

Ю.А. Ленъков  
Г.Х. Хожин

**ВЫБОР  
КОММУТАЦИОННЫХ  
АППАРАТОВ И  
ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ  
УСТРОЙСТВ  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

**Ю.А. Леньков, Г.Х. Хожин**

**ВЫБОР КОММУТАЦИОННЫХ  
АППАРАТОВ И ТОКОВЕДУЩИХ  
ЧАСТЕЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ  
УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ**

2005

ББК 31.277.1

УДК 621.316.3

**Рецензенты:**

д.т.н., профессор В.Г. Сальников,  
к.т.н., доцент Жумагулов К.К

**Л 46    Леньков Ю.А., Хожин Г.Х.**

Выбор коммутационных аппаратов и токоведущих частей распределительных устройств электрических станций и подстанций. – Павлодар. Изд-во ПГУ, 2005 – 210 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы выбора и проверки коммутационных аппаратов и токоведущих частей распределительных устройств электрических станций и подстанций с иллюстрацией конкретных примеров.

Учебное пособие предназначено для студентов электротехнических специальностей и может быть использовано инженерно-техническими работниками энергетических предприятий.

© Леньков Ю.А., Хожин Г.Х., 2005

## Содержание

1 Общие положения по выбору и проверке электрических аппаратов и токоведущих частей.....	4
1.1 Расчетные условия для выбора электрических аппаратов и токоведущих частей по продолжительным режимам работы.....	4
1.2 Расчетные условия для проверки электрических аппаратов и токоведущих частей по режиму короткого замыкания.....	8
2 Выбор коммутационных аппаратов.....	17
2.1 Выбор выключателей.....	17
2.2 Выбор разъединителей, отделителей и короткозамыкателей.....	34
2.3 Примеры выбора и проверки электрических аппаратов .....	36
3 Выбор измерительных трансформаторов.....	65
3.1 Выбор трансформаторов тока.....	65
3.2 Выбор трансформаторов напряжения.....	84
3.3 Примеры выбора и проверки измерительных трансформаторов.....	84
4 Выбор токоведущих частей и изоляторов распределительных устройств.....	86
4.1 Выбор шин закрытых распределительных устройств.....	91
4.2 Примеры выбора шин закрытых распределительных устройств.....	116
4.3 Выбор шин и токопроводов открытых распределительных устройств.....	118
4.3.1 Общие сведения.....	126
4.3.2 Выбор жестких шин открытых распределительных устройств.....	130
4.3.3 Примеры выбора и проверки жестких шин открытых распределительных устройств.....	134
4.3.4 Выбор гибких шин и токопроводов открытых распределительных устройств.....	151
4.3.5 Примеры выбора и проверки гибких шин и токопроводов открытых распределительных устройств.....	162
5 Выбор кабелей.....	172
5.1 Общие сведения.....	178
5.2 Выбор кабелей по допустимому току.....	182
5.3 Примеры выбора и проверки кабелей.....	185
6 Выбор токоограничивающих реакторов.....	191
6.1 Расчетные условия для выбора и проверки токоограничивающих реакторов.....	191
6.2 Примеры выбора и проверки токоограничивающих реакторов.....	195
Приложение А.....	202
Литература.....	206

# 1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ВЫБОРУ И ПРОВЕРКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ

## 1.1. Расчетные условия для выбора электрических аппаратов и токоведущих частей по продолжительным режимам работы

Электрические аппараты и токоведущие части любой электроустановки должны быть выбраны так, чтобы могли надежно работать как в нормальном режиме работы, так и при отклонении от него.

Выбор электрических аппаратов и токоведущих частей электроустановок производят по условиям работы в нормальном режиме и проверяют на термическую и динамическую устойчивость при коротком замыкании. Выбранные электрические аппараты и токоведущие части по условию длительного нагрева должны удовлетворять форсированному режиму работы электроустановки.

Рассмотрим некоторые конкретные случаи определения расчетных токов нормального и форсированного режимов работы электроустановки.

а) Цепь генератора.

