

С. В. Хавроничев, И. Ю. Рыбкина

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
КАМЫШИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

С. В. Хавроничев, И. Ю. Рыбкина

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие



Волгоград
2012

УДК 621.3.064.1(075)

X 12

Рецензенты: д. т. н., профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Саратовского государственного технического университета С. Ф. Степанов; кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий» СГТУ

Хавроничев, С. В. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМКЯНИЙ И ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ: учеб. пособие / С. В. Хавроничев, И. Ю. Рыбкина. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. – 56 с.

ISBN 978-5-9948-0952-5

Приведены краткие теоретические сведения о расчете тока трехфазного короткого замыкания (КЗ), а также о расчете токов несимметричных коротких замыканий. Рассмотрен расчет сопротивлений различных элементов электроустановки.

Предназначено в помощь студентам ВПО очной и заочной форм обучения при выполнении семестрового задания по дисциплине «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах», курсового проекта по дисциплине «Электрические станции и подстанции», а также соответствующих разделов выпускной квалификационной работы бакалавра по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

Ил. 17. Табл. 9. Библиогр.: 5 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Волгоградского государственного технического университета

ISBN 978-5-9948-0952-5

Волгоградский
государственный
технический
университет, 2012

ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящего учебного пособия является оказание помощи студентам при самостоятельном изучении методов расчетов токов короткого замыкания и проведении самих расчетов в период курсового проектирования по предмету «Электрические станции и подстанции», а также при выполнении семестрового задания по предмету «Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах».

Пособие содержит основы методики расчетов токов короткого замыкания, примеры расчетов и необходимые при проектировании справочные данные.

Студентам рекомендуется вначале изучить физические процессы короткого замыкания по основной учебной литературе. Явление короткого замыкания протекает по-разному в зависимости от видов короткого замыкания, мощности питающих источников (бесконечной или ограниченной мощности), удаленности точки короткого замыкания от источника питания и т. д.

Только усвоив предварительно особенности процессов короткого замыкания, протекающих в различных условиях, можно обоснованно выбрать нужный метод расчета, правильно подобрать справочный материал и использовать в качестве образца тот или иной пример расчета.

На точность расчетов, а, следовательно, и на их методику существенно влияет цель расчетов токов короткого замыкания. В данном пособии рассматриваются методы расчетов, которые используются для выбора электрооборудования. Для целей проектирования релейной защиты, как правило, применяют более точные методы токов короткого замыкания, которые в пособии не рассматриваются. В этих случаях нужно пользоваться специальной литературой.

При изучении настоящего пособия очень важно обратить внимание на принципы составления расчетных схем, схем замещения и выражений для определения сопротивления цепи короткого замыкания, как в относительных единицах, так и в именованных.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ О РАСЧЕТЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

А. Определение величины:

I_{γ} – начальный сверхпереходный ток, необходимый для определения ударного тока;

i_y – ударный ток КЗ, необходимый для проверки электрических аппаратов, шин и изоляторов на динамическую устойчивость;

I_{kt} – действующее значение полного тока КЗ для некоторого момента времени, необходимо для выбора по отключающей способности выключателей высокого напряжения;

I_{∞} – действующее значение установившегося тока КЗ, необходимо для проверки электрооборудования на термическую устойчивость;

S_{kt} – мощность короткого замыкания для момента времени t , необходимая для проверки выключателей по отключаемой ими мощности.

Б. Допущения при расчетах:

В установках напряжением до 1000 В и выше при определении токов короткого замыкания для целей выбора аппаратов и проводников *допускают целый ряд упрощений.*

1. Считают трехфазную систему симметричной.

2. Короткое замыкание наступает в такой момент времени, при котором ток КЗ будет иметь наибольшее значение.

3. Электродвижущие силы источников питания, значительно удаленных от места КЗ ($X_{*расч} > 3$), считаются неизменными.

4. В электроустановках напряжением выше 1000 В пренебрегают активным сопротивлением элементов цепи КЗ.

5. В случае питания электрических сетей напряжением до 1000 В от понижающих трансформаторов исходят из того, что подведенное к трансформатору напряжение неизменно и равно его номинальному напряжению.

В. Базисные условия:

Для вычисления тока цепи короткого замыкания определяют результирующее сопротивление этой цепи. Так как элементы цепи КЗ могут оказаться под различными номинальными напряжениями, то определять результирующее сопротивление цепи обычными методами, известными из курса электротехники, нельзя. Чтобы не допустить ошибки при определении результирующего сопротив-

ления, все сопротивления элементов цепи, выраженные в относительных единицах, следует привести к одной общей величине. Такой одинаковой для различных ступеней напряжения величиной будет только мощность.

Произвольно выбранную и одинаковую для всех ступеней напряжения мощность называют базисной и обозначают: S_6 .

Выбор величины базисной мощности в каждом конкретном случае производят исходя из соображений наибольшего возможного упрощения вычислительной работы, целесообразно S_6 принимать равной 100, 1000 МВА и т. д. или брать ее равной номинальной мощности источника питания. В последнем случае упрощаются расчетные формулы.

Если базисную мощность выбирают одинаковой для всех ступеней напряжения, то величину базисного напряжения выбирают для одной ступени. Наиболее удобно принимать базисное напряжение равным среднему номинальному напряжению $U_{ср}$ той ступени, для которой определяется ток короткого замыкания. Это напряжение называется расчетным напряжением ступени и должно быть на 5 % выше номинального напряжения сети.

Шкала расчетных напряжений:

231; 115; 37; 10,5; 6,3; 0,69; 0,4 кВ.

Если величины базисного напряжения и базисной мощности выбраны, то величину базисного тока уже не имеем права выбирать произвольно. Она определяется по формуле 16.

Рассмотренные базисные величины вводят для того, чтобы оперировать с сопротивлениями, выраженными в относительных единицах. Если расчет токов КЗ ведут в именованных единицах, то для того чтобы не допустить ошибки при определении результирующего сопротивления цепи, все сопротивления пересчитывают к тому напряжению, для которого составлена схема замещения.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ И ПРИВЕДЕНИЕ ИХ К БАЗИСНЫМ УСЛОВИЯМ

Относительные сопротивления при номинальных условиях определяются по формулам:

$$X_{*n} = \frac{\sqrt{3} I_n X}{U_n} = X \frac{S_n}{U_n^2}, \quad (1)$$

где U_n – номинальное междуфазное напряжение, кВ; I_n – номинальный ток, кА; S_n – номинальная мощность, МВА;

$$R_{*n} = \frac{\sqrt{3} I_n R}{U_n} = R \frac{S_n}{U_n^2}, \quad (2)$$

$$Z_{*n} = \sqrt{R_{*n}^2 + X_{*n}^2}, \quad (3)$$

где Z ; X ; R – соответственно полное, реактивное и активное сопротивления данного участка цепи, Ом.

Звездочками в индексе отмечают сопротивления, выраженные в относительных единицах, индексом n – номинальные условия.

Сопротивления элементов электроустановки задаются либо в именованных единицах (воздушные и кабельные линии), либо в относительных единицах, приведенных к номинальным условиям (генераторы, трансформаторы, реакторы).

К базисным условиям эти сопротивления приводят с помощью следующих формул:

В общем случае:

$$X_{*б} = X_{*n} \frac{S_б}{S_n}, \quad (4)$$

где X_{*n} – относительное номинальное сопротивление; $X_{*б}$ – относительное базисное сопротивление; $S_б$ – базисная мощность МВА; S_n – номинальная мощность в МВА.

Если базисную мощность выбирают равной номинальной мощности питающих источников, то формула (4) упрощается:

$$X_{*б} = X_{*n}. \quad (4.1)$$

В конкретных случаях:

1. *Сопротивление синхронных генераторов:*

$$X_{*б} = X_{*d}'' \frac{S_б}{S_n}, \quad (5)$$

где X_{*d}'' – относительное сверхпереходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси полюсов.

Относительное сверхпереходное реактивное сопротивление генератора по продольной оси полюсов X_{*d}'' задается заводами-изготовителями (табл. 1).

Таблица 1

Сверхпереходные сопротивления некоторых дизель-генераторов

Тип	Мощность, кВт	Напряжение, кВ	X_{*d}
СД-323-5/20	400	0,4	0,2
	400	6,3	0,21
СРС-1370-750	1100	6,3	0,136

При отсутствии точных данных используют средние значения сверхпереходных сопротивлений:

- для генераторов – 0,725;
- для дизель-генераторов быстроходных – 0,14;
- для дизель-генераторов тихоходных – 0,165;
- для синхронных и асинхронных двигателей – 0,20.

2. Сопротивление трансформаторов:

Для силовых трансформаторов при номинальной мощности

$$S_{н.т.} \geq 750 \text{ кВА},$$

$$X_{*б} = \frac{u_k \%}{100} \frac{S_{б}}{S_{н.т.}}, \quad (6)$$

где $u_k \%$ – напряжение короткого замыкания в процентах, определяемое по паспортным данным.

Для маломощных силовых трансформаторов

$$X_{*б} = \sqrt{\frac{u_k \%}{100}^2 + R_{*н}^2} \frac{S_{б}}{S_{н.т.}}, \quad (7)$$

где $R_{*н} = \frac{\Delta P}{S_{н.т.}}$; ΔP – потери в меди трансформаторов в кВт;

$S_{н.т.}$ – номинальная мощность трансформатора в кВА.

Активное сопротивление трансформатора, приведенное к базисной мощности

$$R_{*б} = R_{*н} \frac{S_{б}}{S_{н.т.}}. \quad (8)$$

Для трехобмоточных трансформаторов задаются три значения напряжения короткого замыкания по парам обмоток $U_{кВН}$, $U_{кВС}$, $U_{кСН}$. По каталожным значениям напряжений КЗ для пар обмоток

$U_{кВН}\%$, $U_{кВС}\%$, $U_{кСН}\%$ определяются напряжения КЗ для лучей схемы замещения:

$$U_{кВ}\% = 0,5(U_{кВН} + U_{кВС} - U_{кСН}); \quad (9)$$

$$U_{кС}\% = 0,5(U_{кВС} + U_{кСН} - U_{кВН}); \quad (10)$$

$$U_{кН}\% = 0,5(U_{кВН} + U_{кСН} - U_{кВС}). \quad (11)$$

По найденным значениям $U_{кВ}\%$, $U_{кС}\%$, $U_{кН}\%$ определяются реактивные сопротивления обмоток $X_{ТВ}$, $X_{ТС}$, $X_{ТН}$ по выражению (6), аналогичному для двухобмоточного трансформатора. Реактивное сопротивление одного из лучей схемы замещения трехобмоточного трансформатора (обычно среднего напряжения) близко к нулю.

3. Сопротивление реакторов:

$$X_{*б} = \frac{X_p\%}{100} \frac{S_б}{S_{н.р.}}, \quad (12)$$

где $X_p, \%$ – реактивное сопротивление реактора в процентах, берётся из справочников.

4. Сопротивления воздушных и кабельных линий:

$$X_{*б} = X_0 l \frac{S_б}{U_{cp}^2}; \quad (13)$$

$$R_{*б} = R_0 l \frac{S_б}{U_{cp}^2}, \quad (14)$$

где l – длина линии в км; $S_б$ – базисная мощность в МВА; U – расчетное напряжение ступени в кВ; X_0 , R_0 – соответственно реактивное и активное сопротивления 1 км линий в Ом/км.

3. РАСЧЁТНАЯ СХЕМА И СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ

Для вычисления токов короткого замыкания составляется расчетная схема, представляющая собой упрощенную однолинейную схему установки (рис. 1). Расчетная схема должна соответствовать нормальному режиму работы электроустановки в условиях длительной ее эксплуатации. Кратковременные изменения в системе электроснабжения при выборе расчетной схемы не учитываются.

В схему включаются генераторы, силовые трансформаторы, воздушные и кабельные линии, реакторы и наносятся: параметры, необходимые для расчета: номинальные напряжения и мощности,

длины линий, материал и сечения проводов (кабелей) или индуктивные сопротивления линий (при необходимости и активные сопротивления).

Сопротивления выключателей, разъединителей и других аппаратов, также соединительных кабелей и шин в распределительных устройствах напряжением выше 1000 В не учитываются и сами элементы на расчетную схему не наносятся.

После составления расчетной схемы на ней определяются те точки, для которых следует определить ток КЗ. Эти точки называются расчетными точками короткого замыкания. Для определения числа и мест точек короткого замыкания прежде всего нужно знать какое электрооборудование расчетной схемы подлежит проверке на устойчивость от действия токов КЗ (ПУЭ п. п. 1.4.1, 1.4.2 и 1.4.3).

Расчетные точки намечаются так, чтобы по выбираемому оборудованию протекал наибольший ток КЗ, т. е. чтобы оборудование попадало в наиболее тяжелые условия. Исключение представляет выбор отключающих аппаратов на реактированных линиях. В последнем случае расчетная точка берется за реактором. Так, например, для проверки на действие токов КЗ шин 10 кВ намечена точка К-1, для выбора отключающих аппаратов реактированной линии – точка К-2 (см. рис. 1).

Сопротивления элементов расчетной схемы задаются различными единицами измерения: именованными, в процентах, относительными номинальными величинами. Это вызывает необходимость для определения результирующего сопротивления цепи КЗ расчетную схему заменять эквивалентной схемой замещения, в которой бы все сопротивления были выражены в одних и тех же единицах и приведены к одинаковым условиям.

Схема замещения составляется, как правило, для каждой точки КЗ. Все элементы на схемах замещения показываются в виде индуктивных и активных сопротивлений. Для установок напряжением выше 1000 В сопротивления обычно выражаются в относительных единицах, а для установок напряжением ниже 1000 В – в именованных единицах.

Все сопротивления на схеме замещения нумеруются в виде дроби, числителем которой является порядковый номер элемента, а знаменателем – его величина. На схеме замещения указываются

также средние номинальные напряжения ступеней (рис. 2).

