

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Курганский государственный университет»

Кафедра «Энергетика и технология металлов»

**РАСЧЕТ ТОКОВ
КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

Методические указания и задания
к выполнению курсовой работы
по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы
в электроэнергетических системах»
для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика
и электротехника» (профиль «Электроснабжение»)

Курган 2018

Кафедра: «Энергетика и технология металлов».

Дисциплина: «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах» направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение»).

Составил: доцент, канд. техн. наук В.И. Мошкин.

Составлены на основе переработанных методических указаний к выполнению курсовой работы по курсу «Переходные процессы в системах электроснабжения» для студентов специальности 1004 «Расчет токов при коротких замыканиях» / сост. В. Н. Серебряков. – Саратов : Изд-во СГТУ, 2004. – 32 с. и методических указаний и задания на работу по расчету электромагнитных переходных процессов по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы» / сост. В. И. Токочаков. – Гомель : Изд-во ГГТУ, 2006. – 22 с.

Утверждено на заседании кафедры: «30» августа 2017 г.

Рекомендовано методическим советом университета «12» декабря 2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для выполнения студентами курсовой работы по расчету симметричных и несимметричных коротких замыканий (к.з.) в системах электроснабжения студентами очной и заочной форм обучения направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение»). Указания содержат необходимый минимум теоретического материала, иллюстрированный примерами расчетов.

1 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1.1 Задание к курсовой работе

1 Курсовая работа выполняется на листах расчётно-пояснительной записки (РПЗ) формата А4, на титульном листе должны быть указаны Ф.И.О. студента, его шифр, сразу после титульного листа помещается бланк задания. При оформлении следует пользоваться положениями ГОСТ 7.32-2001 «Отчет о научно-исследовательской работе. Общие требования к текстовым документам», а также методическими указаниями по выполнению контрольной работы.

2 Основные положения расчёта должны иметь объяснения. Расчеты должны выполняться с обычной инженерной точностью (до трех–четырёх значащих цифр).

3 На листах РПЗ преподавателем делаются замечания. По пунктам замечаний студентом вносятся исправления и дополнения. Их возможно помещать или в конце работы, или на обороте предыдущего листа. Не разрешается вносить исправления в проверенный преподавателем текст.

4 Выполненная курсовая работа сдается на кафедру ЭТМ КГУ (ауд. Б-215) или лично преподавателю, выдавшему задание. После проверки работу получает студент лично у этого преподавателя или в ауд. Б - 215 в часы работы университета. Защита курсовой работы производится по консультационным субботам (расписание консультационных суббот находится возле деканата и ауд. Б-215), до экзамена, при собеседовании с выдавшим задание преподавателем.

5 **Бланк задания** с расчетной схемой системы электроснабжения и параметрами электроустановки студенту выдает преподаватель (Приложение 3).

По *последней* цифре шифра студент заочной формы обучения выбирает **контрольный вопрос** из раздела "Симметричные короткие замыкания", а по предпоследней – из раздела "Несимметричные короткие замыкания" пункта 1.2 настоящих указаний.

6 Курсовая работа, сданная на проверку без бланка задания, а также оформленная неаккуратно, не рецензируется

1.2 Контрольные вопросы

Раздел "Симметричные короткие замыкания"

- 1 Перечислите порядок расчета начального значения периодической составляющей тока к.з. (сверхпереходного тока) и ударного тока к. з.
- 2 Векторная диаграмма синхронной машины в *переходном* режиме, порядок ее построения.
- 3 Схемы замещения синхронной машины в *сверхпереходном* режиме.
- 4 Порядок расчета сопротивлений генераторов, трансформаторов, реакторов и линий в именованных единицах с точным и приближенным приведением в схеме замещения.
- 5 Векторная диаграмма синхронной машины в *сверхпереходном* режиме, порядок ее построения.
- 6 Порядок расчета тока трехфазного к.з. по методу спрямленных характеристик.
- 7 Порядок расчета тока трехфазного к.з. по методу расчетных кривых.
- 8 Порядок расчета тока трехфазного к.з. по методу типовых кривых.
- 9 Порядок расчета сопротивлений генераторов, трансформаторов, реакторов и линий в относительных единицах с точным и приближенным приведением в схеме замещения.
- 10 Как учитывается обобщенная нагрузка в схеме замещения электроустановки системы электроснабжения в моменты времени $t=0$ и $t=\infty$.

Раздел "Несимметричные короткие замыкания"

- 1 Порядок учета переходного активного сопротивления в месте к.з.
- 2 Сравните виды к.з. по величине уровня остаточного напряжения и тока прямой последовательности в месте к.з.
- 3 Порядок расчета несимметричного к.з. по методу спрямленных характеристик.
- 4 Порядок расчета несимметричного к.з. по методу расчетных кривых.
- 5 Порядок расчета несимметричного к.з. по методу типовых кривых.
- 6 Порядок построения векторных диаграмм для определения фазных значений токов и напряжений в месте к.з. Показать на примере однофазного к.з.
- 7 Порядок определения параметров элементов в схемах замещения обратной и нулевой последовательностей.
- 8 Порядок учета влияния обобщенной нагрузки в расчетах несимметричных к.з.
- 9 Порядок составления схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей.
- 10 Сущность правила эквивалентности прямой последовательности и порядок его применения в расчетах несимметричного к.з.

1.3 Содержание курсовой работы

Выполнить все пункты, указанные в бланке задания, и привести ответы на контрольные вопросы из пункта 1. 2 настоящих методических указаний для студентов заочной формы обучения. Оформить РПЗ.

2 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАСЧЕТОВ ТОКОВ К.З.

2.1 Расчет тока трехфазного к.з. (пункт 2 Задания)

Задачей расчета режима к.з. является определение при аварии величин токов, напряжений и мощностей в заданной точке электрической сети (расчетной схемы по пункту 1 Задания).

2.1.1 Порядок составления схемы замещения

По расчетной схеме системы электроснабжения составляется ее схема замещения (однолинейная, на одну фазу). При этом все элементы расчетной схемы, по которым возможно протекание тока к.з., вводятся в схему замещения упрощенно, а именно, только своими индуктивными сопротивлениями, а источники питания, кроме того – своими ЭДС. Всем сопротивлениям и ЭДС схемы замещения присваиваются порядковые номера или буквенные индексы, под которыми на схеме приводятся их расчетные значения (рис.3,а).

2.1.2 Расчет параметров схемы замещения при использовании приближенного приведения параметров элементов схемы замещения

Система электроснабжения, как правило, содержит элементы с различными номинальными напряжениями. Связь этих элементов осуществляется через трансформаторы, представляющие собой магнитосвязанные электрические контуры. Для удобства расчетов схема замещения составляется таким образом, чтобы все ее элементы были связаны между собой только электрически. Это достигается путем приведения (изменения) всех сопротивлений и ЭДС схемы замещения к одной (основной) ступени напряжения.

В данной работе расчет сопротивлений следует выполнить в именованных или относительных единицах с приближенным приведением параметров к основной ступени напряжения. При приближенном приведении принимают, что номинальные напряжения всех элементов (кроме реакторов), находящихся на одной ступени напряжения, одинаковы и равны соответствующим средним номинальным значениям согласно шкале: 0,23; 0,40; 0,69; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770 и 1175 кВ.

Сущность расчета в относительных единицах состоит в том, что все величины, используемые в расчете (токи, напряжения, сопротивления), получаются в виде отношения самой исходной величины в величине, принятой в качестве

единицы измерения (базисной). При этом за базисную мощность (S_B) принимают величину полной мощности генератора или трансформатора, но чаще всего – величину, кратную 10, а за базисное напряжение (U_B) принимают среднее номинальное напряжение сети на ступени к.з.

Расчет параметров элементов схемы замещения в относительных или в именованных единицах с приближенным приведением производят по известным выражениям [Табл. 1].

Таблица 1 – Представление элементов электрической системы в схемах замещения при расчетах токов к.з.