Наибольший ток нормального режима определяется по выражению:

$$I_{\text{раб,ном}} = I_{\text{ном,г}} = \frac{P_{\text{ном,г}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}, \quad (1.1)$$

где  $I_{\text{раб,ном}} = I_{\text{ном,г}}$  - номинальный ток генератора, кА,

$P_{\text{ном,г}}$  - номинальная мощность генератора, МВт,

$U_{\text{ном}}$  - номинальное напряжение генератора, кВ,

$\cos \varphi_{\text{ном}}$  - номинальный коэффициент мощности генератора.

Ток форсированного режима определяется при условии работы генератора при снижении напряжения на пять процентов по выражению:

$$I_{\text{форс}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot 0,95 \cdot \cos \varphi_{\text{ном}}}. \quad (1.2)$$

б) Цепь двухобмоточного трансформатора.

Ток нормального режима определяется при номинальной мощности трансформатора и номинальном напряжении по выражению:

$$I_{\text{раб,ном}} = I_{\text{ном,т}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (1.3)$$

где  $S_{ном}$  - номинальная мощность трансформатора, МВА,

$U_{ном}$  - номинальное напряжение соответствующей обмотки трансформатора, кВ.

Ток форсированного режима определяется при условии отключения параллельно работающего трансформатора, когда оставшийся в работе трансформатор может быть перегружен по правилам аварийных длительных или систематических перегрузок, т.е.

$$I_{форс} = k_{2,доп} \cdot I_{ном,т}, \quad (1.4)$$

где  $k_{2,доп}$  - коэффициент аварийной допустимой или систематической перегрузки трансформатора.

в) Цепь трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора.

Загрузка обмоток высшего, среднего и низкого напряжений трансформаторов электростанции зависит от графиков нагрузки, на низком и среднем напряжении, и схемы соединения электростанции на низком напряжении. При блочном соединении генератора с трансформатором на стороне низкого напряжения ток нормального и форсированного режимов определяется по выражениям (1.1) и (1.2).

При поперечных связях между генераторами ток нормального и форсированного режимов на стороне высшего и низшего напряжений определяется по номинальной мощности трансформатора с учетом его перегрузки по выражениям (1.3) и (1.4). На стороне среднего напряжения, если отсутствует связь с энергосистемой, ток нормального и форсированного режимов определяется по выражениям:

$$I_{раб,норм} = \frac{S_{нагр}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \quad (1.5)$$

где  $S_{нагр}$  - мощность нагрузки на стороне среднего напряжения, МВА.

$$I_{форс} = 2 \cdot I_{раб,норм}. \quad (1.6)$$

Если к шинам среднего напряжения присоединена энергосистема и возможны перетоки мощности между высшим и средним напряжениями, то ток нормального и форсированного режимов определяется по выражениям (1.3) и (1.4).

Ток нормального и форсированного режимов обмоток трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора подстанции определяются с учетом фактической максимальной нагрузки каждой

обмотки.

г) Цепь линии.

Если линия одиночная, то  $I_{\text{раб, норм}} = I_{\text{форс}}$  определяется по максимальной нагрузке линии.

Для двух параллельно работающих линий ток нормального и форсированного режимов определяется по выражениям:

$$I_{\text{раб, норм}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (1.7)$$

где  $S_{\text{нагр}}$  - наибольшая мощность потребителей, присоединенных к линиям.

$$I_{\text{форс}} = 2 \cdot I_{\text{раб, норм}}. \quad (1.8)$$

Для  $n$  параллельных линий ток нормального и форсированного режимов определяется по выражениям:

$$I_{\text{раб, норм}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (1.9)$$

$$I_{\text{форс}} = \frac{n}{n-1} \cdot I_{\text{раб, норм}}. \quad (1.10)$$

д) Цепь секционных, шиносоединительных выключателей, сборные шины.

Ток нормального режима определяется с учетом токораспределения по шинам при наиболее неблагоприятном эксплуатационном режиме [1]. Обычно ток, проходящий по сборным шинам, секционному и шиносоединительному выключателям, не превышает максимального тока самого мощного генератора или трансформатора, присоединенного к этим шинам.