При вычислении сопротивлений в относительных единицах все сопротивления приводятся к базисным условиям. При производстве расчетов в именованных единицах все сопротивления приводятся к той ступени напряжения, где находится расчетная точка (приложение А).

Схема замещения постепенно упрощается путем эквивалентных преобразований, и сводится к одному результирующему сопротивлению. При этом допустимо для определения полных сопротивлений (Z) элементов, соединенных параллельно или последовательно, оперировать только с модулями сопротивлений.

Пример 1. Определить результирующее сопротивление до точки К-1 и К-2 в относительных единицах для расчетной схемы установки, приведённой на рис. 1.

Решение.

1. Задается базисная мощность $S_{\sigma} = 300$ МВА.

2. Составляется схема замещения (см. рис. 2), нумеруются все индуктивные сопротивления цепи.

Сопротивления приводятся к базисным условиям, индексы для простоты опускаются:

- сопротивление системы определяется по формуле (4.1):

$$X_{*1} \approx X_{*c} \approx 0,8;$$

- сопротивление воздушных линий:

$$X_{*2} \approx X_{*3} \approx X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\sigma}}{U_{cp}^2} \approx 0,4 \cdot 40 \cdot \frac{300}{115^2} \approx 0,362;$$

- сопротивление трансформаторов:

$$X_{*4} \approx X_{*5} \cdot \frac{U_{к \%}}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{н.т.}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{300}{31,5} \approx 1,0;$$

- сопротивление реакторов:

$$X_{*6} \cdot \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{н.р.}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{300}{7,26} \approx 1,65;$$

$$S_{np} \approx \sqrt{3} \cdot I_{np} \cdot U_{cp} \approx 1,73 \cdot 0,4 \cdot 10,5 \approx 7,26 \text{ МВА}.$$

Найденные значения базисных сопротивлений наносятся на схему замещения.

3. Преобразуется схема замещения (см. рис. 2) для вычисления

результатирующего сопротивления до точки К-1.

4. Определяется результирующее сопротивление до точки К-1:

$$X_{*рез.1} \quad X_1 \quad X_3 \quad X_5 \quad 0,8 \quad 0,362 \quad 1,0 \quad 2,162.$$

5. Определяется результирующее сопротивление до точки К-2:

$$X_{*рез.2} \quad X_1 \quad X_3 \quad X_5 \quad X_6 \quad 2,162 \quad 1,65 \quad 3,812.$$

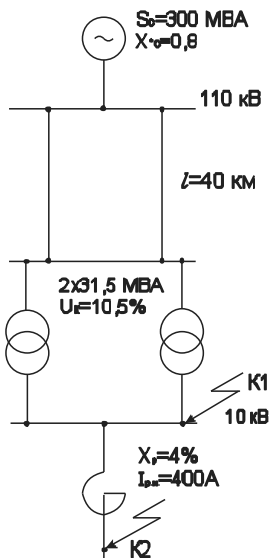


Рис. 1. Расчетная схема

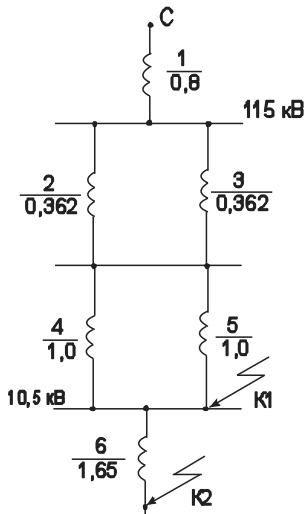


Рис. 2. Схема замещения

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В ЦЕПИ, ПИТАЮЩЕЙСЯ ОТ СИСТЕМЫ НЕОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Если мощность системы достаточно велика по сравнению с мощностью присоединенных к ней потребителей, то напряжение на шинах системы практически можно считать неизменным при любых потребляемых токах. В этом случае мощность системы условно считают равной бесконечности, а сопротивление системы равным нулю ($S_c = \infty$, $X_c = 0$).

Для практических расчетов важно определить, можно ли в данном конкретном случае считать питающую систему системой неограниченной мощности. Если известна суммарная мощность

генераторов системы, то при выполнении одного из условий:

$$X_c \leq \frac{S}{U^2} \cdot 3; \quad \frac{S_c}{S^{(3)}} \leq 3,$$

где U – междуфазное напряжение системы, кВ; $S^{(3)}$ – мощность трехфазного КЗ на шинах подстанции, МВА; S_c – мощность системы, МВА; X_c – сопротивление системы, Ом, систему принимают за систему неограниченной мощности.

Сопротивление системы можно принимать равным нулю, а ее мощность равной бесконечности и в случае, когда точка короткого замыкания значительно удалена от источника и результирующее сопротивление цепи короткого замыкания во много раз (в 10–20) превышает сопротивление системы.

Так как напряжение на пиках системы неограниченной мощности при коротком замыкании практически остается неизменным, то периодическая составляющая тока КЗ будет представлять собою синусоидальный ток с неизменной во времени амплитудой. При этом действующее значение периодической составляющей будет равно сверхпереходному и установившемуся токам КЗ.

$$I_{\kappa} = I_{\infty} = I_{\kappa}$$

Если расчет сопротивлений производится в относительных единицах, то для вычисления периодической составляющей тока при трехфазном КЗ пользуются формулой:

$$I_{\kappa} = \frac{I_{\delta}}{X_{*рез}}, \quad (15)$$

где I_{κ} – ток короткого замыкания, кА; $X_{*рез}$ – результирующее сопротивление до точки КЗ в относительных единицах; I_{δ} – базисный ток в кА, вычисляемый по формуле:

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} U_{\delta}}, \quad (16)$$

где S_{δ} – базисная мощность, МВА; U_{δ} – базисное напряжение, кВ.

Если расчет производится в именованных единицах, то

$$I_{\kappa} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} X_{рез}}, \quad (17)$$

где U_{cp} – расчётное напряжение, кВ; $X_{рез}$ – результирующее сопротивление, Ом.

В случае учета активных сопротивлений в формуле расчета

(12), (14) вместо индуктивного результирующего сопротивления подставляется полное сопротивление:

$$Z_{*H} = \sqrt{R_{*H}^2 + X_{*H}^2}, \quad Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_H^2}.$$

Ударный ток определяется по формулам:

$$i_y = K_y \sqrt{2} I_K; \quad (18)$$

$$K_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}; \quad (19)$$

$$T_a = \frac{X_{pez}}{3,14 R_{pez}}, \quad (20)$$

где K_y – ударный коэффициент; e – основание натурального логарифма; T_a – постоянная времени затухания апериодического тока, сек.

Если расчет сопротивлений ведется без учета активных сопротивлений, то обычно принимают следующие значения ударного коэффициента:

- при КЗ на шинах, питаемых непосредственно от генераторов средней и большей мощности – 1,9;
- при КЗ на стороне вторичного напряжения понижающих трансформаторов мощностью 1000 кВА и менее – 1,3.

Подводя итог сказанному выше, можно рекомендовать следующую *последовательность расчета токов КЗ*:

1. Выбор расчетных условий:
 - а) составление расчетной схемы,
 - б) определение вида и мест расположения короткого замыкания (расчетные точки КЗ).
2. Определение сопротивлений элементов расчётной схемы.
3. Составление схемы замещения.
4. Определение результирующего сопротивления цепи короткого замыкания и проверка возможности считать питающую систему системой неограниченной мощности.
5. Определение токов короткого замыкания.

Пример 2. Определить токи I_K , I_y , мощность S_K короткого замыкания в точках К-1 и К-2. Все данные для расчета приведены на рис. 3.

Решение:

Расчет производится в относительных единицах, принимается

значение $S_{\sigma} = 100 \text{ МВА}$.

1. Определяется сопротивление цепи и наносится на схему замещения (рис. 4).

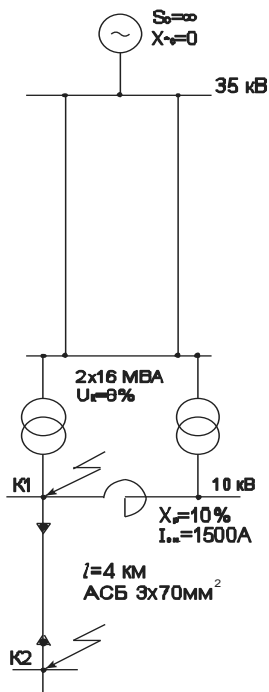


Рис. 3. Расчетная схема

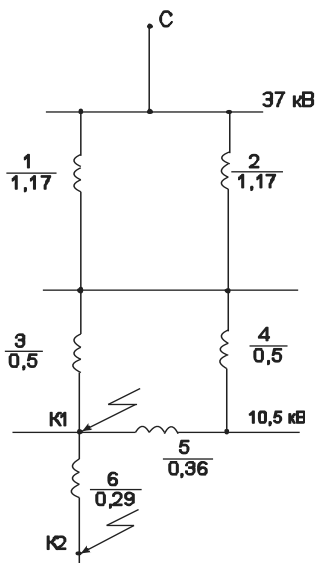


Рис. 4. Схема замещения

$$X_{*1} \quad X_{*2} \quad X_0 \quad l \quad \frac{S_{\sigma}}{U_{cp}^2} \quad 0,4 \quad 40 \quad \frac{100}{37^2} \quad 1,17;$$

$$X_{*3} \quad X_{*4} \quad \frac{U_{\kappa} \%}{100} \quad \frac{S_{\sigma}}{S_{H.}} \quad \frac{8}{100} \quad \frac{100}{16} \quad 0,5;$$

$$X_{*5} \quad \frac{X_p \%}{100} \quad \frac{I_{\sigma}}{I_{o.n.}} \quad \frac{4}{100} \quad \frac{5,5}{1,5} \quad 0,15;$$

$$I_{\sigma} \quad \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} \quad 5,5 \text{ кА};$$

$$X_{*6} = X_0 + l \frac{S_{\sigma}}{U_{cp}^2} = 0,08 + 4 \frac{100}{10,5^2} = 0,29.$$

2. Определяется результирующее сопротивление до точки К-1

$$X_{*рез.1} = X_1 + X_3 = 1,17 + 0,5 = 1,67.$$

3. Определяются токи и мощность КЗ в точке К-1.

$$I_{к1} = \frac{I_{\sigma}}{X_{*рез.1}} = \frac{5,5}{1,67} = 3,3 \text{ кА};$$

$$i_{y1} = K_y \sqrt{2} I_{к1} = 1,8 \sqrt{2} \cdot 3,3 = 8,3 \text{ кА};$$

$$S_{к1} = \sqrt{3} U_{cp} I_{к1} = 1,73 \cdot 10,5 \cdot 3,3 = 60 \text{ МВА}.$$

4. Определяется результирующее сопротивление до точки К-2

$$X_{*рез.2} = X_1 + X_3 + X_6 = 1,17 + 0,5 + 0,29 = 1,96.$$

5. Определяется ток КЗ в точке К-2.

$$I_{к2} = \frac{I_{\sigma}}{X_{*рез.2}} = \frac{5,5}{1,96} = 2,8 \text{ кА}.$$

6. Принимается ударный коэффициент $K_y = 1,02$.

7. Ударный ток:

$$i_{y2} = K_y \sqrt{2} I_{к2} = 1,02 \sqrt{2} \cdot 2,8 = 4 \text{ кА}.$$

8. Определяется мощность КЗ в точке К-2

$$S_{к2} = \sqrt{3} U_{cp} I_{к2} = 1,73 \cdot 10,5 \cdot 2,8 = 50,9 \text{ МВА}.$$

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО РАСЧЁТНЫМ КРИВЫМ

Во многих случаях мощность питающих источников нельзя считать неограниченной. В этих случаях при коротких замыканиях напряжение на шинах генераторов будет изменяться. Так бывает при питании сети от системы небольшой мощности, особенно когда точка КЗ удалена незначительно и при питании сетей от местных источников (ТЭЦ, ДЭС).

При расчете токов КЗ в цепях, питающихся от источников конечной мощности, применяют такой же порядок составления и преобразования схемы замещения, какой был рассмотрен в цепях с неограниченной мощностью питания. Но, в отличие от ранее рассмотренного метода, найденное результирующее сопротивление

обязательно приводится к суммарной номинальной мощности источника питания. Такое сопротивление называют расчетным. Формулы для его определения:

$$X_{*расч} = X_{рез} \frac{S_n}{U_б^2}; \quad (21)$$

$$X_{*расч} = X_{*рез} \frac{S_n}{S_б}, \quad (22)$$

где $X_{рез}$ – результирующее сопротивление, Ом; $X_{*рез}$ – относительное результирующее сопротивление; S_n – суммарная мощность генераторов, от которых рассчитывают ток КЗ, МВА; $S_б$ – базисная мощность, МВА; $U_б$ – базисное напряжение, кВ.

По найденной величине $X_{*расч}$ для любого заданного момента времени находят относительное значение периодического тока $I_*^{(3)}$ трехфазного короткого замыкания, пользуясь расчетными кривыми. Расчетные кривые приведены в приложениях Б1–Б7.

Следует иметь в виду, что апериодический ток затухает за время, не превышающее 0,2 сек. после начала короткого замыкания, поэтому расчётные кривые для времени $t \geq 0,2$ сек. практически позволяют определить полный ток КЗ.

На практике обычно бывает достаточным определить токи для моментов времени

$$t = 0 \quad (I_*^{\prime\prime}) \quad \text{и} \quad t = \infty \quad (I_*^{\prime}).$$

Чтобы выразить токи в кА, их надо умножить на суммарный ток генераторов.

$$\frac{I^{\prime\prime}}{I} = \frac{I_*^{\prime\prime}}{I_*} \frac{I_n}{I_n}; \quad (23)$$

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_{cp}} [кА]. \quad (24)$$

Таким образом, порядок расчета токов КЗ с помощью расчетных кривых сводится к следующему.