Наименование элемента	Принципиальная схема	Схема замещения	Выражение сопротивлений	
			В именованных единицах, Ом	В относительных единицах, о. е
Система			$X_c = \frac{U_{cp}^2}{S_k''}$	$X_{*c(Б)} = \frac{S_B}{S_k''}$
Синхронный генератор (с демпф. обмотками) или синхронный двигатель			$X_d'' = X_{*d(НОМ)}'' \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$	$X_{*d(Б)}'' = X_{*d(НОМ)}'' \cdot \frac{S_B}{S_{НОМ}}$
			$X_d = X_{*d(НОМ)} \cdot \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$	$X_{*d(Б)} = X_{*d(НОМ)} \cdot \frac{S_B}{S_{НОМ}}$
Асинхронный двигатель			$X_m'' = \frac{U_{НОМ}^2}{I_{П*} \cdot S_{НОМ}}$	$X_{*m(Б)}'' = \frac{S_B}{I_{П*} \cdot S_{НОМ}}$
			$X_m = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ.ДВ}}$	$X_{*m(Б)} = \frac{S_B}{S_{НОМ.ДВ}}$
Обобщенная нагрузка			$X_{НГ}'' = 0,35 \cdot \frac{U_{НГ}^2}{S_{НГ}}$	$X_{*НГ(Б)}'' = 0,35 \cdot \frac{S_B}{S_{НГ}}$
			$X_{НГ} = 1,2 \cdot \frac{U_{НГ}^2}{S_{НГ}}$	$X_{*НГ(Б)} = 1,2 \cdot \frac{S_B}{S_{НГ}}$
Тр-р двухобмоточный			$X_T = \frac{u_k \% \cdot U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}$	$X_{*T(Б)} = \frac{u_k \% \cdot S_B}{100 \cdot S_{НОМ}}$
Трехобмоточный тр-р, автотрансформатор			$X_B = \frac{u_{кв} \% \cdot U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}$	$X_{*B(Б)} = \frac{u_{кв} \% \cdot S_B}{100 \cdot S_{НОМ}}$
			$X_C = \frac{u_{кс} \% \cdot U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}$	$X_{*C(Б)} = \frac{u_{кс} \% \cdot S_B}{100 \cdot S_{НОМ}}$
			$X_H = \frac{u_{кн} \% \cdot U_{НОМ}^2}{100 \cdot S_{НОМ}}$	$X_{*H(Б)} = \frac{u_{кн} \% \cdot S_B}{100 \cdot S_{НОМ}}$
Реактор одинарный			$X_P = \frac{X_p \% \cdot U_{p.НОМ}}{100 \sqrt{3} \cdot I_{p.НОМ}}$	$X_{*P(Б)} = \frac{X_p \% \cdot I_B \cdot U_{p.НОМ}}{100 \cdot I_{p.НОМ} \cdot U_B}$

Наименование элемента	Принципиальная схема	Схема замещения	Выражение сопротивлений	
			В именованных единицах, Ом	В относительных единицах, о. е
Воздушная или кабельная линия			$R_{Л} = r_{уд} \cdot l$ $X_{Л} = x_{уд} \cdot l$	$R_{*Л(Б)} = r_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_{Б}}{U_{Б}^2}$ $X_{*Л(Б)} = x_{уд} \cdot l \cdot \frac{S_{Б}}{U_{Б}^2}$
Реактор двоясный			$X_C = -k_{св} \cdot X_{р.ном}$ $X_{H1} = X_{H2} = (1 + k_{св}) \cdot X_{р.ном}$	$X_{*C(Б)} = -k_{св} \cdot X_{р.ном} \cdot \frac{S_{Б}}{U_{р.ном}^2}$ $X_{*H1(Б)} = X_{*H2(Б)} = (1 + k_{св}) \cdot X_{р.ном} \cdot \frac{S_{Б}}{U_{р.ном}^2}$

При расчётах в относительных единицах величина, например, сопротивление, снабжается звездочкой. А если эта величина ещё и приведена к базисным условиям, то она дополнительно снабжается индексом (Б), например, $X_{(Б)*}$.

При расчётах в именованных единицах звёздочка отсутствует, а сама приведённая величина снабжается кружочком над обозначением параметра, например, $\overset{\circ}{X}_p$.

2.1.3 Расчет параметров схемы замещения при точном приведении элементов схемы замещения в именованных единицах

Расчет аналитическим способом сверхпереходного $I_{п.0}$ и ударного $i_{уд}$ токов трехфазного к.з., используя точное приведение элементов схемы замещения в именованных единицах, выполняют в следующем порядке:

- составляют схему замещения для начального момента времени, отбрасывая части расчетной схемы, которые отделены от места повреждения отключенными выключателями согласно заданию;
- приводят сопротивления и ЭДС схемы замещения к основной ступени напряжения (или ступени места повреждения) с учетом фактических коэффициентов трансформации, указанных в задании;
- упрощают схему замещения относительно точки к. з.;
- определяют периодическую составляющую тока трехфазного к. з.;
- определяют ударный ток трехфазного к. з..

Сверхпереходная ЭДС генератора определяют при **номинальных** условиях по формулам:

$$E_{Г}'' \approx U_{ном} + \sqrt{3} \cdot I_{ном.Г} \cdot x_{d(ном)}'' \cdot \sin \varphi_{ном}, \text{ кВ.}$$

Обобщенную нагрузку замещают сверхпереходной ЭДС, относительное значение которой равно 0,85 о.е., и относительным сопротивлением, равным 0,35 о.е., приведенным к той ступени напряжения, к которой подключена нагрузка, и к полной мощности нагрузки (таблица 1).

Начальное значение сверхпереходного тока в месте короткого замыкания определяется по формуле[1-3]:

$$I_{п.0} = E'' / \sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}'', \text{ кА.}$$

Ударный ток короткого замыкания определяется по формуле:

$$i_{уд} = k_{уд} \sqrt{2} \cdot I_{п.0}, \text{ кА,}$$

где $k_{уд}$ – ударный коэффициент, приближенное значение которого определяется по табл. 2 согласно местоположению точки к.з.; $I_{п.0}$ – начальное значение периодической составляющей тока к.з.[2,3].

Таблица 2 – Значения ударного коэффициента[2,3]

Элементы или части энергосистемы	$k_{уд}$
1. Турбогенераторы мощностью, МВт 12 – 60 100 – 1000	1,94 – 1,955 1,975 – 1,98
2. Блоки, состоящие из турбогенератора мощностью 60 МВт и трансформатора (на стороне ВН), при номинальном напряжении генератора, кВ 6,3 10,5	1,95 1,935
3. Блоки, состоящие из турбогенератора и повышающего трансформатора, при мощности генераторов, МВт 100 – 200 300 500 800	1,965 1,97 1,973 1,967
4. Система, связанная со сборными шинами, где рассматривается короткое замыкание, воздушными линиями напряжением, кВ 35 110 – 150 220 – 330 500 – 750	1,608 1,608 – 1,717 1,717 – 1,78 1,85 – 1,895
5. Система, связанная со сборными шинами 6 – 10 кВ, где рассматривается короткое замыкание, через трансформаторы мощностью, МВА в единице 80 и выше 32 – 80 5,6 – 32	1,85 – 1,935 1,82 – 1,904 1,6 – 1,82
6. Ветви, защищенные реактором с номинальным током, А 1000 и выше 630 и ниже	1,956 1,904
7. Распределительные сети напряжением 6 – 10 кВ	1,369

2.1.4 Расчет токов трехфазного к.з. при использовании **приближенного** приведения элементов схемы замещения в именованных единицах

Расчет аналитическим способом сверхпереходного и ударного токов трехфазного короткого замыкания, используя приближенное приведение элементов схемы замещения в именованных единицах, следует выполнять в следующем порядке:

- составление схемы замещения для начального момента времени, отбрасывая части расчетной схемы отделенных от места повреждения отключенными выключателями согласно шифру схемы;
- приведение значений сопротивлений и ЭДС схемы замещения к ступени напряжения места повреждения с учетом коэффициентов трансформации, найденных как отношение средних номинальных напряжений;
- преобразование схемы замещения к точке короткого замыкания;
- определение периодической составляющей тока трехфазного короткого замыкания;
- определение ударного тока трехфазного короткого замыкания.

Шкала средних номинальных напряжений была представлена выше.

Сверхпереходная ЭДС генератора (линейная) определяется при **номинальных** условиях по приближенной формуле [1-3]:

$$E''_{\Gamma} \approx U_{\text{ном}} + \sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}} \cdot x''_{d(\text{ном})} \cdot \sin \varphi_{\text{ном}}, \text{ кВ.}$$

Обобщенная нагрузка замещается сверхпереходной ЭДС, относительное значение которой равно 0,85 о.е., и относительным сопротивлением, равным 0,35 о.е., которые приведены к той ступени напряжения, к которой подключена нагрузка, и к полной мощности нагрузки (таблица 1).

2.1.5 Методы преобразования схем замещения

Расчет тока любого вида к.з. всегда связан с определением результирующих сопротивлений и ЭДС схемы замещения для рассматриваемого момента времени относительно места к.з. Для определения результирующих сопротивлений и ЭДС схемы замещения используют методы преобразования, известные из курса ТОЭ.

В частном случае, когда исходная схема замещения не содержит замкнутых контуров и в ней имеется один или несколько источников с одинаковыми ЭДС, ее можно привести к простейшему виду путем элементарных преобразований (последовательное и параллельное сложение сопротивлений элементов). В общем же случае для такого приведения используют ряд дополнительных преобразований. К ним относят: преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений и обратно; преобразование многолучевой звезды в полный (с диагоналями) многоугольник [5]; замена нескольких генерирующих ветвей с разными ЭДС, присоединенных к общему узлу схемы, од-

ной эквивалентной ЭДС; разнос сопротивлений в генерирующие ветви и др. Формулы таких преобразований можно найти в [1– 4].

Приведем ряд указаний и рекомендаций, которыми следует пользоваться при преобразованиях схем замещения в ходе выполнения расчета тока к.з.

Первоочередной задачей расчета тока к.з. обычно является нахождение тока в аварийной ветви или в месте к.з. В этой связи преобразование схемы замещения целесообразно вести так, чтобы аварийная ветвь по возможности была сохранена до конца преобразования. С этой целью концы нагрузочных ветвей, ЭДС которых принимаются равными нулю (при расчете установившегося тока к.з.), не следует соединять с точкой к.з., а лучше эти ветви объединять с генераторными ветвями в эквивалентные ветви.