## 1.2 Расчетные условия для проверки электрических аппаратов и токоведущих частей по режиму короткого замыкания

При проверке выбранных электрических аппаратов и токоведущих частей электроустановки на термическую и динамическую устойчивость при коротком замыкании (КЗ) необходимо правильно выбрать положение расчетной точки и расчетный вид КЗ.

Расчетную точку КЗ для проверки выбирают так, чтобы через электрический аппарат или токоведущую часть электроустановки протекал наибольший ток КЗ.

Расчетным видом КЗ, для проверки электрических аппаратов и токоведущих частей на динамическую и термическую устойчивость, является трехфазное КЗ [2]. По трехфазному току КЗ производится так же проверка выключателей на отключающую способность, а в сетях напряжением 110 кВ и выше - дополнительно по однофазному току КЗ. При проверке на термическую стойкость проводников и аппаратов в цепях генераторного напряжения электростанций расчетным током короткого замыкания может быть двухфазное КЗ, если оно обуславливает больший нагрев проводников и аппаратов, чем при трехфазном КЗ [2].

Для проверки электрических аппаратов и токоведущих частей на термическую устойчивость, а выключателей дополнительно на отключающую способность, необходимо знать расчетное время протекания тока КЗ, т.е. время через которое происходит отключение тока КЗ. Согласно [2, 3] время отключения тока КЗ  $t_{отк}$  для проверки проводников и электрических аппаратов на термическую стойкость складывается из времени действия основной релейной защиты рассматриваемой цепи  $t_{р,з}$  и полного времени отключения выключателя  $t_{отк,выкл}$ :

$$t_{отк} = t_{р,з} + t_{отк,выкл} = 0,01 + t_{отк,выкл} . \quad (1.11)$$

Электрические аппараты и токопроводы, применяемые в цепях генераторов мощностью 63 МВт и более, а также в цепях блоков генератор-трансформатор такой же мощности, должны проверяться по термической устойчивости, исходя из времени протекания тока КЗ четыре секунды [3].

При проверке электрических аппаратов на отключающую способность в качестве расчетного времени протекания тока КЗ  $t_{отк}$  следует принимать сумму минимального времени действия релейной защиты  $t_{р,з}$  данного присоединения и собственного времени отключения выключателя  $t_{с,выкл}$ , т.е.  $t_{отк} = t_{р,з} + t_{с,выкл} = 0,01 + t_{с,выкл}$  [2].

Термическая устойчивость (стойкость) электрических аппаратов и

токоведущих частей проверяется по тепловому импульсу тока КЗ.

Электрический аппарат удовлетворяет условию термической стойкости, если выполняется условие

$$B_{\kappa} \leq B_{тер, доп}, \quad (1.12)$$

где  $B_{\kappa}$  - тепловой импульс (интеграл Джоуля) тока КЗ в рассматриваемой цепи,  $A^2 \cdot c$ ;

$B_{тер, доп}$  - допустимое значение теплового импульса (интеграла Джоуля) для проверяемого аппарата,  $A^2 \cdot c$ .

Проводник удовлетворяет условию термической стойкости, если конечная его температура  $\vartheta_{\kappa}$  к моменту отключения КЗ не превышает предельно допустимую температуру нагрева при КЗ  $\vartheta_{\kappa, доп}$ , т.е. если выполняется условие:  $\vartheta_{\kappa} \leq \vartheta_{\kappa, доп}$  [2].