1. Составить расчетную схему и наметить точки короткого замыкания.
2. Задаться базисными мощностью и напряжением.

3. Составить схему замещения для каждой точки КЗ.
4. Произвести упрощение схем замещения, определить результирующее сопротивление до точек КЗ.
5. Определить расчетное сопротивление.
6. По расчетным кривым найти относительные токи КЗ для нужных моментов времени.
7. Определить токи и мощность КЗ.

В заключение отметим, что *без пользования расчетными кривыми можно обойтись в следующих случаях:*

1. Когда мощность источников питания достаточно велика

$$S_c = \infty, X_c = 0.$$

2. При определении периодического тока КЗ для любых моментов времени, если расчетное реактивное сопротивление данной цепи $X_{*расч} > 3$ остается неизменным. Для определения тока КЗ пользуются формулой, представляющей собой модификацию формулы (15):

$$I_k = \frac{I_{н.}}{X_{*расч}}. \quad (25)$$

3. При определении только начального значения периодической слагающей тока КЗ турбогенераторов:

$$I'' = \frac{I_{н.}}{X_{*расч}}. \quad (26)$$

4. При расчете тока КЗ в сетях напряжением до 1000 В за понижающими трансформаторами.

Пример 3. Определить Γ'' , i_y , S'' , I_∞ при трехфазном коротком замыкании в точках К-1 и К-2 в установке, схема которой представлена на рис. 5.

Решение:

Составляется схема замещения (рис. 6).

Короткое замыкание в точке К-1

1. Принимаются базисные условия:

$$S_b = S_{сн} = 500 \text{ МВА};$$

$$U_{б1} = U_{ср.1} = 37 \text{ кВ};$$

$$U_{б2} = U_{ср.2} = 6,3 \text{ кВ}.$$

2. Определяются относительные базисные сопротивления:

$$X_{*1} \approx X_{*bc} \approx 0,5;$$

$$X_{*2} \approx X_{*3} \approx X_0 \cdot l \frac{S_0}{U_{cp,1}^2} \approx 0,4 \cdot 10 \frac{500}{37^2} \approx 1,46.$$

3. Определяется результирующее сопротивление:

$$X_{*рез.1} = 0,5 \cdot 1,46 = 1,96.$$

4. Определяется расчетное сопротивление:

$$X_{*расч.1} = X_{*рез.1} = 1,96.$$

5. Определяется суммарный номинальный ток генераторов:

$$I_n = \frac{S_{сн}}{\sqrt{3} U_{cp}} = \frac{500}{1,73 \cdot 37} \approx 7,8 \text{ кА}.$$

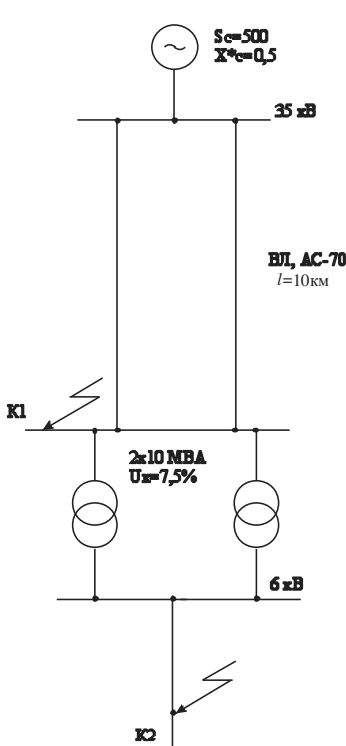


Рис. 5. Расчетная схема

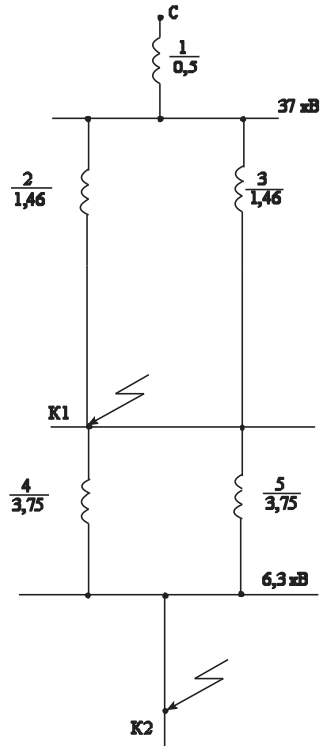


Рис. 6. Схема замещения

6. По кривой для $t = 0$ и $t = \infty$ (приложение Б1) определяются $I_*^{\infty} = 0,5$; $I_* = 0,52$.

7. Определяются токи и мощность КЗ:

$$\begin{aligned} I^{\infty} &= I_*^{\infty} I_n = 0,5 \cdot 7,8 = 3,9 \text{ кА}; \\ I &= I_* I_n = 0,52 \cdot 7,8 = 4,1 \text{ кА}; \\ i_{y1} &= 1,8 \sqrt{2} = 3,9 \cdot 0,9 = 9,9 \text{ кА}; \\ S^{\infty} &= I_*^{\infty} S_{с.н.} = 0,5 \cdot 500 = 250 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

Короткое замыкание в точке К-2

1. Относительное базисное сопротивление трансформаторов:

$$X_{*4} = X_{*5} \frac{U_k \%}{100} \frac{S_b}{S_n} = \frac{7,5}{100} \frac{500}{10} = 3,75.$$

2. Расчетное сопротивление:

$$X_{*расч2} = X_{*расч1} + X_{*4} = 1,96 + 3,75 = 5,71.$$

3. Суммарный номинальный ток генератора:

$$I_n = \frac{500}{1,73 \cdot 6,3} = 45,7 \text{ кА}.$$

4. Токи и мощность КЗ:

$$\begin{aligned} I_k &= I^{\infty} \frac{I_n}{X_{*расч2}} = \frac{45,7}{5,71} = 8,0 \text{ кА}; \\ i_{y2} &= 1,8 \sqrt{2} \cdot 8,0 = 20,36 \text{ кА}; \\ S^{\infty} &= S_{к.з.} = \frac{S_{с.н.}}{X_{*расч2}} = \frac{500}{5,71} = 87,6 \text{ МВА}. \end{aligned}$$

6. РАСЧЁТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В УСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Короткие замыкания в установках напряжением ниже 1000 В протекают с некоторыми особенностями, которые необходимо учитывать при расчете токов КЗ.

1. Соотношение между активными и индуктивными сопротивлениями такое, что, как правило, пренебрегать активным сопротивлением нельзя.

2. На величину тока КЗ могут оказать влияние индуктивные

сопротивления трансформаторов тока, катушек автоматов, контакторов. Поэтому при составлении расчетных схем нужно учитывать перечисленные элементы.

3. Относительное значение активного сопротивления, по сравнению с индуктивным, значительно больше, чем в установках напряжением выше 1000 В. Поэтому его учитывают только в первый период КЗ.

4. При определении результирующего сопротивления цепи КЗ необходимо учитывать активные сопротивления шин и кабелей распределительных устройств, трансформаторов тока, а также переходные сопротивления контактов рубильников и автоматов, т. к. они также могут оказать влияние на величину тока КЗ.

5. Активные и индуктивные сопротивления элементов, перечисленных в пунктах 2 и 4, невелики и поэтому их удобнее выражать в именованных единицах.

6. Учет асинхронных электродвигателей производить лишь при определении ударного тока в том случае, если они присоединены непосредственно к месту КЗ.

Для выбора методики расчета тока КЗ в установках напряжением ниже 1000 В следует различать два случая.

Первый случай: Расчет производится за понижающим трансформатором, связанным с энергосистемой. Так как сопротивление относительно маломощных понижающих трансформаторов и присоединенной к ним сети значительно больше сопротивления системы, от которой они питаются, то периодическая составляющая тока КЗ будет неизменной в течение всего процесса короткого замыкания. В этом случае ток КЗ определяется по формуле:

$$I_k = \frac{U_{cp}}{\sqrt{3} \sqrt{R_*^2 + X_{н.}^2}} [кА], \quad (27)$$

где I_k – ток КЗ в килоамперах; U_{cp} – расчетное напряжение в вольтах; $\sqrt{R_*^2 + X_{н.}^2}$ – полное результирующее сопротивление цепи КЗ в миллиомах.

При таком расчете токов КЗ полное результирующее сопротивление включает в себя сопротивление системы до понижающего трансформатора. Сопротивление системы до понижающего трансформатора можно определить, если известен тип высоковольтного выключателя на стороне высшего напряжения транс-

форматора

$$X_c = \frac{U_{cp}^2}{S_{откл}} 10^3 [\text{МОм}], \quad (28)$$

где U_{cp} – расчетное напряжение той ступени, где установлен высоковольтный выключатель, кВ; $S_{откл}$ – допускаемая мощность отключения выключателя, кВА.

Если сведения о системе отсутствуют и нет необходимости в точном определении токов КЗ, то сопротивление системы считают равным нулю.

Второй случай: Сеть питается от местной электростанции, не связанной с энергосистемой. Мощность местной ТЭЦ или автономной дизельной электростанции ограничена и периодическая составляющая тока КЗ будет изменяться во времени. В этом случае ток КЗ рассчитывают методом расчетных кривых. Расчетное сопротивление определяют по формуле (21), предварительно определив результирующее сопротивление в именованных единицах. Формулы для вычисления сопротивлений в именованных единицах и необходимые справочные данные приводятся ниже.

1. Линии электропередачи:

воздушные $X_0 = 400$ мОм/км; $X = X_0 \cdot l$ мОм;

кабельные $X_0 = 80$ мОм/км; $X = X_0 \cdot l$ мОм;

активное сопротивление линии

$$R = \frac{l}{S} 10^6 \text{ мОм}, \quad (29)$$

где l – длина линии, км; S – сечение линии, мм; γ – удельная проводимость, м/Ом · мм².

2. Силовые трансформаторы:

$$R_{*m} = \frac{P_{*s}}{S_{н.т.}}. \quad (30)$$

Относительное индуктивное сопротивление

$$X_{*m} = \sqrt{\frac{U_{к \%}^2}{100}} R_{*m}. \quad (31)$$

3. Автоматические воздушные выключатели и рубильники:

Активные и индуктивные сопротивления катушек максимальных расцепителей автоматических воздушных выключателей при-

водятся в каталогах или определяются путём измерений.

При отсутствии точных данных можно пользоваться приближенными значениями сопротивлений, приведенными в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Приближенные значения переходных сопротивлений контактов отключающих аппаратов, мОм

Номинальный ток, А	50	70	100	140	200	400	600	1000
Автоматический воздушный выключатель	1,3	1,0	0,75	0,65	0,6	0,4	0,25	–
Рубильник	–	–	0,5	–	0,4	0,2	0,15	0,08

Таблица 3

Сопротивление катушек максимального тока автоматических воздушных выключателей

Номинальный ток катушек, А	50	70	100	140	200	400	600
X, мОм	2,7	1,3	0,86	0,55	0,28	0,10	0,094
R, мОм	5,5	2,35	1,30	0,74	0,36	0,15	0,12

4. Кабели и провода с алюминиевыми жилами (напряжением до 1кВ)

Активные и индуктивные сопротивления токопроводящих жил кабелей и проводов приводятся в каталогах. Можно пользоваться значениями сопротивлений, приведенными в табл. 4.

Таблица 4

Сопротивления жил кабелей и проводов с алюминиевыми жилами

Сечение [мм ²]	Сопротивление, мОм/м			Сечение [мм ²]	Сопротивление, мОм/м		
	Активное R	Индуктивное X			Активное R	Индуктивное X	
		Провода (голые)	Провода (в трубах)			Провода (голые)	Провода (в трубах)
1,5	22,05	–	0,11	50	0,66	0,05	0,06
2,5	13,3	–	0,09	70	0,47	0,04	0,06

Окончание табл. 4

Сечение [мм ²]	Сопротивление, мОм/м			Сечение [мм ²]	Сопротивление, мОм/м		
	Активное R	Индуктивное X			Активное R	Индуктивное X	
		Провода (голые)	Провода (в трубах)			Провода (голые)	Провода (в трубах)
4	6,3	0,33	0,10	95	0,35	0,02	0,06
6	5,55	0,32	0,09	120	0,28	0,21	0,06
10	3,32	0,31	0,07	150	0,22	0,21	0,06
16	2,07	0,29	0,07	185	0,18	0,21	0,06
25	1,38	0,27	0,07	240	0,14	0,2	0,06
35	0,95	0,26	0,06	300	0,11	0,19	–

5. Активные и индуктивные сопротивления плоских шин

Активные и индуктивные сопротивления плоских шин приводятся в каталогах. Можно пользоваться значениями сопротивлений, приведенными в табл. 5.

Таблица 5

Сопротивления плоских шин

Размеры шин, мм	Сопротивления, мОм/м					
	Активное при 65 С°		Индуктивное (медь и алюминий)			
	Медь	Алюминий	При среднегеометрическом расстоянии между фазами А ср. мм			
			100	150	200	300
30 × 3	0,223	0,394	0,163	0,189	0,206	0,235
30 × 4	0,167	0,296	0,163	0,189	0,206	0,235
40 × 4	0,125	0,222	0,145	0,170	0,189	0,214
40 × 5	0,100	0,177	0,145	0,170	0,189	0,214
50 × 5	0,080	0,142	0,137	0,156	0,180	0,200
50 × 6	0,067	0,118	0,119	0,156	0,180	0,200
60 × 6	0,056	0,099	0,119	0,145	0,163	0,189
60 × 8	0,042	0,074	0,119	0,145	0,163	0,189
80 × 8	0,031	0,055	0,102	0,126	0,145	0,170
80 × 10	0,025	0,044	0,102	0,126	0,145	0,170
100 × 10	0,020	0,035	0,090	0,113	0,133	0,157

$$a_{cp} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{31}}$$

При других расстояниях между фазами можно пользоваться следующей приближенной формулой для прямоугольных шин:

$$X_0 \approx 0,145 \lg \frac{U_{\text{ср}}}{h} \left[\frac{\text{МОМ}}{\text{М}} \right], \quad (32)$$

где h – высота шин, мм.