Если металлическое трехфазное к.з. находится в узле с несколькими сходящимися в нем ветвями, то этот узел можно условно разрезать, сохранив на концах каждой образовавшейся ветви такое же к.з. [1-3]. Далее, полученную схему можно преобразовать относительно любой из полученных точек к.з., учитывая другие ветви с к.з. как нагрузочные ветви с ЭДС, которые равны нулю.

2.2 Расчет тока и мощности к.з. для произвольного момента времени

Расчет тока к.з. в сложной схеме для произвольного момента времени основан на решении системы дифференциальных уравнений синхронных и асинхронных машин, участвующих в схеме электроснабжения. Полученные аналитические решения для схем с двумя и более источниками сложны и весьма громоздки.

В этой связи для инженерной практики были разработаны практические (приближенные) методы расчета переходного процесса при к.з. Они включают в себя графоаналитические методы: метод расчетных кривых, метод спрямленных характеристик и метод типовых кривых [1–4].

Различие между графоаналитическими практическими методами расчета переходного процесса состоит в разном подходе к определению периодической составляющей тока к.з.

Если требуется найти ток не только в месте к.з., а также его распределение по отдельным ветвям схемы в произвольный момент времени, то наибольшей точностью обладает метод спрямленных характеристик, наиболее же простым является метод типовых кривых [1– 4].

2.2.1 Расчет токов к.з. в схеме вида "генератор-система"

Если электрическая удаленность некоторых источников (генераторов) от расчетной точки к.з. равна нулю, то их следует выделить особо (источник - "генератор" Г), объединив все остальные источники в один эквивалентный – "система" С.

Периодическая составляющая тока к.з. от источника С ($I_{п.с}$), как и в предыдущем случае, может быть принята незатухающей. Периодическая составляющая тока к.з. от источника Г ($I_{п.г}$) изменяется во времени по сложному закону, её обычно ищут с помощью уточнённых типовых кривых.

Апериодические составляющие тока к.з. от обоих источников затухают по экспоненте с постоянными времени $T_{a.c}$ и $T_{a.g}$, определяемыми параметрами своих ветвей.

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

2.2.2 Расчет токов к.з. от источника С ("система")

Токи к.з. от источника С определяют аналогично предыдущему случаю. Постоянную времени $T_{a.c}$ в этом случае можно принять равной 0,06 с [1-3].

2.2.3 Расчет токов к.з. от источника Г ("генератор")

Начальное значение периодической составляющей тока источника Г находят через его сверхпереходные параметры в относительных единицах: ЭДС $E_{Г*}^{//}$ и сопротивление $X_{Г*}^{//}$:

$$I_{п.0.г} = I_B \cdot \left(\frac{E_{Г*}^{//}}{X_{Г*}^{//}} \right). \quad (8)$$

Для определения периодического тока $I_{п.т.г}$ от источника Г к моменту t расхождения контактов выключателя рекомендуется использовать уточненные типовые кривые с тиристорной независимой системой возбуждения [5], приведенные на рис. 1.

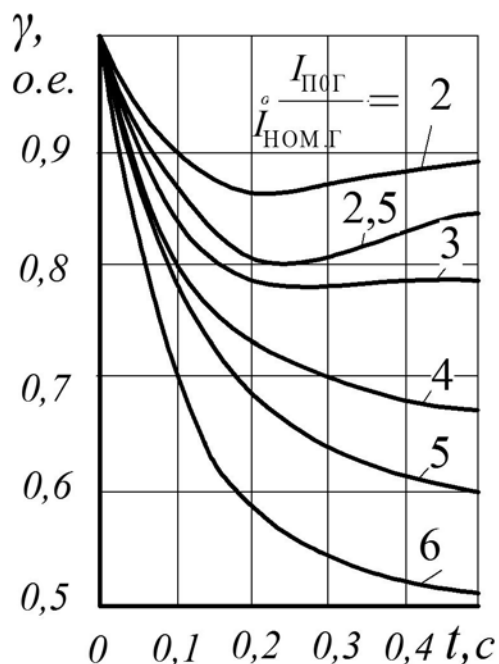


Рис. 1 – Типовые кривые генераторов с тиристорной независимой системой возбуждения

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 к.з. (рис. 1). Допустимо применение типовых кривых для расчета тока в сложной схеме, где генератор совместно с системой через общий элемент (сопротивление) подпитывают место к.з.

Кривые рис. 1 представляют собой рассчитанные на ЭВМ временные зависимости периодической составляющей тока трехфазного к. з. от генератора $I_{п.т.г}$, отнесенной к начальному току $I_{п.0.г}$, построенные при разных удаленностях точки к.з. от генератора.

Удаленность фиксируется отношением $I_{п.0.г}/I_{ном.г}^0$ **при номинальных условиях**. Здесь $I_{ном.г}^0$ – номинальный ток генератора (кА), приведенный к той ступени, где находится точка к.з., он определяется как:

$$I_{ном.г}^0 = P_{ном}/(\sqrt{3} U_{ср.к} \cos \varphi_{ном}), \quad (9)$$

где $P_{ном}$ и $\cos \varphi_{ном}$ – номинальная мощность, МВт, и коэффициент мощности генератора соответственно; $U_{ср.к}$ – среднее значение напряжения той ступени, на которой находится точка к.з., кВ.

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

а) определяют начальное значение периодической составляющей тока в месте к.з. от генератора $I_{п.0.г} = E''/(X''_d + X_\Sigma)$ и находят удаленность в виде отношения $I_{п.0.г}/I_{ном.г}^0$. При наличии нескольких однотипных генераторов в выражение (9) вместо $P_{ном}$ подставляют суммарную мощность всех генераторов;

б) по найденной удаленности $I_{п.0.г}/I_{ном.г}^0$ выбирают нужную кривую на рис. 1 и для заданного времени $t = \tau$ восстанавливают перпендикуляр от оси абсцисс до пересечения с нужной кривой, полученную точку сносят на ось ординат и по ней определяют кратность искомого тока по отношению к начальному $\gamma_\tau = I_{п.т.г}/I_{п.0.г}$;

в) тогда действующее значение периодической составляющей тока к.з. от генератора (или группы генераторов) в момент времени t будет:

$$I_{п.т.г} = \gamma_\tau \cdot I_{п.0.г}$$

Кривые (рис. 1) справедливы для турбогенераторов мощностью от 12 до 800 МВт и всех крупных синхронных компенсаторов.

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

Пример 1

Для генераторов общей мощностью 220 МВ·А, $U_{\text{ном}}=10,5$ кВ с $E^*=1,0$ о.е. за сопротивлением $X_{K^*} = 0,19$ о.е. при $S_{\text{Б}} = 100$ МВ·А определить действующее значение периодической составляющей тока к.з. через $t=0,2$ с методом типовых кривых (рис.2).

Решение. 1) Начальное значение периодической составляющей тока к.з. в о.е. будет:

$$I_{\text{ПОГ(Б)*}} = \frac{E^*}{X_{K^*}} = \frac{1,0}{0,19} = 5,26 \text{ о.е.}$$

2) Номинальный ток генераторов в о.е.

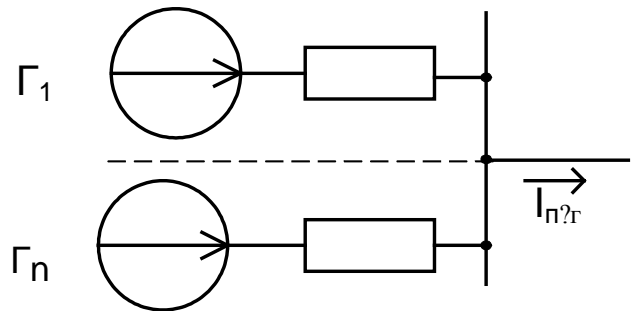


Рис. 2—Схема к примеру 1

при базисных условиях будет: $I_{\text{НОМГ(Б)*}} = \frac{S_{\text{ген}}}{S_{\text{Б}}} = \frac{220}{100} = 2,2 \text{ о.е.}$

а при **номинальных** условиях: $I_{\text{ПОГ(НОМ)*}} = I_{\text{ПОГ(Б)*}} \cdot \frac{S_{\text{Б}}}{S_{\text{НОМГ}}} = 5,26 \cdot 100/220 = 2,4$ о.е.

$$I_{\text{НОМГ(НОМ)*}} = I_{\text{НОМГ(Б)*}} \cdot \frac{S_{\text{Б}}}{S_{\text{НОМГ}}} = 2,2 \cdot 100/220 = 1 \text{ о.е.}$$

3) По типовым кривым (рис.1) при $t = 0,2$ с и удалённости точки к.з. от генераторов при номинальных условиях, равной

$$\frac{I_{\text{ПОГ(НОМ)*}}}{I_{\text{НОМГ(НОМ)*}} = \frac{2,4}{1} = 2,4 ,$$

определяем относительное уменьшение тока:

$$\frac{I_{\text{птГ*}}}{I_{\text{ПОГ*}}} = 0,82,$$

откуда ток от генераторов в относительных единицах будет

$$I_{\text{птГ*}} = 0,82 I_{\text{ПОГ*}} = 0,82 \cdot 5,26 = 4,31 \text{ о.е.}$$

Пример 2.