Определение теплового импульса тока КЗ  $B_{\kappa}$  для оценки термической стойкости зависит от местоположения точки КЗ в рассматриваемой электроустановке. В соответствии с [4, 5] можно выделить три основных случая: удаленное КЗ, КЗ вблизи генераторов и КЗ вблизи группы электродвигателей. Тепловой импульс тока КЗ имеет две составляющие: периодическую  $B_{\kappa, n}$  и аperiodическую  $B_{\kappa, a}$ :

$$B_{\kappa} = B_{\kappa, n} + B_{\kappa, a}. \quad (1.13)$$

При удаленном КЗ, если отношение действующего значения периодической составляющей тока любого генератора (синхронного компенсатора) в начальный момент КЗ к его номинальному току меньше двух, т. е. при  $I_{*n,0(ном)} = I_{n,0} / I_{ном} < 2$ , это обычно сборные шины напряжением 35 кВ и выше, все источники исходной схемы объединяются в один эквивалентный источник. В этом случае периодическая составляющая тока КЗ принимается незатухающей, т.е.  $I_{n,0,c} = I_{n,0}$ , а

апериодическая составляющая затухающей по экспоненте с постоянной времени системы  $T_{a,c}$ , которая берется из таблицы 1.1. Таким образом, при удаленном КЗ, тепловой импульс тока КЗ согласно [2] определяется по формуле:

$$B_{\kappa} = I_{n,0}^2 \cdot \left[ t_{отк} + T_{a,c} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2 \cdot t_{отк}}{T_{a,c}}} \right) \right], \quad (1.14)$$

где  $I_{n,0}$  - начальное значение периодической составляющей тока КЗ от эквивалентного источника.

В том случае, если  $t_{отк} \geq 3 \cdot T_{a,c}$  тепловой импульс тока КЗ можно определять по формуле

$$B_{\kappa} = I_{n,0}^2 (t_{отк} + T_{a,c}). \quad (1.15)$$

Таблица 1.1 - Значения постоянной времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания

Элементы или части энергосистемы	$T_a, \text{ с}$
Турбогенераторы мощностью:	
12 ÷ 63 МВт	0,16 ÷ 0,25
100 ÷ 1000 МВт	0,40 ÷ 0,54
Блоки, состоящие из турбогенератора мощностью 63 МВт и трансформатора при номинальном напряжении генератора:	
6,3 кВ	0,20
10,0 кВ	0,15
Блоки, состоящие из турбогенератора и трансформатора, при мощности генераторов:	
100 ÷ 200 МВт	0,26

300 МВТ	0,32
500 МВТ	0,35
800 МВТ	0,30
Система, связанная с шинами, где рассматривается короткое замыкание, воздушными линиями напряжением:	
35 кВ	0,02
110 ÷ 150 кВ	0,02 ÷ 0,03
220 ÷ 330 кВ	0,03 ÷ 0,04
500 ÷ 750 кВ	0,06 ÷ 0,08
Система, связанная со сборными шинами 6 - 10 кВ через трансформаторы мощностью:	
80 МВА и выше	0,06 ÷ 0,15
32 ÷ 80 МВА	0,05 ÷ 0,10
5,6 ÷ 32 МВА	0,02 ÷ 0,05
Ветви, защищенные реактором с номинальным током:	
1000 А и выше	0,23
630 А и ниже	0,10

По выражению (1.15) можно вычислять тепловой импульс тока КЗ в цепях генераторного напряжения ТЭЦ, если место КЗ находится за реактором, а также на шинах низкого напряжения подстанций, если нет крупных электродвигателей и синхронных компенсаторов.

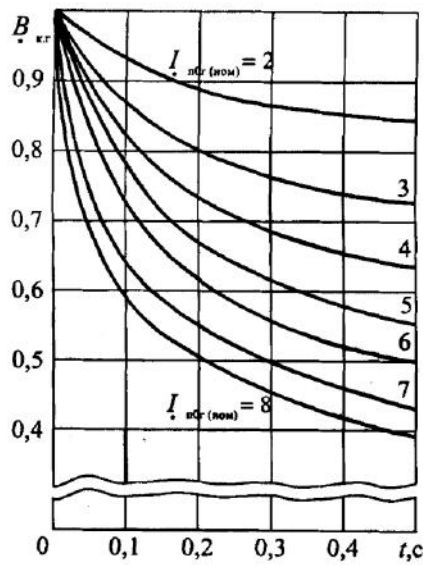
При КЗ вблизи генератора, последний выделяется в отдельную ветвь, а все остальные источники объединяются в эквивалентный источник. В этом случае апериодическая  $B_{к,а}$  и периодическая  $B_{к,п}$  составляющие теплового импульса тока КЗ определяются по выражениям:

$$B_{к,п} = I_{н,0,с}^2 \cdot t_{отк} + B_{*к,з} \cdot I_{н,0,з}^2 \cdot t_{отк} + 2I_{н,0,с} \cdot I_{н,0,з} \cdot Q_{*к,з} \cdot t_{отк}, \quad (1.16)$$