При расчетах токов КЗ в миллиомах сопротивления всех элементов должны быть приведены к одному и тому же напряжению, обычно к расчетному напряжению ступени КЗ.

$$X \approx X \frac{U_{\text{ср}}^2}{U_n^2}; \quad (33)$$

$$X \approx X_{*n} \frac{U_{\text{ср}}^2}{S_n}, \quad (34)$$

где X – сопротивление элемента в миллиомах, приведенное к расчетному напряжению ступени КЗ; $U_{\text{ср}}$ и U_n – расчетные среднее и номинальное напряжения, В; X – то же, но при номинальном напряжении; X_{*n} – относительное номинальное напряжение элемента; S_n – номинальная мощность элемента, кВА.

Действующее значение периодической составляющей тока трехфазного КЗ за первый период от асинхронных электродвигателей, присоединенных непосредственно к месту КЗ можно определить по формуле:

$$I_{\text{кз}} = 4,5 I_{\text{нд}}, \quad (35)$$

где $I_{\text{нд}}$ – номинальный ток одновременно работающих электродвигателей.

Апериодическую составляющую тока от двигателей не учитывают. Полное значение ударного тока в месте КЗ от питающей системы и электродвигателей составляет:

$$i_y \approx K_y 1,41 I_k = 6,5 I_{\text{кз}}. \quad (36)$$

При определении тока КЗ на сборных шинах дизельной электростанции возникают затруднения в пользовании расчетными кривыми. В этом случае расчет тока КЗ можно произвести аналитическим путем. Для этого нужно располагать целым рядом параметров дизель-генераторов. Здесь будет рассмотрен пример расчета.

Пример 5. Определить ток короткого замыкания на сборных шинах автономной дизельной электростанции (рис. 7). Параметры

генератора $S_{г.н.} = 320$ кВА, $U_H = 400$ В, $X''_d = 0,18$, отношение короткого замыкания – ОКЗ-1,22, токи возбуждения $I_{в.х.} = 66$ А, $I_{в.н.} = 131$ А.

Каждый генератор подключается к сборным шинам кабелями АСБГ с помощью автомата А с номинальными токами максимального расцепителя; $I_H = 600$ А и рубильника Р на 600 А. Во всех фазах установлены трансформаторы тока с коэффициентом трансформации 600/5, сборные шины алюминиевые 60×8 мм² длиной 1 м, среднее геометрическое расстояние $A_{cp} = 300$ мм. Секционный рубильник в номинальном режиме работы ДЭС замкнут $I_H = 600$ А.

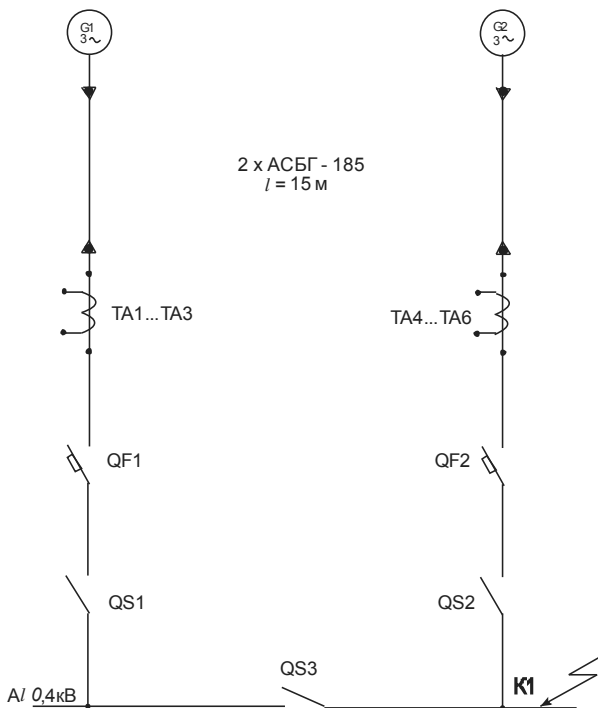


Рис. 7. Расчетная схема электроустановки

Решение:

1. Сопротивление элементов схемы в именованных единицах: генераторы:

$$X_1 \quad X_3 \quad \frac{X''_d U_{cp}^2}{S_{г.н.}} \quad \frac{0,18 \cdot 400^2}{320} \quad 90 \text{ МОм};$$

активное сопротивление кабеля:

$$R_2 \approx R_{20} \approx \frac{R_0 l}{2} \approx \frac{0,18 \cdot 15}{2} \approx 1,35 \text{ мОм};$$

индуктивное сопротивление кабеля:

$$X_3 \approx X_{19} \approx \frac{X_0 l}{2} \approx \frac{0,06 \cdot 15}{2} \approx 0,45 \text{ мОм};$$

активное сопротивление трансформатора тока:

$$R_4 \approx R_{18} \approx 0,04 \text{ мОм};$$

индуктивное сопротивление трансформатора тока:

$$X_5 \approx X_{17} \approx 0,28 \text{ мОм};$$

активное сопротивление катушек автомата:

$$R_8 \approx R_{14} \approx 0,25 \text{ мОм};$$

индуктивное сопротивление катушек автомата:

$$X_7 \approx X_{15} \approx 0,09 \text{ мОм};$$

переходные сопротивления контактов автомата:

$$R_6 \approx R_{16} \approx 0,12 \text{ мОм};$$

переходные сопротивления контактов рубильников:

$$R_9 \approx R_{10} \approx R_{13} \approx 0,15 \text{ мОм};$$

индуктивное сопротивление шин:

$$X_{11} \approx 0,19 \text{ мОм};$$

активное сопротивление шин:

$$R_{12} \approx 0,07 \text{ мОм};$$

результатирующее сопротивление цепи первого генератора до точки К:

$$R_{pez.1} \approx R_2 \approx R_4 \approx R_6 \approx R_8 \approx R_9 \approx R_{10} \approx R_{12} \approx 1,35 \text{ } 0,04 \text{ } 0,12 \text{ } 0,25 \text{ } 0,15 \text{ } 0,15 \text{ } 0,02 \approx 2,08 \text{ мОм};$$

$$X_{pez.1} \approx X_1 \approx X_2 \approx X_3 \approx X_5 \approx X_9 \approx X_{11} \approx 90 \text{ } 0,45 \text{ } 0,28 \text{ } 0,09 \text{ } 0,19 \approx 91,01 \text{ мОм}.$$

Полное сопротивление цепи к. з.:

$$Z_{pez} = \sqrt{R_{pez}^2 + X_{pez}^2} \approx 91,03 \text{ мОм}.$$

2. Определяется сверхпереходная ЭДС генератора:

$$E_*'' = 1 \text{ } 1 \text{ } X_{*d}'' \approx 0,6 \text{ } 1,1.$$

3. Номинальный ток генератора:

$$I_{г.н.} = \frac{S_{г.н.}}{\sqrt{3} U_n} = \frac{320}{1,73 \cdot 0,4} = 460 \text{ A.}$$

4. Ток короткого замыкания от одного генератора в начальный момент:

$$I_{nt} = 0 \quad \frac{E_{*}^{\wedge}}{X_{*d}^{\wedge}} \quad I_{г.н.} = \frac{1,1}{0,18} \cdot 460 = 2810 \text{ A.}$$

5. Относительный ток возбуждения:

$$I_{*g} = \frac{I_{г.н.}}{I_{г.х.х.}} = \frac{131}{66} = 1,99.$$

6. Установившийся ток КЗ от одного генератора:

$$I_{*OK3} = I_{*г.н.} = 1,22 \cdot 1,99 = 2,43 \quad 460 \quad 1110 \text{ A.}$$

7. Ток короткого замыкания от обоих генераторов:

$$I_{nt} = 0 \quad 2 \cdot 2810 = 5620 \text{ A;} \\ I_{*} = 2 \cdot 1110 = 2220 \text{ A.}$$

7. УСЛОВИЯ ВЫБОРА АППАРАТОВ И ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ПО РЕЖИМУ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

По режиму КЗ должны проверяться:

1. В электроустановках выше 1 кВ:

а) электрические аппараты, токопроводы, кабели и другие проводники, а также опорные и несущие конструкции для них;

б) воздушные линии электропередачи при ударном токе КЗ 50 кА и более для предупреждения схлестывания проводов при динамическом действии токов КЗ.

Кроме того, для линий с расщепленными проводами должны быть проверены расстояния между распорками расщепленных проводов для предупреждения повреждения распорок и проводов при схлестывании.

Провода высоковольтных линий (ВЛ), оборудованные устройствами быстродействующего автоматического повторного включения, следует проверять и на термическую стойкость.

2. В электроустановках до 1 кВ – только распределительные щиты, токопроводы и силовые шкафы. Трансформаторы тока по режиму КЗ не проверяются.

Аппараты, которые предназначены для отключения токов КЗ или могут по условиям своей работы включать короткозамкнутую цепь, должны, кроме того, обладать способностью производить эти операции при всех возможных токах КЗ.

Стойкими при токах КЗ являются те аппараты и проводники, которые при расчетных условиях выдерживают воздействия этих токов, не подвергаясь электрическим, механическим и иным разрушениям или деформациям, препятствующим их дальнейшей нормальной эксплуатации.

По режиму КЗ при напряжении выше 1 кВ не проверяются:

1. Аппараты и проводники, защищенные плавкими предохранителями с вставками на номинальный ток до 60 А, – по электродинамической стойкости.

2. Аппараты и проводники, защищенные плавкими предохранителями независимо от их номинального тока и типа, – по термической стойкости.

Цепь считается защищенной плавким предохранителем, если его отключающая способность выбрана верно и он способен отключить наименьший возможный аварийный ток в данной цепи.

3. Проводники в цепях к индивидуальным электроприемникам, в том числе к цеховым трансформаторам общей мощностью до 2,5 МВ·А и с высшим напряжением до 20 кВ, если соблюдены одновременно следующие условия:

а) в электрической или технологической части предусмотрена необходимая степень резервирования, выполненного так, что отключение указанных электроприемников не вызывает расстройств технологического процесса;

б) повреждение проводника при КЗ не может вызвать взрыва или пожара;

в) возможна замена проводника без значительных затруднений.

4. Проводники к индивидуальным электроприемникам, указанным в п. 3, а также к отдельным небольшим распределительным пунктам, если такие электроприемники и распределительные пункты являются неотчетственными по своему назначению и если для них выполнено хотя бы только условие, приведенное в п. 3, б.

5. Трансформаторы тока в цепях до 20 кВ, питающих трансформаторы или реактированные линии, в случаях, когда выбор трансформаторов тока по условиям КЗ требует такого завышения

коэффициентов трансформации, при котором не может быть обеспечен необходимый класс точности присоединенных измерительных приборов (например, расчетных счетчиков); при этом на стороне высшего напряжения в цепях силовых трансформаторов рекомендуется избегать применения трансформаторов тока, не стойких к току КЗ, а приборы учета рекомендуется присоединять к трансформаторам тока на стороне низшего напряжения.

6. Провода ВЛ.

7. Аппараты и шины цепей трансформаторов напряжения при расположении их в отдельной камере или за добавочным резистором, встроенным в предохранитель или установленным отдельно.

В качестве расчетного вида КЗ следует принимать:

1. Для определения электродинамической стойкости аппаратов и жестких шин с относящимися к ним поддерживающими и опорными конструкциями – трехфазное КЗ.

2. Для определения термической стойкости аппаратов и проводников – трехфазное КЗ; на генераторном напряжении электростанций – трехфазное или двухфазное в зависимости от того, какое из них приводит к большему нагреву.

3. Для выбора аппаратов по коммутационной способности – по большему из значений, получаемых для случаев трехфазного и однофазного КЗ на землю (в сетях с большими токами замыкания на землю); если выключатель характеризуется двумя значениями коммутационной способности – трехфазной и однофазной – соответственно по обоим значениям.

Расчетный ток КЗ следует определять, исходя из условия повреждения в такой точке рассматриваемой цепи, при КЗ в которой аппараты и проводники этой цепи находятся в наиболее тяжелых условиях. Со случаями одновременного замыкания на землю различных фаз в двух разных точках схемы допустимо не считаться.

На реактированных линиях в закрытых распределительных устройствах проводники и аппараты, расположенные до реактора и отделенные от питающих сборных шин (на ответвлениях от линий – от элементов основной цепи) разделяющими полками, перекрытиями и т. п., набираются по току КЗ за реактором, если последний расположен в том же здании и соединение выполнено шинами.

Шинные ответвления от сборных шин до разделяющих полок и проходные изоляторы в последних должны быть выбраны исходя из КЗ до реактора.

При расчете термической стойкости в качестве расчетного времени следует принимать сумму времен, получаемую от сложения времени действия основной защиты (с учетом действия АПВ), установленной у ближайшего к месту КЗ выключателя, и полного времени отключения этого выключателя (включая время горения дуги).

При наличии зоны нечувствительности у основной защиты (по току, напряжению, сопротивлению и т. п.) термическую стойкость необходимо дополнительно проверять, исходя из времени действия защиты, реагирующей на повреждение в этой зоне, плюс полное время отключения выключателя. При этом в качестве расчетного тока КЗ следует принимать то значение его, которое соответствует этому месту повреждения.

Аппаратура и токопроводы, применяемые в цепях генераторов мощностью 60 МВт и более, а также в цепях блоков генератор – трансформатор такой же мощности, должны проверяться по термической стойкости, исходя из времени прохождения тока КЗ 4 с.

Выбор проводников и изоляторов, проверка несущих конструкций по условиям динамического действия токов короткого замыкания:

Усилия, действующие на жесткие шины и передающиеся ими на изоляторы и поддерживающие жесткие конструкции, следует рассчитывать по наибольшему мгновенному значению тока трехфазного КЗ с учетом сдвига между токами в фазах и без учета механических колебаний шинной конструкции. В отдельных случаях (например, при предельных расчетных механических напряжениях) могут быть учтены механические колебания шин и шинных конструкций.