Для расчетной схемы, приведенной на рис. 3,а, определить для момента времени $t = 1,0$ с методом спрямленных характеристик [2] периодическую составляющую тока и мощность при трехфазном к.з. в точке К.

Параметры элементов расчетной схемы:

- генераторы $\Gamma 1$ и $\Gamma 2$: тип ТВС-30; $S_{\text{НОМ}} = 37,5$ МВ·А; $X_{d^*}'' = 0,153$ о.е.;
- $X_{d^*} = 2,45$ о.е.; $X_{2^*} = 0,187$ о.е.; $T_{d0} = 10,4$ с; $I_{f0^*} = 2,04$ о.е.; $I_{fnp^*} = 2$ о.е.;
- реактор LR : тип РБ-10-1600-10; $U_{\text{НОМ}}=10$ кВ; $I_{\text{НОМ}}=1600$ А; $X_p = 10\%$;

- трансформатор 1: тип ТРДН-40000/110; $S_{НОМ} = 40 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $u_k = 12\%$;
- трансформатор 2: тип ТДН-16000/35; $S_{НОМ} = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $u_k = 8\%$;
- трансформатор 3: тип ТД-40000/110; $S_{НОМ} = 80 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $u_k = 10\%$;
- трансформаторы 4 и 5: тип ТМ-6300/110; $S_{НОМ} = 6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $u_k = 7,5\%$;
- линии электропередачи: W1, длиной $l = 90 \text{ км}$; двухцепная, с тросом АС-70;
- W2, длиной $l = 15 \text{ км}$, одноцепная, с тросом ПС-35;
- нагрузки: Нг1, мощность $5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; Нг2, мощность $8 \text{ МВ} \cdot \text{А}$;
- система С: мощность к.з. в сверхпереходном режиме при трехфазном к.з. за выключателем Q равна $S_K^{(3)} = 2000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$.

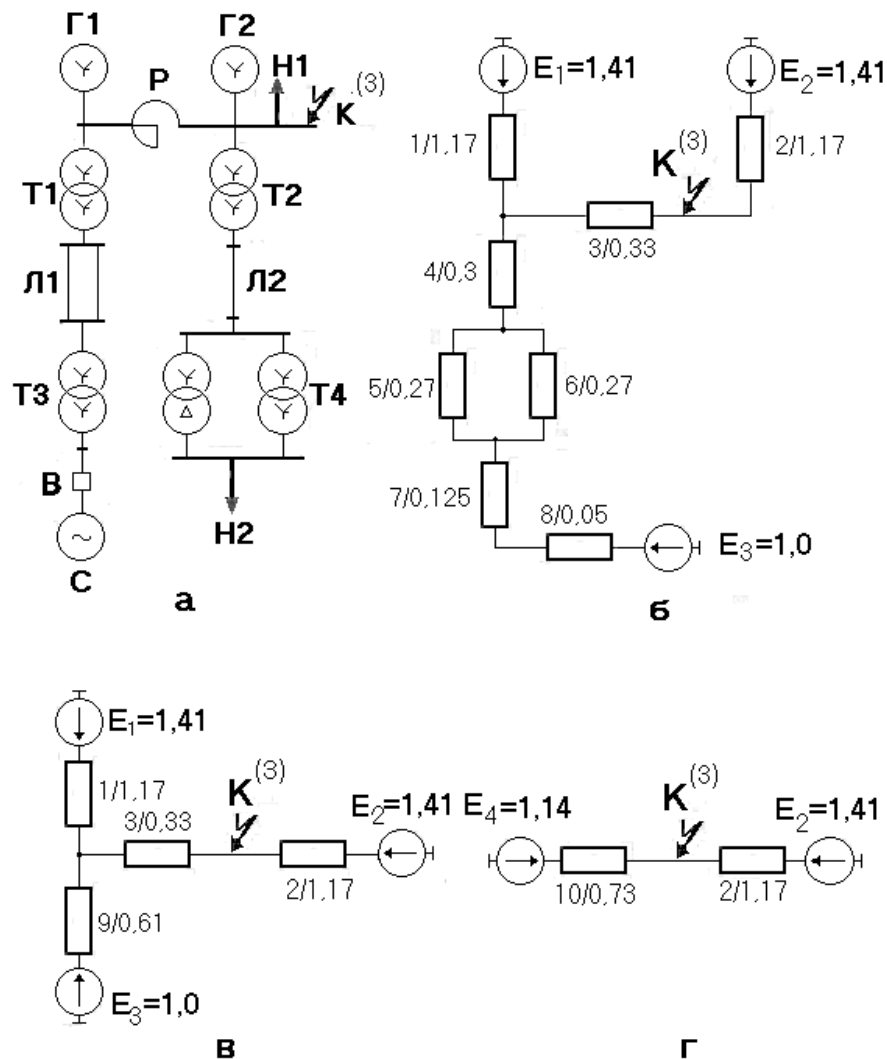


Рис. 3 – Схемы к примеру 2

а- расчетная схема сети; б, в, г – схемы замещения

Решение. Расчет будем вести в относительных единицах с приближенным приведением параметров элементов расчетной схемы к основной ступени напря-

жения (место к.з.). В связи с этим, задаемся базисными условиями: $S_B = 100$ МВА; $U_B = 10,5$ кВ. Тогда базисный ток на основной ступени напряжения будет: $I_B = S_B / \sqrt{3} / U_B = 100 / \sqrt{3} / 10,5 = 5,5$ кА.

Так как к.з. произошло на шинах генератора Г2 и относительно близко от генератора Г1, то задаемся для обоих генераторов режимом предельного возбуждения (РПВ).

В рассматриваемом случае нагрузки Нг1 и Нг2 можно исключить из схемы замещения, так как к.з. на их шинах, а ЭДС нагрузок будут уже равны нулю.

Исходная схема замещения и этапы ее преобразования к простейшему виду представлены на рис.3, б, в, г.

Номинальные параметры генераторов близки к параметрам типового турбогенератора за исключением величины T_{d0} .

По кривым [2] для времени $t' = 1$ с и $I_{f0_s} = 2,0$ определяем

$$E_{1t'^*} = E_{2t'^*} = 1,41 \text{ о. е.}; \quad X_{1t'^*} = X_{2t'^*} = 0,44 \text{ о. е.}$$

По формуле (1) рассчитаем сопротивления генераторов в относительных единицах с учетом принятых базисных условий (опуская при этом индекс относительной величины в обозначении):

$$X_1 = X_2 = X_{1t'^*} \cdot S_B / S_H = 0,44 \cdot 100 / 37,5 = 1,17 \text{ о. е.}$$

Сопротивления других элементов схемы замещения рассчитаны по формулам табл. 1. Их значения приведены на рис.3, б. По формулам [2] рассчитываем **критические** параметры генераторов:

$$X_{крит'} = 1,17 \cdot 1 / (1,41 - 1) = 2,85 \text{ о. е.}; \quad I_{крит'} = 1 / 2,85 = 0,35 \text{ о. е.}$$

Далее произведем преобразования по упрощению исходной схемы замещения (см. рис. 3, б, в, г).

$$X_9 = X_4 + 0,5 \cdot X_5 + X_7 + X_8 = 0,3 + 0,5 \cdot 0,27 + 0,125 + 0,05 = 0,61 \text{ о. е.};$$

$$X_{10} = X_1 // X_9 + X_3 = 1,17 \cdot 0,61 / (1,17 + 0,61) + 0,33 = 0,73 \text{ о. е.};$$

$$E_4 = \frac{E_1 / X_1 + E_3 / X_9}{1 / X_1 + 1 / X_9} = \frac{1,41 / 1,17 + 1 / 0,61}{1 / 1,17 + 1 / 0,61} = 1,14 \text{ о. е.}$$

Согласно схеме рис.3, г периодические составляющие токов от источников будут:

$$\text{от генератора } G_2 - I_{G_2} = E_2 / X_2 = 1,41 / 1,17 = 1,2 \text{ о. е.};$$

$$\text{от системы и генератора } G_1 - I_{G_1,C} = E_4 / X_{10} = 1,14 / 0,73 = 1,56 \text{ о. е.}$$

Величина периодической составляющей тока в месте к.з. будет

$$I_{кт} = I_{G_2} + I_{G_1,C} = 1,2 + 1,56 = 2,76 \text{ о. е.}$$

В именованных величинах этот ток будет иметь величину

$$I_{кт} = I_{кт*} \cdot I_B = 2,76 \cdot 5,5 = 15,23 \text{ кА.}$$

Проверим правильность выбранного режима для генератора G_1 (режим РПВ генератора G_2 проверке не подлежит из-за к.з. на его шинах). Для этого разворачиваем схему рис. 3, г и найдем остаточное напряжение в узле А:

$$U_A = I_{G1,C} \cdot X_3 = 1,56 \cdot 0,33 = 0,51 \text{ о.е.};$$

тогда ток, посылаемый в узел А генератором G_1 , будет

$$I_{G1} = (E_1 - U_A) / X_1 = (1,41 - 0,51) / 1,17 = 0,77 \text{ о.е.}.$$

Видим, что ток генератора G_1 больше его критического тока ($0,77 > 0,35$), что подтверждает **правильность выбранного режима для G_1 (режим РПВ!)**.

