110	35			РБ-10-1600-0,25	50		
4	ТВФ-120	90			ТДЦ-200000/110	35			РБ-10-1600-0,25	50		
5	ТГВ-200	100			ТДЦ-250000/110	35			РБ-10-1600-0,56	50		
6	ТВФ-110	100			ТДЦ-160000/110	35			РБ-10-400-0,35	50		
7	ТВВ-160	100			ТДЦ-200000/110	35			РБ-10-1600-0,25	60		
8	ТВФ-63	60			ТДЦ-80000/110	20			РБ-10-630-0,56	60		
9	ТВС-32	30			ТД-40000/110	20			РБ-10-400-0,45	30		
10	ТВФ-110	30			ТДЦ-200000/110	25			РБ-10-1000-0,7	40		
11	ТВФ-63	30			ТДЦ-80000/110	20			РБ-10-630-0,25	40		
12	ТВФ-110	30			ТДЦ-200000/110	20			РБ-10-1000-0,28	40		
13	ТВФ-120	90			ТДЦ-200000/110	35			РБ-10-1600-0,25	50		
14	ТВФ-120	90			ТДЦ-200000/110	35			РБ-10-1600-0,25	50		
15	ТГВ-200	100			ТДЦ-250000/110	35			РБ-10-1600-0,56	50		
16	ТВФ-110	100			ТДЦ-160000/110	35			РБ-10-400-0,35	50		
17	ТВВ-160	100			ТДЦ-200000/110	35			РБ-10-1600-0,25	60		
18	ТВФ-63	60			ТДЦ-80000/110	20			РБ-10-630-0,56	60		
19	ТВС-32	30			ТД-40000/110	20			РБ-10-400-0,45	30		
20	ТВФ-110	30			ТДЦ-200000/110	25			РБ-10-1000-0,7	40		

Таблица 1.3

Технические данные элементов электрической сети

Вариант	Станции 2 и 3					
	Турбогенераторы			Трансформаторы		
	<i>n</i>	Тип	x_d''/R	Тип	x/R	
1	5	ТВФ-110	100	ТЦ-160000/220	30	
2	5	ТВФ-120	100	ТЦ-160000/220	30	
3	4	ТВВ-160	100	ТДЦ-200000/220	30	
4	4	ТТВ-200	120	ТДЦ-250000/220	30	
5	4	ТТВ-300	130	ТЦ-400000/500	40	
6	5	ТВВ-320	140	ТЦ-400000/500	40	
7	4	ТТВ-500	150	ТЦ-630000/500	50	
8	6	ТВВ-320	140	ТДЦ-400000/220	40	
9	6	ТТВ-300	130	ТДЦ-400000/220	40	
10	5	ТТВ-200	120	ТДЦ-250000/220	30	
11	5	ТВФ-110	100	ТЦ-160000/220	30	
12	5	ТВФ-120	100	ТЦ-160000/220	30	
13	4	ТВВ-160	100	ТДЦ-200000/220	30	
14	4	ТТВ-200	120	ТДЦ-250000/220	30	
15	4	ТТВ-300	130	ТЦ-400000/500	40	
16	5	ТВВ-320	140	ТЦ-400000/500	40	
17	4	ТТВ-500	150	ТЦ-630000/500	50	
18	6	ТВВ-320	140	ТДЦ-400000/220	40	
19	6	ТТВ-300	130	ТДЦ-400000/220	40	
20	5	ТТВ-200	120	ТДЦ-250000/220	30	

Таблица 1.4

Технические данные элементов электрической сети

Вариант	Автотрансформатор										Система
	$S_{НВ}$ МВА	$U_{В}$ кВ	$U_{С}$ кВ	$U_{НВ}$ кВ	$i_{квн}$ %	$i_{кст}$ %	$i_{квс}$ %	x/R			
	$S_{к}$ МВА										
1	3	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	63	230	121	11	35	22	11	20	1800		
2	125	230	121	11	31	19	11	30	2200		
3	200	230	121	11	32	20	11	30	2800		
4	250	230	121	11	32	20	11	30	2900		
5	125	330	115	11	35	22	10	30	3000		
6	200	330	125	11	32	22	10	30	3500		
7	500	500	230	11	35	22	11	50	4000		
8	800	500	230	11	23	13	9	60	5000		
9	500	500	330	11	67	61	10	50	5000		
10	200	230	121	11	32	20	11	30	3000		
11	63	230	121	11	35	22	11	20	1800		
12	125	230	121	11	31	19	11	30	2200		
13	200	230	121	11	32	20	11	30	2800		
14	250	230	121	11	32	20	11	30	2900		
15	125	330	115	11	35	22	10	30	3000		
16	200	330	125	11	32	22	10	30	3500		
17	500	500	230	11	35	22	11	50	4000		
18	800	500	230	11	23	13	9	60	5000		
19	500	500	330	11	67	61	10	50	5000		
20	200	230	121	11	32	20	11	30	3000		

Примечание: *n* – количество блоков «генератор-трансформатор»; параметры генераторов, трансформаторов, реакторов, необходимые для расчета, выбираются из справочника [1].

Содержание

1. Предисловие	3
2. Общие рекомендации по работе над дисциплиной «Переходные процессы в электроэнергетических системах»	4
3. Программа дисциплины	9
4. Методические указания по изучению дисциплины «Переходные процессы в электроэнергетических системах» (7 семестр)	12
5. Методические указания по выполнению и оформлению контрольного задания	25

Учебное издание

**ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Составитель: Федотов Евгений Александрович

Программа, методические указания и контрольные задания
Для студентов заочного факультета,
обучающихся в сокращенные сроки
(7 семестр)

Кафедра электрических станций КГЭУ

Редактор издательского отдела *А.В. Сапронова*

Компьютерная верстка *Л.Э. Адылова*

Подписано в печать 22.05.09

Формат 60×84/16. Бумага ВХИ. Гарнитура «Times» Вид печати РОМ.
Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 3,09. Тираж 1000 экз. Заказ № 3491.

Издательство КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская ул., д. 51
Типография КГЭУ, 420066, Казань, Красносельская ул., д.51