Импульсы силы, действующие на гибкие проводники и поддерживающие их изоляторы, выводы и конструкции, рассчитываются по среднеквадратическому (за время прохождения) току двухфазного замыкания между соседними фазами. При расщепленных проводниках и гибких токопроводах взаимодействие токов КЗ в проводниках одной и той же фазы определяется по действующему значению тока трехфазного КЗ.

Гибкие токопроводы должны проверяться на схлестывание.

Найденные расчетом механические усилия, передающиеся при КЗ жесткими шинами на опорные и проходные изоляторы, должны составить в случае применения одиночных изоляторов не более 60 % соответствующих гарантийных значений наименьшего разрушающего усилия; при спаренных опорных изоляторах – не более 100 % разрушающего усилия одного изолятора.

При применении шин составных профилей (многополосные, из двух швеллеров и т. д.) механические напряжения находятся как арифметическая сумма напряжений от взаимодействия фаз и взаимодействия элементов каждой шины между собой.

Наибольшие механические напряжения в материале жестких шин не должны превосходить 0,7 временного сопротивления разрыву по ГОСТ.

Выбор проводников по условиям нагрева при коротком замыкании:

Температура нагрева проводников при КЗ должна быть не выше следующих предельно допустимых значений, °С:

Шины: медные	300;
алюминиевые	200;
стальные, не имеющие непосредственного соединения с аппаратами	400;
стальные с непосредственным присоединением к аппаратам	300.
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией на напряжение, кВ: до	
10	200;
20–220	125.
Кабели и изолированные провода с медными и алюминиевыми жилами и изоляцией:	
поливинилхлоридной и резиновой	150;
полиэтиленовой	120.
Медные неизолированные провода при тяжениях, Н/мм:	
менее 20	250;
20 и более	200.
Алюминиевые неизолированные провода при тяжениях, Н/мм:	
менее 10	200;
10 и более	160.
Алюминиевая часть	

сталеалюминиевых проводов 200.

Проверка кабелей на нагрев токами КЗ, в тех случаях, когда это требуется, должна производиться для:

1) одиночных кабелей одной строительной длины, исходя из КЗ в начале кабеля;

2) одиночных кабелей со ступенчатыми сечениями по длине, исходя из КЗ в начале каждого участка нового сечения;

3) пучка из двух и более параллельно включенных кабелей, исходя из КЗ непосредственно за пучком (по сквозному току КЗ).

При проверке на термическую стойкость аппаратов и проводников линий, оборудованных устройствами быстродействующего АПВ, должно учитываться повышение нагрева из-за увеличения суммарной продолжительности прохождения тока КЗ по таким линиям.

Расцепленные провода ВЛ при проверке на нагрев в условиях КЗ рассматриваются как один провод суммарного сечения.

Аппараты и проводники первичных цепей должны удовлетворять следующим требованиям:

- а) соответствию окружающей среде и роду установки;
 - б) необходимой прочности изоляции для надежной работы в длительном режиме и при кратковременных перенапряжениях;
 - в) допустимому нагреву токами длительных режимов;
 - г) стойкости в режиме короткого замыкания;
 - д) технико-экономической целесообразности;
 - е) достаточной механической прочности;
 - ж) допустимым потерям напряжения в нормальном и послеаварийном режимах;
- з) допустимым потерям на коронирование для проводников напряжением 35 кВ и выше.

Соответствие окружающей среде и роду установки. Изоляция аппаратов и проводников соответствующего рабочего напряжения может быть нормальная и облегченная.

Для выбора целесообразного вида изоляции необходимо учитывать род установки (в помещении, на открытом воздухе, в земле, в воде), температуру окружающей среды, влажность и загрязненность ее, высоту установки оборудования над уровнем моря.

Необходимая прочность изоляции для надежной работы в длительном режиме и при кратковременных перенапряжениях.

Номинальное напряжение электрооборудования $U_{\text{ном.э}}$, указанное на его заводской табличке, соответствует уровню его изоляции, причем нормально всегда имеется некоторый запас электрической прочности, позволяющий аппарату неограниченно длительное время работать при напряжении на 10...15 % выше номинального. Это напряжение называют номинальным рабочим напряжением электрооборудования. Так как отклонения напряжения в условиях эксплуатации обычно не превышают 10...15 % номинального напряжения установки $U_{\text{ном.у}}$, то при выборе оборудования по напряжению достаточно соблюсти условие $U_{\text{ном.у}} \geq U_{\text{ном.э}}$.

Условия выполнения остальных требований по выбору электрооборудования рассмотрены отдельно для каждого вида.

Все номинальные параметры аппаратов, приводимые в справочниках, соответствуют температуре окружающей среды $t_0 \leq 40^\circ\text{C}$ среднесуточной $t_{\text{оср}} \leq 35^\circ\text{C}$. Высота над уровнем моря не больше 1000 м.

Для большинства аппаратов перегрузка их током сверх номинального не допускается, если температура окружающего воздуха равна расчетной для данного аппарата. Если максимальная температура окружающего воздуха меньше расчетной (меньше 35°C), то рабочий ток высоковольтных выключателей, разъединителей и трансформаторов тока можно увеличивать на 0,5 % номинального тока на каждый градус понижения температуры ниже 35°C , но всего не более чем на 20 %.

Выбор и проверка выключателей напряжением 1... 220 кВ

Выключатели выбирают по номинальным значениям напряжения и тока, роду установки и условиям работы, конструктивному выполнению и коммутационной способности. Выбранные выключатели проверяют на стойкость при сквозных токах КЗ.

В справочниках приводятся следующие технические данные выключателей внутренней и наружной установки: тип, конструктивное исполнение, номинальное напряжение $U_{\text{ном.в.}}$, наибольшее рабочее напряжение, номинальный ток $I_{\text{ном.в.}}$, предельный сквозной ток при КЗ (действующее значение периодической составляющей и амплитудное значение $I_{\text{дин}}$), предельный ток термической стойкости $I_{\text{тер.в.}}$, время протекания тока термической стойкости $t_{\text{тер.в.}}$, номинальный ток отключения $I_{\text{ном.отк.}}$, минимальная бестоковая пауза при автоматическом повторном включении (0,4...0,5 с), соб-

ственное время включения выключателя с приводом $t_{с.в}$, масса выключателя, тип привода.

Выбор выключателей производится по следующим параметрам.

1. По номинальному напряжению

$$U_{ном.в} \geq U_{ном.у.}$$

2. По току продолжительного режима

$$I_{ном.в} \geq I_{па},$$

в качестве расчетного тока продолжительного режима принимают ток послеаварийного режима $I_{па}$. Послеаварийный (форсированный) режим возникает при отключении одной из параллельно работающих цепей.

3. По отключающей способности: на отключение периодической составляющей расчетного тока КЗ

$$I_{ном.отк.} \geq I_{пт},$$

где $I_{пт}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ в момент t расхождения контактов выключателя;

4. По термической стойкости

$$I^2_{терм.в} t_{терм} \geq B_k,$$

где B_k – расчетный тепловой импульс тока КЗ; $I_{терм.в}$ – предельный ток термической стойкости, равный предельному току отключения выключателя; $t_{терм}$ – время протекания тока термической стойкости, $t_{терм} = 4$ с при $U_{ном.в} \leq 35$ кВ, $t_{терм} = 3$ с при $U_{ном.в} \geq 110$ кВ.

5. По электродинамической стойкости

$$i_{дин} \geq i_{уд},$$

где $i_{дин}$ – амплитудное значение тока динамической стойкости; $i_{уд}$ – ударный ток трехфазного КЗ.

Основные условия выбора выключателей нагрузки (ВН) те же, что и для выключателей, но при проверке выключателя нагрузки по току отключения за расчетный принимается ток форсированного режима, а не ток КЗ.

Выбор и проверка предохранителей напряжением выше 1 кВ

Предохранители выбирают по конструктивному выполнению, номинальным значениям напряжения и тока, предельным отключаемым току и мощности, роду установки (наружная, внутренняя) и, в некоторых случаях, с учетом избирательной защиты линии.

Номинальное напряжение предохранителя должно соответствовать номинальному напряжению установки (сети). Быстродейст-

вующие предохранители с кварцевым песком (типа ПК) значительно ограничивают ток КЗ и приближают фазовый угол тока к нулю благодаря активному сопротивлению дуги. Поэтому при их выборе не учитывают аperiodическую составляющую тока КЗ.

Номинальный ток плавкой вставки следует выбирать так, чтобы она не расплавилась при максимальном токе форсированного режима и пиковых токах.

Выбранные предохранители проверяют на стойкость при сквозных токах КЗ.

Наибольшая допустимая температура нагрева частей предохранителя в длительном режиме $t_{\max} = 105 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В справочниках приводятся следующие технические данные предохранителей внутренней и наружной установки: серия и тип; номинальное напряжение $U_{\text{ном.пр.}}$; наибольшее рабочее напряжение; номинальный ток предохранителя $I_{\text{ном.пр.}}$; номинальный ток патрона предохранителя $I_{\text{ном.п.пр.}}$; номинальный ток плавких вставок $I_{\text{ном.вст.}}$; номинальный ток отключения $I_{\text{ном.пр.}}$; наименьший отключаемый ток предохранителя $I_{\text{нм.о.пр.}}$; предельная симметричная трехфазная мощность отключения – $S_{\text{н.о.пр.}}$.

Выбор предохранителей производится по следующим параметрам:

1) по номинальному напряжению

$$U_{\text{ном.пр}} \geq U_{\text{ном.у}};$$

2) по току продолжительного режима

$$I_{\text{ном.пр}} \geq I_{\text{ном.вст.}} \geq I_{\text{па}};$$

3) по отключающей способности на отключение периодической составляющей расчетного тока КЗ

$$I_{\text{ном.отк}} \geq I_{\text{п0}},$$

где $I_{\text{п0}}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ.

Выбор и проверка разъединителей, отделителей, короткозамыкателей

Разъединители и отделители выбирают по конструктивному выполнению, номинальным значениям напряжения и тока, роду установки (наружная, внутренняя), стойкости токам КЗ. Короткозамыкатели характеризуются также номинальными токами включения.

В справочниках приводятся следующие *технические данные разъединителей и отделителей внутренней и наружной установки:*

тип, исполнение полюсов, номинальное напряжение $U_{\text{ном.р}}$, номинальный ток разъединителя $I_{\text{ном.р}}$, амплитудное значение предельного сквозного тока при КЗ $i_{\text{дин}}$, предельный ток термической стойкости $I_{\text{терм.р}}$, время протекания тока термической стойкости $t_{\text{терм}}$, масса разъединителя, тип привода. Для отделителей также приводится полное время отключения от подачи команды на привод до полного отключения (0,4...0,6 с).

Выбор разъединителей и отделителей производится по следующим параметрам:

- 1) по номинальному напряжению

$$U_{\text{ном.р}} \geq U_{\text{ном.у}};$$

- 2) по току продолжительного режима

$$I_{\text{ном.пр}} \geq I_{\text{па}};$$

- 3) по термической стойкости

$$I_{\text{терм.р}}^2 t_{\text{терм}} \geq B_{\text{к}};$$

$$t_{\text{терм}} = 4 \text{ с при } U_{\text{ном.в}} \leq 35 \text{ кВ, } t_{\text{терм}} = 3 \text{ с при } U_{\text{ном.в}} \geq 110 \text{ кВ.}$$

- 4) по электродинамической стойкости

$$i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}.$$

В справочниках приводятся следующие технические данные короткозамыкателей наружной установки: тип, номинальное напряжение $U_{\text{ном.к.з}}$, амплитудное значение предельного сквозного тока при КЗ $i_{\text{дин}}$, предельный ток термической стойкости $i_{\text{терм.к.з}}$, время протекания тока термической стойкости $t_{\text{терм}}$, полное время включения от подачи команды на включение до касания контактов (0,16...0,35 с), масса короткозамыкателя, тип привода.

Выбор короткозамыкателей производится по следующим параметрам:

- 1) по номинальному напряжению

$$U_{\text{ном.кз}} \geq U_{\text{ном.у}};$$

- 2) по термической стойкости

$$I_{\text{терм.кз}}^2 t_{\text{терм}} \geq B_{\text{к}};$$

- 3) по электродинамической стойкости

$$i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}.$$

Выбор и проверка трансформаторов тока

Трансформаторы тока (ТТ) выбирают по номинальному напряжению, первичному и вторичному токам, по роду установки (внутренняя, наружная), конструкции, классу точности и проверяют на термическую и динамическую стойкость токам КЗ.

В справочниках приводятся следующие *технические данные трансформаторов тока*: тип; конструктивное исполнение; номинальное напряжение $U_{\text{ном.ТТ}}$; номинальный ток первичный $I_{\text{ном.1ТТ}}$ и вторичный $I_{\text{ном.2ТТ}}$; номинальные вторичные нагрузки $S_{\text{ном.2ТТ}}$ при разных классах точности (0,5; 1; 3; 10); четырехсекундная или одnoseкундная термическая стойкость (кратность) $k_{\text{терм}}$ токам КЗ; номинальная предельная кратность $k_{\text{уд}}$, обусловленная необходимостью увеличения номинального первичного тока для обеспечения электродинамической устойчивости токам КЗ.

Номинальной мощностью нагрузки трансформаторов тока $S_{\text{ном.2ТТ}}$ называется мощность, при которой погрешность не превышает погрешности, установленной для данного класса точности трансформаторов. Наивысший класс точности, в котором может работать ТТ, называется номинальным классом точности (0,2; 0,5; 1; 3; 10), что соответствует значениям токовых погрешностей, выраженных в %. Класс точности ТТ должен быть для счетчиков 0,5; для щитовых электроизмерительных приборов и реле – 1 и 3.