Мощность трехфазного к.з. для заданного момента времени t находим по формуле из табл. 1:

$$S_{kt}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 15,23 = 276,65 \text{ МВ} \cdot \text{А}.$$

2.3 Расчет тока несимметричного к.з.

Всякий режим, при котором фазы трехфазной системы находятся в различных условиях, является несимметричным. В электроустановках, выполненных конструктивно симметрично, задача расчета несимметричных режимов наиболее просто решается при использовании метода симметричных составляющих.

Сущность данного метода состоит в замене исходной несимметричной трехфазной системы векторов (токов, напряжений и т.п.) суммой трех симметричных трёхфазных систем векторов или последовательностей: *прямой, обратной и нулевой*.

2.3.1 Составление схем замещения различных последовательностей

При применении метода симметричных составляющих первоочередной задачей является составление схем замещения различных последовательностей. Приведем некоторые рекомендации по их составлению.

Схема замещения прямой последовательности является обычной схемой замещения, которая составляется при расчете токов трехфазного к.з. для рассматриваемого момента времени. Отличие состоит лишь в том, что в месте к.з. (а не в точке!) приложено напряжение прямой последовательности, отличное от нуля и равное $U_{1к}$.

Схема замещения обратной последовательности по структуре близка схеме замещения прямой последовательности. Различие между ними состоит в том, что в схеме обратной последовательности ЭДС всех генерирующих ветвей равны нулю, изменяются лишь сопротивления вращающихся машин, учитываются сопротивления нагрузок, а в месте к.з. приложено напряжение обратной последовательности $U_{2к}$. Все сопротивления этой схемы замещения не зависят от рассматриваемого момента времени к.з.

Схема замещения нулевой последовательности составляется с учетом путей растекания токов нулевой последовательности. Для образования таких путей необходимо, чтобы в цепи, которая электрически связана с точкой к.з., имелась хотя бы одна заземленная нейтраль. Для правильного составления этой схемы замещения построение ее обязательно следует начинать от места к.з., где приложено напряжение нулевой последовательности $U_{0к}$.

2.3.2 Параметры элементов систем электроснабжения в схемах замещения различных последовательностей

Для всех элементов схемы замещения их сопротивления прямой последовательности и ЭДС соответствуют сопротивлениям и ЭДС при симметричном режиме для заданного момента времени t и определяются по табл. 1.

Для элементов, магнитосвязанные цепи которых неподвижны относительно друг друга (например, реактор), сопротивления прямой и обратной последовательности одинаковы.

Для вращающихся машин (генераторы, компенсаторы, двигатели) и обобщенных нагрузок сопротивления обратной последовательности принимают значения в относительных единицах при отсутствии каталожных данных (табл. 3).

Таблица 3 – Сопротивления обратной последовательности

Тип машины	Сопротивление обратной последовательности X_{2*}
Турбогенераторы и машины с демпферными обмотками в обеих осях ротора	$1,22 \cdot X_d''$
Синхронные машины без демпферных обмоток	$1,45 \cdot X_d'$
Обобщенная нагрузка на ступени 6 – 10 кВ	0,35
Обобщенная нагрузка на ступени 35 кВ	0,45
Асинхронный двигатель	0,2
Турбогенераторы и машины с демпферными обмотками в обеих осях ротора в приближенных расчетах	X_d''

Величины же сопротивлений элементов для нулевой последовательности существенно отличаются от их соответствующих сопротивлений в других последовательностях, так как зависят от очень многих факторов. Поэтому величина сопротивления нулевой последовательности генераторов находится в широких пределах: $X_0 = (0,15 - 0,6)X_d''$.

Значения сопротивлений нулевой последовательности трехфазных силовых трансформаторов зависят от конструкции магнитопровода, схем соединения обмоток. На рис.4, а - е приведены основные схемы соединения обмоток трехфазных силовых трансформаторов и соответствующие им схемы замещения нулевой последовательности. Короткое замыкание предполагается на стороне I (слева).

Из рис. 4, а видно, что для трансформатора при к.з. со стороны обмотки, соединенной в звезду с изолированной нейтралью или треугольником, сопротивление нулевой последовательности $X_{0T} = \infty$. Поэтому электрическая сеть, присоединенная со стороны треугольника, не входит в схему нулевой последовательности даже в том случае, если в ней имеются заземленные нейтрали. Такой трансформатор входит в схему замещения нулевой последовательности сопротивлением прямой последовательности.

Для трансформаторов с соединением обмоток по схеме Y_0/Y_0 трансформация токов нулевой последовательности возможна, если только обеспечен путь для токов нулевой последовательности (показан пунктиром на рис. 4, в). Такой трансформатор входит полной схемой в схему замещения нулевой последовательности. Если же этого пути нет, то $X_{0T} = X_I + X_{\mu 0}$. Аналогично определяется реактивное сопротивление нулевой последовательности для трансформатора при соединении его обмоток Y/Y с изолированными нейтральными.

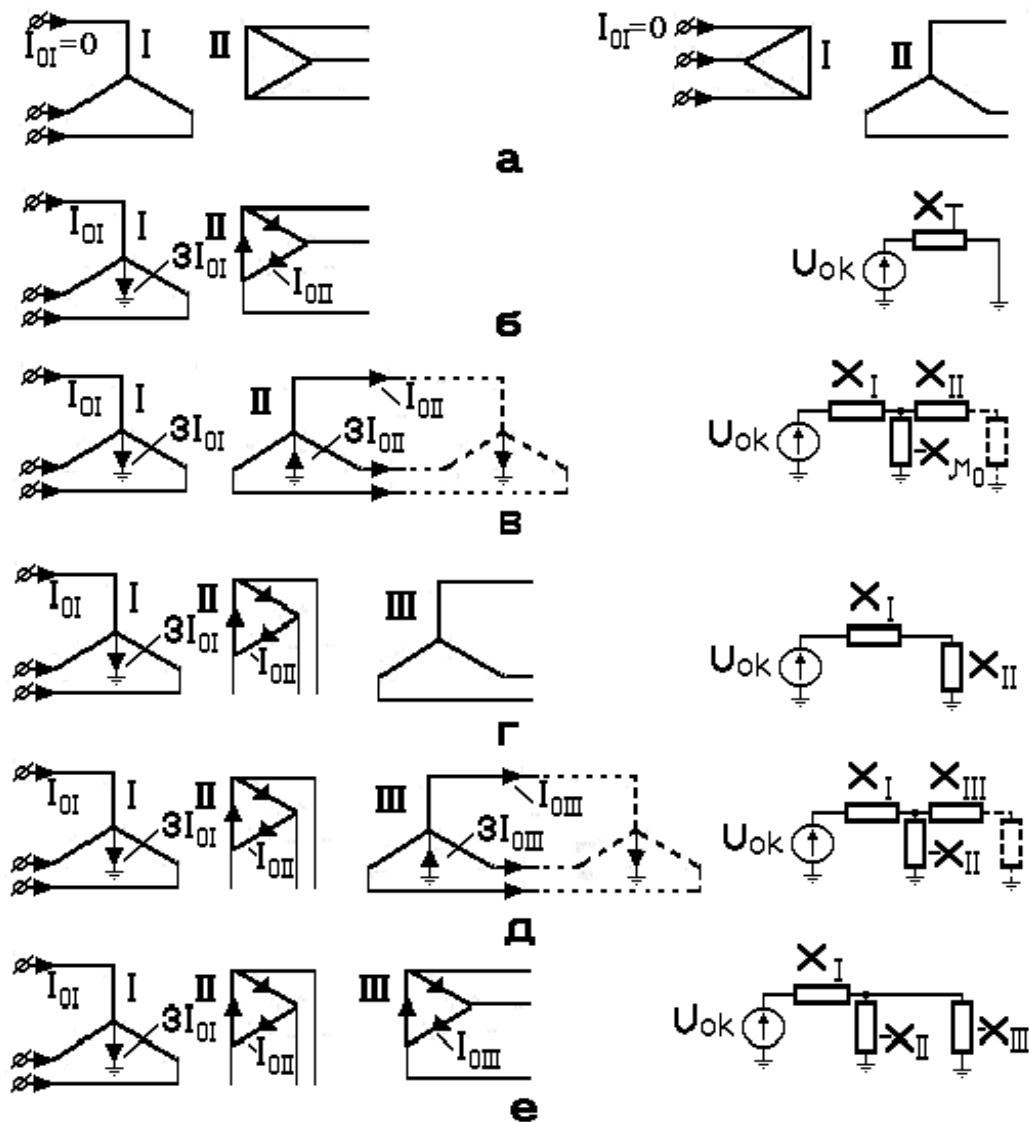


Рис. 4 – Соединения обмоток трансформаторов и их схемы замещения для токов нулевой последовательности

Значение сопротивления ветви холостого хода $X_{\mu 0}$ зависит от конструкции трансформатора. Для группы однофазных, трехфазных четырехстержневых и броневых трансформаторов $X_{\mu 0} = \infty$, для трехфазных трехстержневых трансформаторов $X_{*\mu 0} = 0,3 - 1,0$ о.е. Основные варианты соединения обмоток

трехобмоточных трансформаторов и соответствующие им схемы замещения нулевой последовательности приведены на рис. 4 г, д, е.

Нейтраль трансформатора в общем случае может быть заземлена через некоторое сопротивление X_N . При этом следует учитывать, что сопротивления, устанавливаемые в цепи нейтрали трансформаторов, генераторов и других элементов сети, вводятся в схему нулевой последовательности утроенной величиной. При глухозаземленной нейтрали следует считать $X_N = 0$.

Сопротивления нулевой последовательности воздушных и кабельных линий зависят от числа цепей (жил), наличия защитных тросов (для воздушных линий).

При выполнении курсовой работы для определения сопротивлений нулевой последовательности воздушных линий следует использовать данные табл. 4.

Таблица 4 – Сопротивления нулевой последовательности

Характеристика линии	X_0 / X_1
Одноцепная без тросов	3,5
Одноцепная со стальными тросами	3,0
Одноцепная с хорошо проводящими тросами	2,0
Двухцепная без тросов	5,5
Двухцепная со стальными тросами	4,7
Двухцепная с хорошо проводящими тросами	3,0

Для кабелей в зависимости от пути тока нулевой последовательности (только по оболочке или по оболочке и земле) сопротивление нулевой последовательности находится в пределах $X_0 = (3,5 - 4,6)X_1$.

2.3.3 Преобразования и упрощения схем замещения последовательностей

Следующий этап расчета несимметричного режима состоит в определении результирующих сопротивлений схем замещения отдельных последовательностей относительно места, где возникла несимметрия. Из схемы замещения прямой последовательности на этом этапе определяют также результирующую ЭДС источников относительно места несимметрии.

При преобразованиях схем замещения следует учитывать, что **началом** любой схемы считают точку, в которой объединены свободные концы всех генерирующих и нагрузочных ветвей: это точка нулевого потенциала схемы замещения соответствующей последовательности (земля).

Концом любой схемы считают точку, где возникла несимметрия.

2.3.4 Расчет тока в месте несимметрии

В [1-4] показано, что токи обратной и нулевой последовательностей пропорциональны току прямой последовательности в месте к.з. Следовательно, задача расчета любого несимметричного к.з. состоит, прежде всего, в определении тока прямой последовательности в месте рассматриваемого вида к.з.

Согласно правилу эквивалентности прямой последовательности, ток прямой последовательности любого несимметричного к.з. в общем случае может быть определен как ток при трехфазном к.з. в точке схемы, удаленной от действительного места к.з. на дополнительное сопротивление $\Delta X^{(n)}$, величина которого не зависит от параметров схемы замещения прямой последовательности и для каждого вида к.з. определяется согласно табл. 5.

Для вычисления тока прямой последовательности могут быть использованы методы расчета, применяемые при вычислении тока трехфазного к.з.

$$I_{1k}^{(n)} = \frac{E_{1\Sigma\phi}}{j(X_{1\Sigma} + \Delta X^{(n)})}, \quad (10)$$

где n – вид к. з.; $E_{1\Sigma\phi}, X_{1\Sigma}$ - результирующая ЭДС (фазная) и суммарное реактивное сопротивление схемы замещения прямой последовательности относительно места к.з.; $\Delta X^{(n)}$ - дополнительное сопротивление, величина которого не зависит от времени t и для каждого вида к.з. определяется по табл. 5.

Так как действительный полный ток в месте к.з. пропорционален току прямой последовательности в месте к.з., модуль фазного тока в месте любого (n) несимметричного к.з. можно представить в общем виде как

$$|I_k^{(n)}| = m^{(n)} \cdot I_{1k}^{(n)}, \quad (11)$$

где $m^{(n)}$ - коэффициент пропорциональности (модуль), зависящий от вида к.з., значение которого определяется по табл. 5.

Таблица 5 – Параметры шунтов и модулей при несимметричных к.з.

Вид к.з. $K^{(n)}$	n	$\Delta X^{(n)}$	$m^{(n)}$
Трёхфазное $K^{(3)}$	3	0	1
Двухфазное $K^{(2)}$	2	$X_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
Однофазное $K^{(1)}$	1	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	3
Двухфазное на землю $K^{(1.1)}$	1.1	$X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}$	$\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$

Пример 3

Для условий **примера 2** определить периодическую составляющую тока **однофазного** к.з. для начального момента времени.

Решение. Схема замещения прямой последовательности приведена на рис.5, а ее параметры определены по формулам табл.1.

Увеличение начального тока прямой последовательности за счет подпитки от двигателей нагрузки при несимметричном к.з. всегда меньше, чем при трехфазном к.з. из-за большей величины остаточного напряжения прямой последовательности в месте к.з. по сравнению с его величиной при трехфазном к.з.

Кроме того, сопротивления нагрузок $N_{Г1}$ и $N_{Г2}$, подключенных к месту к.з., в данной схеме на порядок больше сопротивлений генерирующих ветвей,

что позволяет отбросить нагрузочные ветви в схеме прямой последовательности. При необходимости нагрузки учитывают в соответствии [1-3].

Результирующее сопротивление схемы замещения прямой последовательности относительно точки к.з. определяется после преобразований согласно рис. 5, б, в и г, где $X_{15} = 0,61 \text{ о.е.}$ (см. пример 2),

$$X_{16} = X_1 // X_{15} + X_3 = 0,408 \cdot 0,61 / (0,408 + 0,61) + 0,327 = 0,571 \text{ о.е.};$$

$$X_{17} = X_{1\Sigma} = X_2 // X_{16} = 0,408 // 0,571 = 0,237 \text{ о.е.}$$

При учете сопротивлений цепей нагрузок $H_{Г1}$ и $H_{Г2}$ величина $X_{1\Sigma} = 0,221 \text{ о.е.}$

Определим результирующую ЭДС схемы относительно места к.з., проведя преобразования согласно рис. 5, б, в и г:

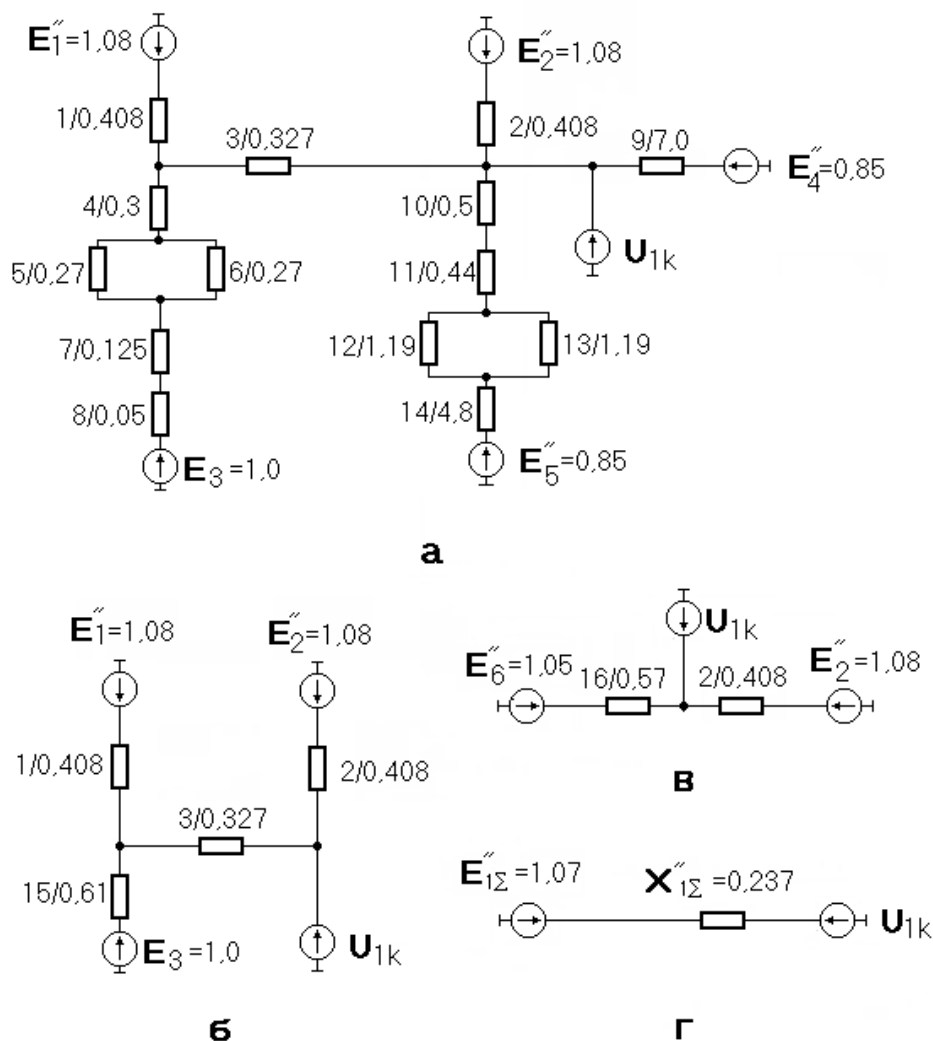


Рис.5 – Схема замещения прямой последовательности
а- исходная схема замещения; б, в, г- этапы ее преобразования

$$E_6'' = (E_1'' / X_1 + E_3'' / X_{15}) / (1 / X_1 + 1 / X_{15}) = (1,08 / 0,406 + 1 / 0,61) / (1 / 0,408 + 1 / 0,61) = 1,05 \text{ о.е.};$$

$$E_7'' = E_{1\Sigma}'' = (E_6'' / X_{16} + E_2'' / X_2) / (1 / X_{16} + 1 / X_2) = 1,07 \text{ о.е.}$$

При учете ЭДС нагрузок $N_{Г1}$ и $N_{Г2}$ величина $E''_{1\Sigma} = 1,055 \text{ о.е.}$

Параметры элементов схемы замещения обратной последовательности определяются согласно предыдущим указаниям (рис. 6).