Выбор трансформаторов тока производится по следующим параметрам:

1. По номинальному напряжению

$$U_{\text{ном.ТТ}} \geq U_{\text{ном.у}};$$

2. По току и мощности нагрузки продолжительного режима: в первичной цепи

$$I_{\text{ном.1ТТ}} \geq I_{\text{па}},$$

где $I_{\text{па}}$ – ток послеаварийного режима в первичной цепи; во вторичной цепи

$$S_{\text{ном.2ТТ}} \geq S_{\text{расч}},$$

где *ном.* $S_{\text{ном.2ТТ}}$ – допустимая (номинальная) нагрузка вторичной обмотки трансформатора тока; $S_{\text{расч}}$ – расчетная нагрузка вторичной обмотки трансформатора тока в нормальном режиме.

Номинальная нагрузка вторичной обмотки трансформатора тока

$$S_{\text{ном.2ТТ}} = I_{\text{ном.2ТТ}}^2 z_{\text{ТТ}},$$

где $I_{\text{ном.2ТТ}}$ – номинальный ток вторичной обмотки, обычно равный 5 А; $z_{\text{ТТ}}$ – полное допустимое сопротивление внешней цепи, равное сумме сопротивлений последовательно включенных обмоток приборов, реле, соединительных проводов и контактов.

3. По термической стойкости

$$k_{терм} \frac{I_{КЗ} \sqrt{t_{КЗ}}}{I_{ном.1КЗ}}.$$

4. По электродинамической стойкости

$$k_{дн} \geq i_{уд} \sqrt{2} I_{ном.1ТТ}.$$

Выбор трансформаторов напряжения

Трансформаторы напряжения (ТН) для питания измерительных приборов и реле выбирают по номинальному напряжению первичной обмотки, классу точности, схеме соединения обмоток и конструктивному исполнению.

Соответствие классу точности следует проверить путем сопоставления номинальной мощности ТН с фактической нагрузкой от подключенных приборов. Суммирование нагрузок в практических расчетах производится арифметически без учета коэффициента мощности отдельных нагрузок. Все нагрузки, включенные в междуфазные напряжения, приводятся к напряжению 100 В, а включенные на фазные напряжения – к напряжению 100/3В.

Классы точности характеризуются наибольшими допускаемыми ГОСТ погрешностями напряжения. Для ТН установлены четыре класса точности: 0,2; 0,5; 1; 3. Цифра означает предельно допустимую погрешность в процентах.

ТН класса 0,2 применяют для питания расчетных счетчиков, устанавливаемых на мощных генераторах; ТН класса 0,5 – для питания расчетных счетчиков других присоединений и измерительных приборов класса 1 и 1,5; ТН класса 1 – для указательных приборов класса 2,5; ТН класса 3 – для релейной защиты.

Проверку по электродинамической и термической стойкости трансформаторов напряжения и их ошиновки обычно не производят.

В справочниках приводятся следующие технические данные трансформаторов напряжения: тип; конструктивное исполнение; номинальное напряжение первичное $U_{ном.т.н.}$, вторичное напряжение равно 100 В или 100/3 В; номинальная мощность – $S_{ном.т.н.}$ при разных классах точности (0,2; 0,5; 1; 3); максимальная мощность вне классов точности.

1. По номинальному напряжению

$$U_{ном.ТН1} \geq U_{ном.у},$$

где $U_{ном.ТН1}$ – номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора напряжения.

2. По вторичной нагрузке проверяют по условию

$$S_{\text{ном.ТН2}} \geq S_2,$$

где $S_{\text{ном.ТН2}}$ – номинальная мощность трансформатора напряжения; S_2 – вторичная нагрузка трансформатора напряжения.

Вторичная нагрузка трансформаторов напряжения определяется по выражению

$$S_2 = \sqrt{\sum P_{\text{приб}}^2 + \sum Q_{\text{приб}}^2}, \quad (37)$$

где $\sum P_{\text{приб}}$ – суммарная активная мощность присоединяемых приборов; $\sum Q_{\text{приб}}$ – суммарная реактивная мощность присоединяемых приборов.

На электродинамическую и термическую устойчивость трансформаторы напряжения не проверяют.

Выбор шин и изоляторов

Шины распределительных устройств выбирают по номинальным параметрам (току и напряжению) в соответствии с максимальными расчетными нагрузками и проверяют по режиму КЗ. Наибольшие напряжения в металле при ударном КЗ не должны превосходить 70 % допустимого по ГОСТ, что составляет: для меди марки МТ $\sigma_{\text{доп}} = 1400 \text{ кгс/см}^2$ при $v_{\text{ш}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, для алюминия марки АТ $\sigma_{\text{доп}} = 700 \text{ кгс/см}^2$ при $v_{\text{ш}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$. Сборные шины распределительных устройств не проверяют на экономическую плотность тока.

Изоляторы выбирают по номинальному напряжению, номинальному току (проходные и линейные изоляторы), проверяются на разрушающее воздействие тока трехфазного КЗ на шинах и термическое действие тока КЗ.

Наихудшим видом силовой нагрузки для изоляторов является та, которая создает наибольший изгибающий момент. Допустимое усилие $F_{\text{доп. разр.}} = 0,6F$, определяемое из разрушающего усилия $F_{\text{разр}} = (375 \dots 2000 \text{ кг})$ с учетом коэффициента запаса прочности, равного 0,6.

При напряжении 20 кВ и ниже в электроустановках используют шины с прямоугольной площадью сечения, при напряжении 35 кВ и выше – с круглой площадью сечения, на открытых распределительных устройствах (РУ) подстанций 35 кВ и выше шины выполняют из неизолированного многопроволочного провода или

трубчатого сечения. Шины выбирают по длительному допустимому току $I_{дон}$ (табл. 6, 8) и проверяют на электродинамическую и термическую устойчивость.

Таблица 6

Допустимые продолжительные (длительные) токи для шин круглого и трубчатого сечений

Круглые шины			Медные трубы		Алюминиевые трубы		Стальные трубы				
Диаметр, мм	Допустимый ток, А		Внутренний/наружный диаметр, мм	Допустимый ток, А	Внутренний/наружный диаметр, мм	Допустимый ток, А	Условный проход, мм	Толщина стенки, мм	Наружный диаметр, мм	Допустимый переменный ток, А	
	Медные	Алюминиевые								Без разреза	С продольным разрезом
19	780/785	605/610	40/45	1200	45/50	1040	80	4,5	88,5	455	-
20	835/840	650/655	45/50	1330	50/55	1150	100	5	114	670	770
21	900/905	695/700	49/55	1580	54/60	1340	125	5,5	140	800	890
22	955/965	740/745	53/60	1860	64/70	1545	150	5,5	165	900	1000
25	1140/1165	885/900	62/70	2295	74/80	1770	-	-	-	-	-
27	1270/1290	980/1000	72/80	2610	72/80	2035	-	-	-	-	-

При проверке шин на электродинамическую устойчивость должно быть выполнено следующее условие:

$$\sigma_{расч} \leq \sigma_{дон}$$

где $\sigma_{расч}$ – расчетное напряжение на изгиб, возникающее в материале шин при протекании ударного тока трехфазного КЗ;
 $\sigma_{дон}$ – допустимое напряжение на изгиб материала шин.

Допустимые для ряда шин изгибающие напряжения, в зависимости от материала, представлены в табл. 7.

Таблица 7

Допустимые изгибающие напряжения для шин

Материал	Допустимые напряжения $\sigma_{\text{доп}}$, МПа
Медь МТ	140
Алюминий АТ	70
Алюминий АТТ	90
Сталь	160

Порядок определения расчетного напряжения $\sigma_{\text{расч}}$ следующий:

1. Вычисляют силу $F^{(3)}$, действующую на шину при протекании ударного тока трехфазного КЗ.

$$F^{(3)} = 1,76k_{\phi}i_y^{(3)2} \frac{l}{a} 10^1 [H], \quad (38)$$

где k_{ϕ} – коэффициент формы шин; $i_y^{(3)}$ – ударный ток трехфазного КЗ, кА; l – длина пролета, м; a – расстояние между осями, м.

Коэффициент k_{ϕ} , зависящий от формы, размеров шин и расстояния между ними, для прямоугольных шин находят по кривым (рис. 8) в зависимости от отношения $(a - b)/(b + h)$ и b/h . Если отношение $(a - b)/(b + h) \geq 2$ или шины с круглой площадью сечения, то $k_{\phi} = 1$.



Рис. 8.
Кривые для определения коэффициента формы шин прямоугольной площади поперечного сечения

2. Определяют момент сопротивления:

Если шины расположены в одной горизонтальной плоскости и установлены на ребро или они расположены в одной вертикальной плоскости и установлены плашмя,

$$W = \frac{b^2 h}{6}, [M^3], \quad (39)$$

где h – толщина шины, м; b – ширина шины, м.

Если шины расположены в одной горизонтальной плоскости и установлены плашмя или они расположены в одной вертикальной плоскости и установлены на ребро,

$$W = \frac{bh^2}{6}, [M^3]. \quad (40)$$

Момент сопротивления круглых шин

$$W = 0,1d^3, [M^3], \quad (41)$$

где d – диаметр шины, м.

Момент сопротивления шин трубчатого сечения

$$W = \frac{(D^4 - d^4)^3}{32D}, [M^3], \quad (42)$$

где D – наружный диаметр шины, м; d – внутренний диаметр шины, м.

3. Определяют расчетное напряжение $\sigma_{расч}$ (МПа) при изгибе: при одном или двух пролетах

$$\sigma_{расч} = \frac{F^{(3)}l}{8W}, [MПа], \quad (43)$$

при числе пролетов, большем двух

$$\sigma_{расч} = \frac{F^{(3)}l}{10W}, [MПа], \quad (44)$$

Пример 5. Выбрать шины для генераторного напряжения для электростанции при следующих исходных данных. Шины имеют две секции, работающие в нормальном режиме отдельно. Для каждой секции $I_{p,max} = 1,24$ кА. При аварии одной из секций нагрузки на другой секцию увеличиваются в 1,4 раза;

$$I^{(3)} = 7,85 \text{ кА}; \quad i_y^{(3)} = 20 \text{ кА}; \quad I^{(3)} = 4,42 \text{ кА}; \quad I^{(2)} = 6,3 \text{ кА}; \quad I^{(2)} = 5,5 \text{ кА}.$$

Расчетное время протекания тока КЗ при междуфазных КЗ $t_k = 1,5$ с. Шины устанавливаются в одной горизонтальной плоскости на ребро с пролетом $l = 1,5$ м и расстоянием между осями шин 0,25 м. Число пролетов больше двух.

Определяется $I_{p,форс}$ при выходе из работы одной секции шин

$$I_{p,форс} = 1,4I_{p,max} = 1,4 \cdot 1,24 = 1,74 \text{ кА}.$$

Исходя из выражения $I_{дон} \geq I_{p,форс}$, из справочника выбираются шины АТ 120 × 8 мм², допустимый ток – 1900 А (табл. 8), и проверяются на электродинамическую и термическую устойчивость.

Таблица 8

Длительно допустимые токи для шин прямоугольного сечения

Площадь поперечного сечения шин, мм	Длительно допустимые токовые нагрузки на шины, А		Площадь поперечного сечения шин, мм	Длительно допустимые токовые нагрузки на стальные шины, мм
	медные	алюминиевые		
15 × 3	210	165	16 × 2,5	55
20 × 3	275	215	20 × 2,5	60
50 × 5	860	665	40 × 3	125
100 × 8	2080	1625	100 × 3	305
120 × 8	2400	1900	24 × 4	70

Проверка шин на электродинамическую устойчивость.

По значениям

$$\frac{a}{b} \frac{v}{h} = \frac{250}{8} \frac{8}{120} = 1,89 \quad \text{и} \quad b/h = 8/120 = 0,06.$$

По кривым рис. 8 определяется коэффициент формы проводников прямоугольной площади поперечного сечения $k_\phi = 0,95$. Тогда сила, действующая на шины при трехфазном КЗ,

$$F^{(3)} = 1,76 k_\phi i_y^{(3)2} \frac{l}{a} 10^{-1} = 1,76 \cdot 0,95 \cdot 20^2 \frac{1,5}{0,25} 10^{-1} = 400 \text{ Н.}$$

Момент сопротивления при установке шин на ребро

$$W = \frac{b^2 h}{6} = \frac{8^3 \cdot 12 \cdot 10^{-2}}{6} = 1,28 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Расчетное напряжение

$$\sigma_{расч} = \frac{F^{(3)} l}{10W} = \frac{400 \cdot 1,5}{10 \cdot 1,28 \cdot 10^{-6}} = 46,8 \text{ МПа.}$$

Так как $\sigma_{доп} = 70$ МПа, то из этого следует, что шины механически устойчивы.

Проверка шин на термическую устойчивость.

Вычислив при трехфазном КЗ – степень асимметрии

$$\alpha^{(3)} = \frac{I^{(3)}}{I^{(3)}} = \frac{7,85}{4,42} = 1,73 \quad \text{и зная, что } t_k = 1,5 \text{ с, определяется по}$$

кривым приведенного времени периодическая слагающая тока КЗ (приложение В) $t_{np.n}^{(3)} = 1,53$ с.

$$I_{np.n}^{(2)} = \frac{I^{(2)}}{I_{доп}^{(2)}} = \frac{6,3}{5,5} = 1,15 \quad \text{и} \quad t_{np.n}^{(2)} = 1,38 \text{ с.}$$

Так как $t_k > 1$ с, то приведенное время аperiodической составляющей тока КЗ не учитывается. Сравнивая значения $I_{np.n}^{(3)2} t_{np.n}^{(3)} = 4,42^2 \cdot 1,53 = 30 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ и $I_{np.n}^{(2)2} t_{np.n}^{(2)} = 5,5^2 \cdot 1,38 = 41,8 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$, можно сделать вывод, что температура нагрева шин будет выше при двухфазном коротком замыкании.