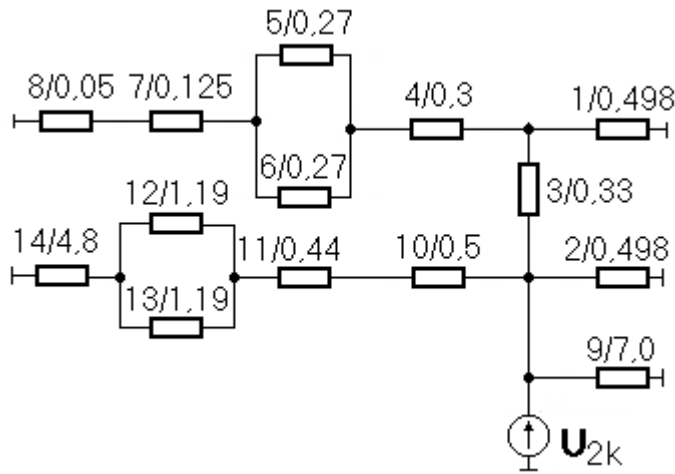


Рис.6 – Схема замещения обратной последовательности

Для системы сопротивления прямой и обратной последовательностей принимаем равными друг другу, а для генераторов находим

$$X_{1(2)} = X_{2(2)} = X_{2*} \cdot S_B / S_H = 0,187 \cdot 100 / 37,5 = 0,498 \approx 0,5 \text{ о.е.}$$

Выполняя преобразования, аналогичные преобразованиям для схемы замещения прямой последовательности, получим $X_{2\Sigma} = 0,25 \text{ о.е.}$

Схему замещения нулевой последовательности (рис. 7) составляем, идя от точки к.з. Контур циркуляции токов нулевой последовательности образуют генераторы, реактор, линии и трансформаторы с заземленными нейтральными. Трансформаторы T_1, T_2 и T_3 с заземленными нейтральными входят в схему нулевой последовательности полной схемой замещения.

Параметры элементов схемы замещения согласно указаниям п.2.2.2. будут:

$$X_{1(0)} = X_{2(0)} = 0,4 \cdot 0,153 \cdot 100 / 37,5 = 0,16 \text{ о.е.};$$

$$X_{4(0)} = X_{6(0)} = 0,5 \cdot 12 \cdot 100 / 100 / 40 = 0,15 \text{ о.е.};$$

$$X_{5(0)} = 0,5 \cdot 100 / 40 = 1,25 \text{ о.е.}; \quad X_{7(0)} = X_{8(0)} = 3 \cdot 0,4 \cdot 90 \cdot 100 / 115^2 = 0,81 \text{ о.е. и т.д.}$$

Для определения $X_{0\Sigma}$ относительно точки к.з. выполняем преобразования, аналогичные преобразованиям, приведенным в данном примере для схемы прямой последовательности: $X_{0\Sigma} = 0,11 \text{ о.е.}$

Дополнительное сопротивление согласно табл.5 будет:

$$\Delta X^{(1)} = 0,25 + 0,11 = 0,36 \text{ о.е.}$$

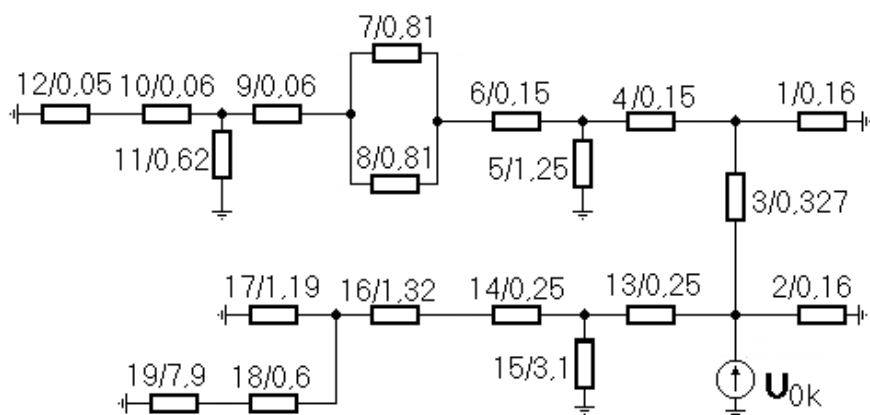


Рис. 7 – Схема замещения нулевой последовательности

Ток прямой последовательности в месте к.з. будет:

$$I_{1k}^{(1)} = 1,07 / (0,237 + 0,36) = 1,78 \text{ о.е.}$$

Периодическая составляющая тока однофазного к.з. в именованных единицах в точке к.з. будет:

$$I_k^{(1)} = 3 \cdot 1,78 \cdot 5,5 = 29,4 \text{ кА.}$$

Векторные диаграммы для несимметричных режимов представлены в литературе [1–4].

Литература

- 1 Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: Учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 283с.
- 2 Переходные процессы в электроэнергетических системах: Учебник / под ред. И.П. Крючкова и др. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 416 с.
- 3 Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 412 с.
- 4 Окуловская Т. Я, Паниковская Т.Ю., Смирнов В.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. 4-е изд. – Екатеринбург. УГТУ-УПИ, 2006. – 90 с.
- 5 ГОСТ Р 52735–2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ. – М.: Стандартинформ, 2007. – 39 с.
- 6 Расчет токов короткого замыкания. Методические указания к курсовому проектированию для студентов направления 140200 (специальность 140211 «Электроснабжение»)/Сост. В.И. Мошкин. – Курган, Изд-во КГУ, 2007.–31с.
- 7 Расчет коротких замыканий. Методические указания к выполнению курсового проекта для студентов направления 140200 (специальность 140211 «Электроснабжение»)/Сост. В.Н. Серебряков. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2003.–29с.

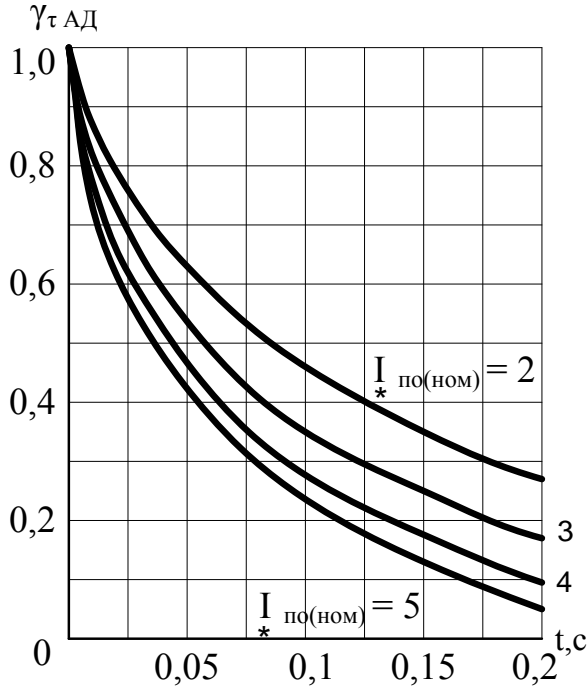
Приложение 1 –Токи и напряжения в месте к.з. при несимметричных коротких замыканиях