Определяется температура шин до момента КЗ

$$t_{доп} = t_0 + \frac{I_{p.max}^2}{I_{доп}^2} = 25 + (70 - 25) \frac{1,24^2}{1,9^2} = 44,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

По значению $t_{доп} = 44,1 \text{ } ^\circ\text{C}$ определяется по кривым для определения температуры нагрева проводника при КЗ (рис. 9) для алюминия $A_p = 0,38 \times 10^4$. После этого, вычислив

$$A_k = A_p \frac{I_{np.n}^{(2)2}}{F} = 0,38 \cdot 10^4 \frac{5500^2}{120 \cdot 8} = 1,38 \cdot 0,385 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{мм}^2,$$

находится по графику (рис. 9) $t_k = 48 \text{ } ^\circ\text{C}$, что значительно меньше $t_{доп} = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$. Таким образом, выбранные шины удовлетворяют всем условиям и могут быть приняты к установке.

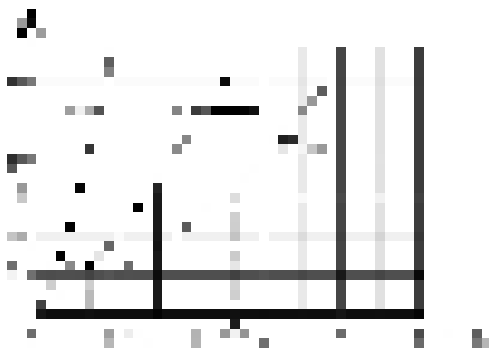


Рис. 9.
Кривые нагрева токоведущих частей при коротких замыканиях

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ И РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд. – М.: Главгосэнергонадзор России, 1999. – 928 с.
2. Правила устройства электроустановок. Раздел 4. Распределительные устройства и подстанции. Главы 4.1, 4.2. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 184 с.
3. Федоров, А. А. Учеб. пособие для курсового и дипломного проектирования по электроснабжению промышленных предприятий / А. А. Федоров, Л. Е. Старкова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 134 с.
4. Расчет коротких замыканий и выбор электрооборудования: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. И. П. Крючкова и В. А. Старшинова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 416 с.
5. РД 153-34.0-20. 527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под ред. Б. Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица П1

Расчётные выражения для определения приведённых значений
сопротивления

Элемент электроустановки	Исходные параметры	Именованные единицы, Ом	Относительные единицы (базисные)
Генератор	$X_{*d}^{\wedge}, S_{н.з.}$ $X_d^{\wedge} \%, S_{н.з.}$	$X \quad X_{уд}^{\wedge} \cdot \frac{U_{б}^2}{S_{н.з.}}$ $X \quad \frac{X_d^{\wedge} \%}{100} \cdot \frac{U_{б}^2}{S_{н.з.}}$	$X_{*б} \blacksquare X_{*d}^{\wedge} \cdot \frac{S_{б}}{S_{н.з.}}$ $X_{*б} \blacksquare \frac{X_d^{\wedge} \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{н.з.}}$
Система	$X_{*с.}, S_{н.с.}$ $S_{к.в.}, I_{н.отк.}$	$X \quad X_{*с.} \cdot \frac{U_{б}^2}{S_{н.с.}}$ $X \quad \frac{U_{б}^2}{S_{к.з.}} \cdot \frac{U_{б}^2}{\sqrt{3} \cdot I_{н.отк.} \cdot U_{ср.}}$	$X_{*б} \quad X_{*с.} \cdot \frac{S_{б}}{S_{н.с.}}$ $X_{*б} \quad \frac{S_{б}}{S_{к.з.}} \cdot \frac{S_{б}}{\sqrt{3} \cdot I_{н.отк.} \cdot U_{ср.}}$
Трансформатор двухобмоточный	$u_k \%, S_{н.т.}$	$X \quad \frac{x_m \%}{100} \cdot \frac{U_{б}^2}{S_{н.т.}}$	$X_{*б} \quad \frac{x_m \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{н.т.}}$
Трансформатор двухобмоточный с расщепленной обмоткой	$u_k \%, S_{н.т.}$	$X \quad \frac{(0,125 \blacksquare 1,75)x_m \%}{100} \cdot \frac{U_{б}^2}{S_{н.т.}}$	$X_{*б} \quad \frac{(0,125 \blacksquare 1,75)x_m \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{н.т.}}$
Реактор	$X_p \%, I_{н.р.}$	$X \blacksquare \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{U_{б}^2}{S_{н.р.}}$	$X_{*б} \quad \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{S_{б}}{S_{н.р.}}$
Линия электропередачи	X_0, l	$X \quad X_0 \cdot l \cdot \frac{U_{б}^2}{U_{ср}^2}$	$X_{*б} \quad X_0 \cdot l \cdot \frac{S_{б}}{U_{ср}^2}$

Примечание:

$S_{н.г.}, S_{н.т.}$ и $S_{н.с.}$ – номинальные мощности генератора, трансформатора системы соответственно, МВ·А;

$S_{б.}$ – базисная мощность, МВ·А;

$S_{н.с.}$ – мощность короткого замыкания системы, МВ·А;

$I_{н.отк.}$ – номинальный ток отключения выключателя, кА;

$X_{*ср.}$ – относительное сопротивление трансформатора, определяемое через $U_k, \%$;

$I_б$ – базисный ток, кА;

$U_{ср.}$ – среднее напряжение, кВ;

$X_{уд}$ – индуктивное сопротивление линии на 1 км длины, Ом/км;

l – длина линии, км;

$X_{*с.}$ – относительное номинальное сопротивление системы;

X_m – индуктивное сопротивление трансформатора, равное u_k .

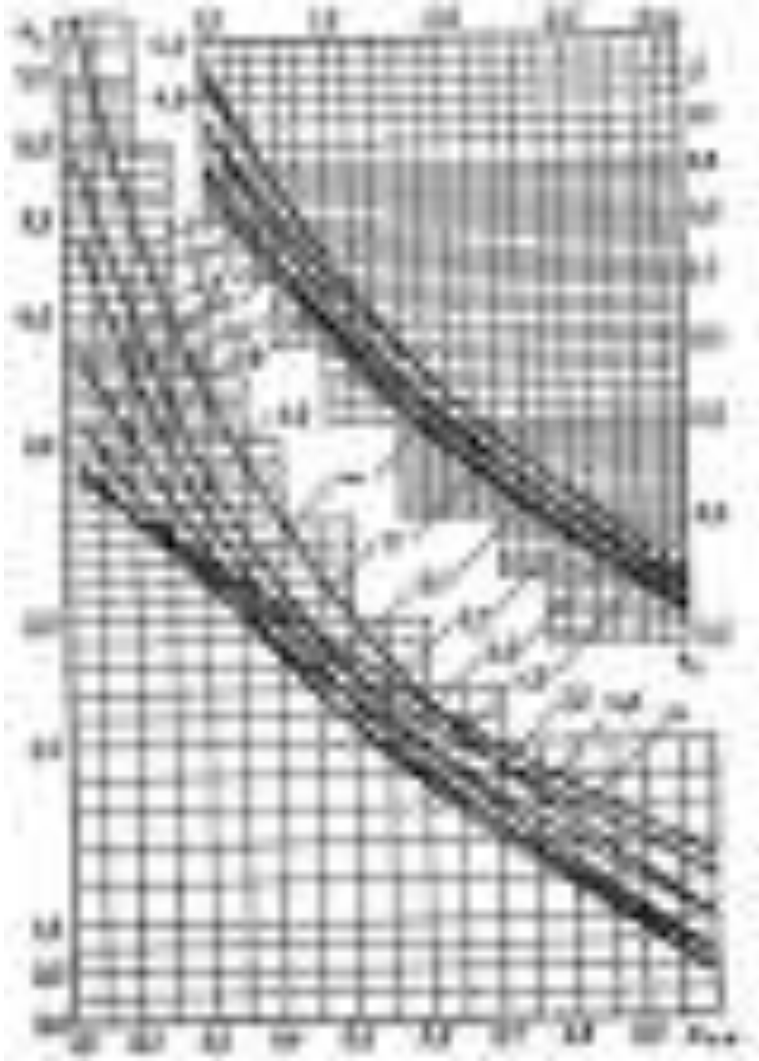


Рис. П1. Кривые затухания для турбогенераторов с АРВ

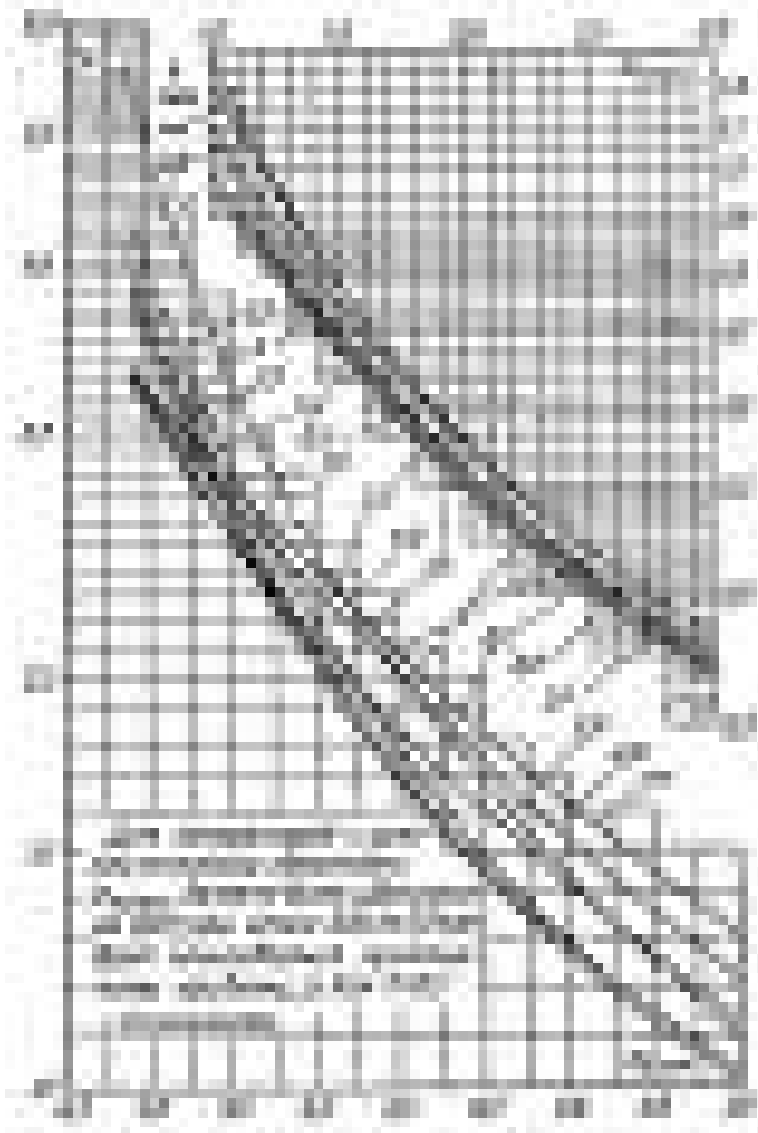


Рис. П2. Кривые затухания для гидрогенераторов с АРВ

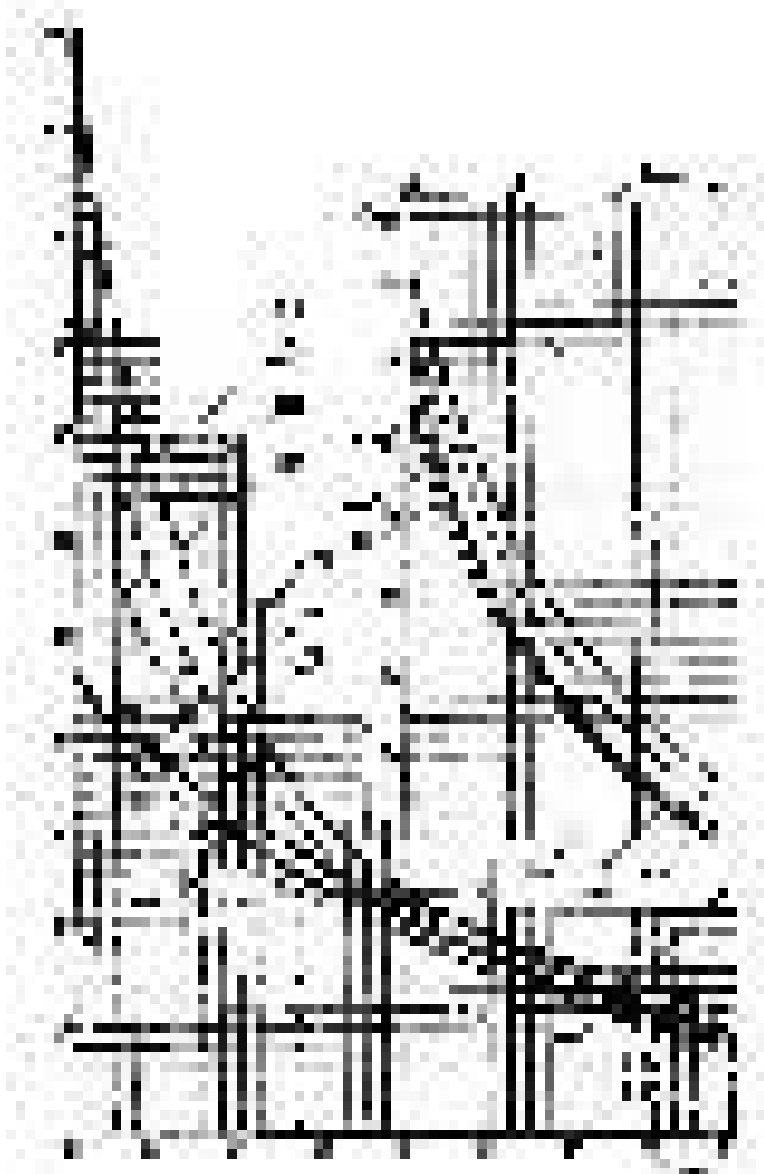


Рис. П3. Кривые затухания для генераторов 100–1500 кВА с АРВ

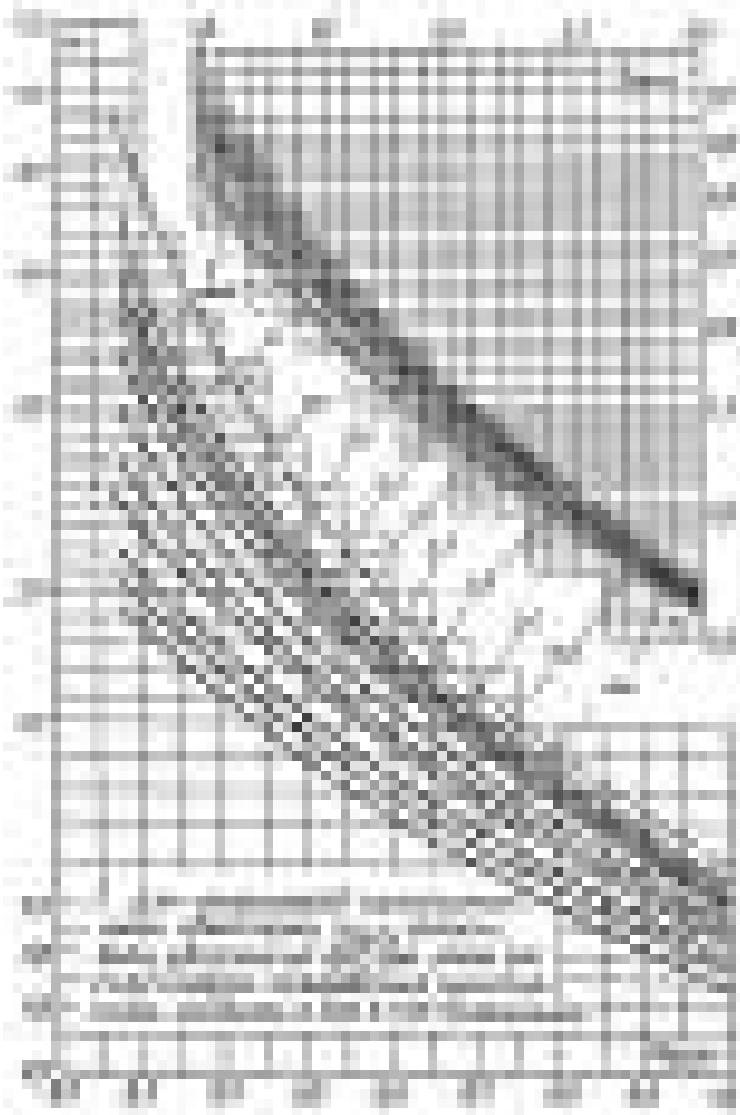


Рис. П4. Кривые затухания для гидрогенераторов без АРВ

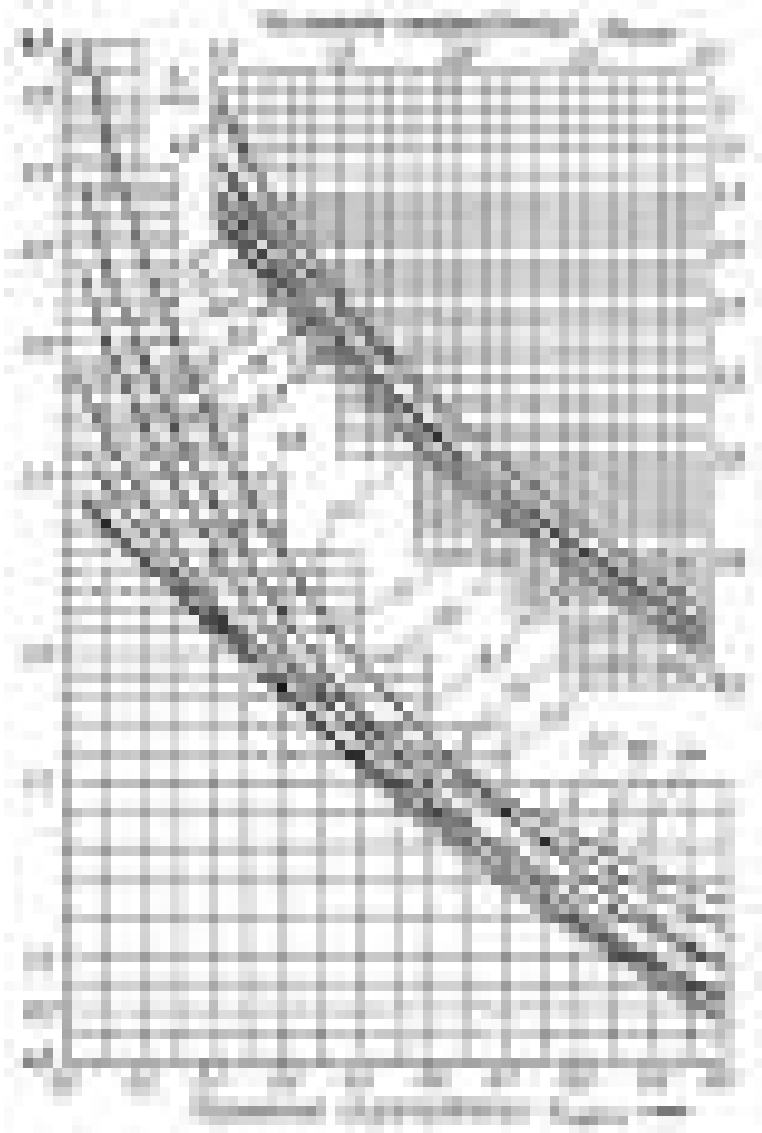


Рис. П5. Расчётные кривые для типового турбогенератора с АРВ

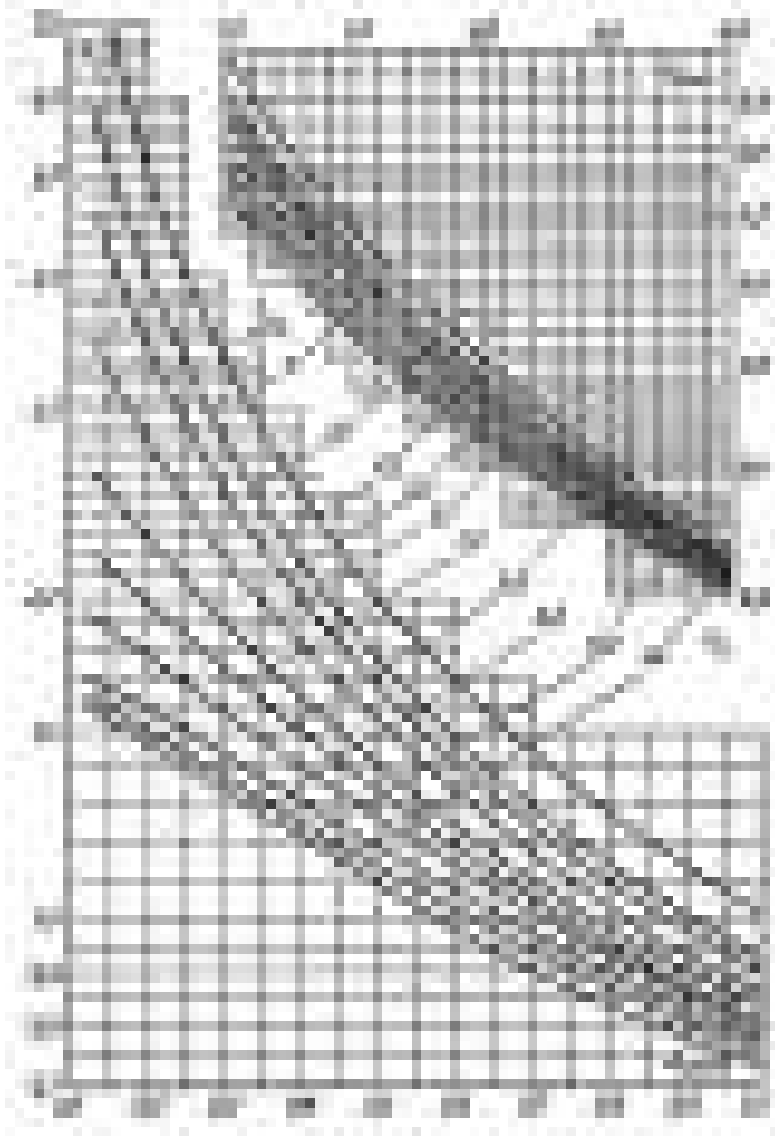


Рис. Пб. Расчётные кривые для типового турбогенератора без АРВ

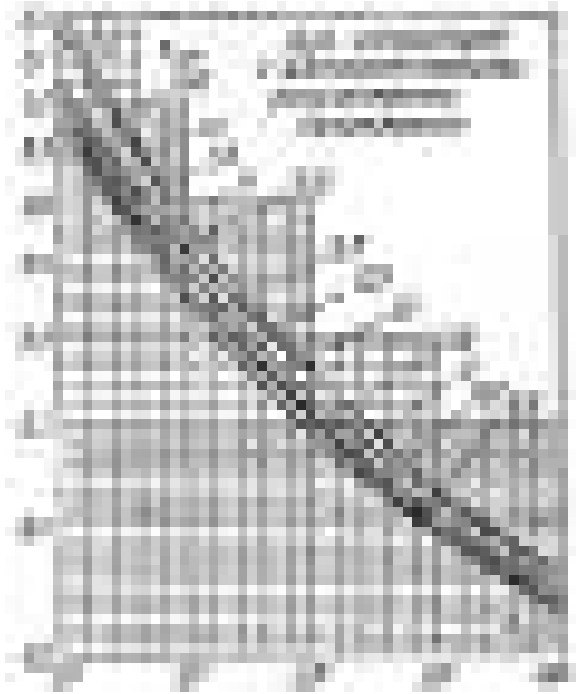


Рис. П7. Расчётные кривые для удалённого источника питания, содержащего турбогенераторы с АРВ

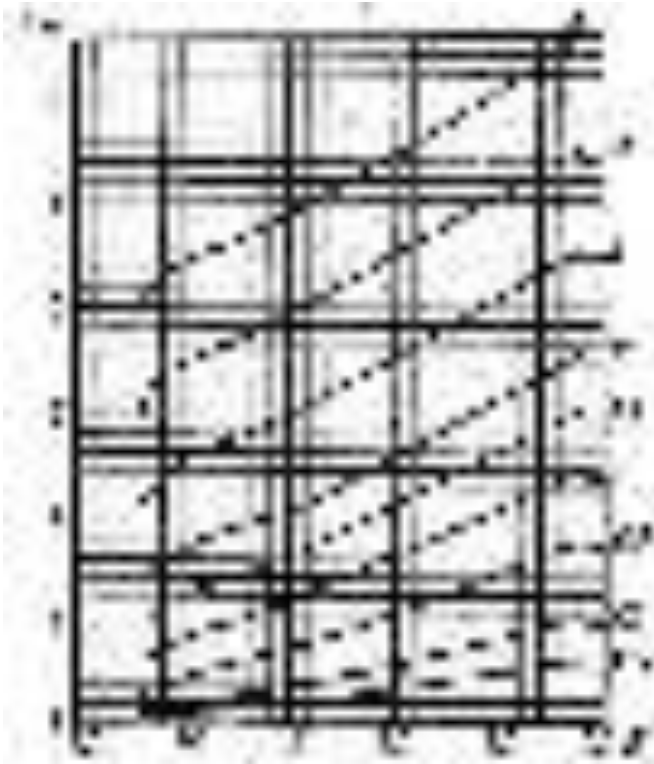


Рис. П8. Кривые приведённого времени периодической слагающей тока при питании от генератора с АРН

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Общие положения о расчете токов короткого замыкания.....	4
2. Определение сопротивления элементов цепи и приведение их к базисным условиям.....	5
3. Расчётная схема и схема замещения.....	8
4. Определение токов короткого замыкания в цепи, питающейся от системы неограниченной мощности.....	11
5. Определение токов короткого замыкания по расчётным кривым.....	15
6. Расчёт токов короткого замыкания в установках напряжением до 1000 В.....	19
7. Условия выбора аппаратов и токоведущих частей по режиму короткого замыкания.....	27
Список использованной и рекомендуемой литературы...	45
<i>Приложение А.</i> Расчётные выражения для определения приведённых значений сопротивления.....	46
<i>Приложение Б1.</i> Кривые затухания для турбогенераторов с АРВ.....	47
<i>Приложение Б2.</i> Кривые затухания для гидрогенераторов с АРВ.....	48
<i>Приложение Б3.</i> Кривые затухания для генераторов 100–1500 кВА с АРВ.....	49
<i>Приложение Б4.</i> Кривые затухания для гидрогенераторов без АРВ.....	50
<i>Приложение Б5.</i> Расчётные кривые для типового турбогенератора с АРВ.....	51
<i>Приложение Б6.</i> Расчётные кривые для типового турбогенератора без АРВ.....	52
<i>Приложение Б7.</i> Расчётные кривые для удалённого источника питания, содержащего турбогенераторы с АРВ.....	53
<i>Приложение В.</i> Кривые приведённого времени периодической слагающей тока при питании от генератора с АРН.....	54

Учебное издание

Сергей Викторович Хавроничев
Ирина Юрьевна Рыбкина

РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И
ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Учебное пособие

Редактор Попова Л. В.
Компьютерная верстка Сарафановой Н. М.
Темплан 2012 г., поз. № 10К
Подписано в печать 23. 05. 2012 г. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага листовая. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3,09.
Тираж 100 экз. Заказ №

Волгоградский государственный технический университет
400131, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.
Отпечатано в КТИ
403874, г. Камышин, ул. Ленина, 5.