Сводная таблица основных расчетных формул

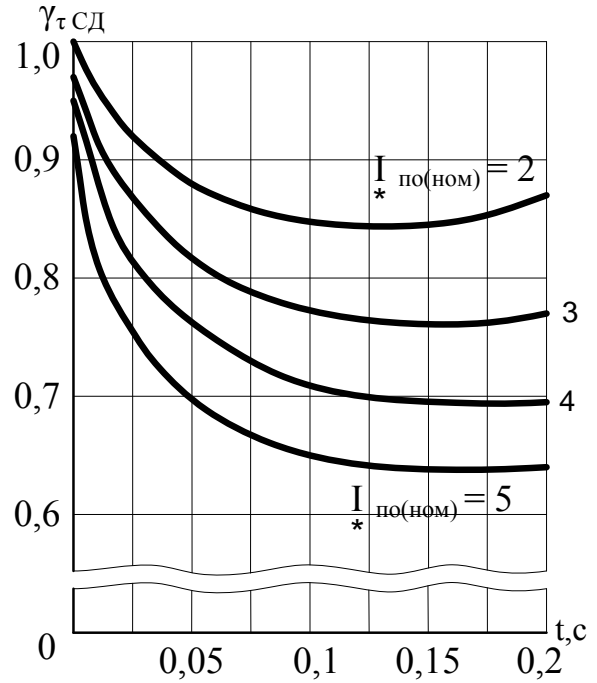
Наименование и обозначение определяемых величин		Виды коротких замыканий		
		Двухфазное	Однофазное	Двухфазное на землю
Токи в месте короткого замыкания: прямой последовательности фазы <i>a</i>	$\dot{I}_{a1} =$	$\frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma})}$	$\frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j(x_{1\Sigma} + x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})}$	$\frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j\left(x_{1\Sigma} + \frac{x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}\right)}$
	обратной последовательности фазы <i>a</i>	$\dot{I}_{a2} = -\dot{I}_{a1}$	\dot{I}_{a1}	$-\dot{I}_{a1} \frac{x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
	нулевой последовательности	$\dot{I}_0 = 0$	\dot{I}_{a1}	$-\dot{I}_{a1} \frac{x_{2\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}$
	фазы <i>a</i>	$\dot{I}_a = 0$	$3\dot{I}_{a1} = 3\dot{I}_0$	0
	фазы <i>b</i>	$\dot{I}_b = -j\sqrt{3}\dot{I}_{a1}$	0	$\left(a^2 - \frac{x_{2\Sigma} + ax_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}\right)\dot{I}_{a1}$
	фазы <i>c</i>	$\dot{I}_c = j\sqrt{3}\dot{I}_{a1}$	0	$\left(a - \frac{x_{2\Sigma} + a^2x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}\right)\dot{I}_{a1}$
	Напряжения в месте короткого замыкания: прямой последовательности фазы <i>a</i>	$\dot{U}_{a1} =$	$jx_{2\Sigma} \dot{I}_{a1}$	$j(x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma})\dot{I}_{a1}$
обратной последовательности фазы <i>a</i>	$\dot{U}_{a2} =$	$jx_{2\Sigma} \dot{I}_{a1}$	$-jx_{2\Sigma} \dot{I}_{a1}$	$j\left(\frac{x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}\right)\dot{I}_{a1}$
нулевой последовательности	$\dot{U}_0 =$	0	$-jx_{0\Sigma} \dot{I}_{a1}$	$j\left(\frac{x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}\right)\dot{I}_{a1}$
фазы <i>a</i>	$\dot{U}_a =$	$2jx_{2\Sigma} \dot{I}_{a1}$	0	$3j\left(\frac{x_{2\Sigma}x_{0\Sigma}}{x_{2\Sigma} + x_{0\Sigma}}\right)\dot{I}_{a1}$
фазы <i>b</i>	$\dot{U}_b =$	$-jx_{2\Sigma} \dot{I}_{a1}$	$j[(a^2 - a)x_{2\Sigma} + (a^2 - 1)x_{0\Sigma}]\dot{I}_{a1}$	0
фазы <i>c</i>	$\dot{U}_c =$	$-jx_{2\Sigma} \dot{I}_{a1}$	$j[(a - a^2)x_{2\Sigma} + (a - 1)x_{0\Sigma}]\dot{I}_{a1}$	0

Приложение 2— Типовые кривые для двигателей [5]

Изменение периодической составляющей тока КЗ от асинхронных двигателей



Изменение периодической составляющей тока КЗ от синхронных двигателей



Приложение 3 – Образец бланка задания

Курганский государственный университет
Кафедра «Энергетика и технология металлов»

Задание на курсовую работу по дисциплине: «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах»

студенту Иванову И.И. группы ТС3 -30615

Направление: 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

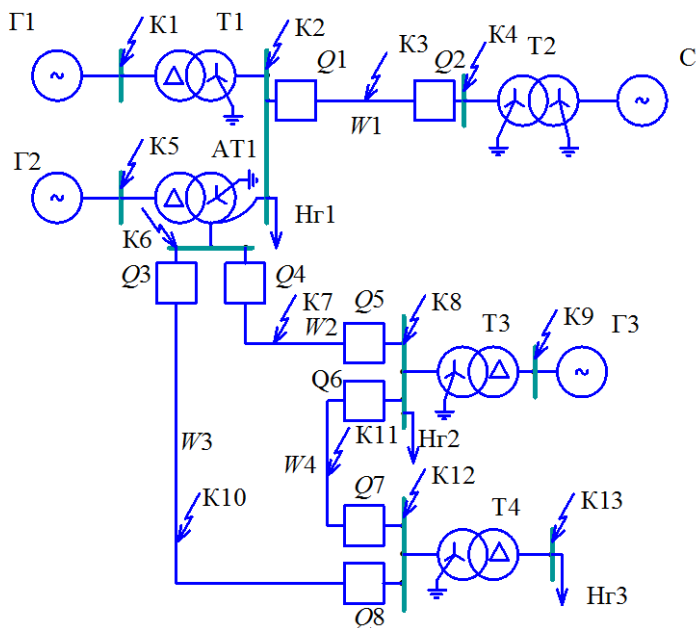
Тема работы: «Расчёт токов коротких замыканий»

Исходные данные для проектирования:

Обозначение	Технические данные оборудования и линий электропередачи
ТГ1	$P_{НОМ} = 63 \text{ МВт}; U_{НОМ} = 10,5 \text{ кВ}; \cos\varphi_{НОМ} = 0,85; x_{d*}'' = 0,136 \text{ о.е.}; x_{2*} = 0,166 \text{ о.е.}$
ТГ2	$P_{НОМ} = 110 \text{ МВт}; U_{НОМ} = 10,5 \text{ кВ}; \cos\varphi_{НОМ} = 0,85; x_{d*}'' = 0,189 \text{ о.е.}; x_{2*} = 0,23 \text{ о.е.}$
ТГ3	$P_{НОМ} = 32 \text{ МВт}; U_{НОМ} = 6,3 \text{ кВ}; \cos\varphi_{НОМ} = 0,8; x_{d*}'' = 0,143 \text{ о.е.}; x_{2*} = 0,174 \text{ о.е.}$
АТ1	$S_{НОМ} = 200 \text{ МВ}\cdot\text{А}; u_{\text{КВ-С}} = 11 \%; u_{\text{КВ-Н}} = 32 \%; u_{\text{КС-Н}} = 20 \%; k = 11/121/230 \text{ кВ}$
Т1	$S_{НОМ} = 80 \text{ МВ}\cdot\text{А}; u_{\text{К}} = 11 \%; k = 10,5/242 \text{ кВ}$
Т2	$S_{НОМ} = 63 \text{ МВ}\cdot\text{А}; u_{\text{К}} = 10 \%; k = 230/121 \text{ кВ}$
Т3	$S_{НОМ} = 80 \text{ МВ}\cdot\text{А}; u_{\text{К}} = 11 \%; k = 121/6,3 \text{ кВ}$
Т4	$S_{НОМ} = 40 \text{ МВ}\cdot\text{А}; u_{\text{К}} = 10,5 \%; k = 115/11 \text{ кВ}$
W1-W4	$L_1 = 120 \text{ км}; L_2 = 60 \text{ км}; L_3 = 100 \text{ км}; L_4 = 70 \text{ км}$
НГ1	$P_{НГ} = 40 \text{ МВт}; \cos\varphi_{НГ} = 0,75$
НГ2	$P_{НГ} = 20 \text{ МВт}; \cos\varphi_{НГ} = 0,82$
НГ3	$P_{НГ} = 25 \text{ МВт}; \cos\varphi_{НГ} = 0,73$
С	$S_{\text{К}} = 1000 \text{ МВ}\cdot\text{А}$

Вариант задания № 2-1

Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Точка к.з. и вид аварии	
Вкл.	Вкл.	Откл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Вкл.	Откл.	K1 ⁽³⁾	K1 ⁽¹⁾



Необходимо:

- 1 – начертить расчетную схему согласно **своему** варианту задания;
- 2 – выполнить расчет аналитическим способом сверхпереходного и ударного токов трехфазного к.з., используя приближенное приведение параметров в относительных единицах;
- 3 – выполнить расчет периодической составляющей тока трехфазного к.з. к моменту $t=0,3 \text{ с}$, используя типовые кривые;
- 4 – выполнить расчет аналитическим способом сверхпереходного и ударного токов однофазного к.з., построение векторных диаграмм токов и напряжений.

Руководитель работы _____ / _____ /

Мошкин Владимир Иванович

**РАСЧЕТ ТОКОВ
КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

Методические указания и задания
к выполнению курсовой работы
по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы
в электроэнергетических системах»
для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
(профиль «Электроснабжение»)

Авторская редакция

Подписано в печать 05.04.18

Формат 60x84 1/16

Бумага . 65 г/м²

Печать цифровая

Усл. печ. л. 2,00

Уч.-изд. л. 2,00

Заказ №74

Э/в

Не для продажи

Библиотечно-издательский центр КГУ.

640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.

Курганский государственный университет.