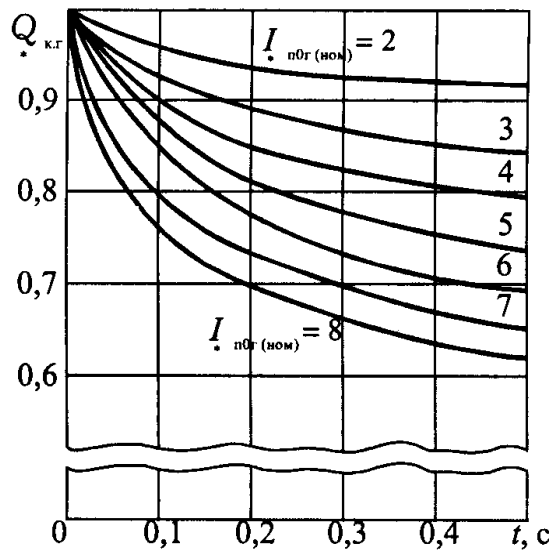
где  $I_{n,0,\varepsilon}$  - начальный периодический ток генераторов эквивалентного источника;

$B_{*K,\varepsilon}$  - относительный тепловой импульс тока КЗ от периодической составляющей тока генераторов, определяемый по [2] или кривым, представленным на рисунке 1.1,а;

$Q_{*K,\varepsilon}$  - относительный токовый импульс от генераторов, определяемый по [2] или кривым рисунка 1.1,б.



а



б

Рисунок 1.1- Кривые для определения относительного теплового импульса тока КЗ  $B_{*K,\varepsilon}$  и относительного токового импульса  $Q_{*K,\varepsilon}$  от синхронных генераторов с тиристорной системой возбуждения

$$B_{K,a} = I_{n,0,\varepsilon}^2 \cdot T_{a,c} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2t_{омк}}{T_{a,c}}} \right) + I_{n,0,\varepsilon}^2 \cdot T_{a,\varepsilon} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2t_{омк}}{T_{a,\varepsilon}}} \right) + \\ + \frac{4 \cdot I_{n,0,\varepsilon} \cdot I_{n,0,\varepsilon}}{1/T_{a,c} + 1/T_{a,\varepsilon}} \left[ 1 - e^{-\frac{t_{омк}(T_{a,c} + T_{a,\varepsilon})}{T_{a,c} \cdot T_{a,\varepsilon}}} \right], \quad (1.17)$$

где  $T_{a,c}, T_{a,z}$  - постоянные времени изменения токов в цепях системы и генераторов, определяемые по таблице 1.1, с.

В том случае, если  $3 \cdot T_{a,z} > t_{отк} \geq 3 \cdot T_{a,c}$ , тепловой импульс тока КЗ допускается определять по выражению [2]

$$B_{\kappa} = (I_{n,0,c}^2 + 2 \cdot I_{n,0,c} \cdot I_{n,0,z} \cdot Q_{*\kappa,z} + I_{n,0,z}^2 \cdot B_{*\kappa,z}) \cdot t_{отк} + I_{n,0,c}^2 \cdot T_{a,c} + I_{n,0,z}^2 \cdot T_{a,z} \cdot (1 - e^{-\frac{2t_{отк}}{T_{a,z}}}) + \frac{4 \cdot I_{n,0,c} \cdot I_{n,0,z}}{1/T_{a,c} + 1/T_{a,z}}. \quad (1.18)$$

Если же  $t_{отк} \geq 3 \cdot T_{a,z}$ , то тепловой импульс тока КЗ можно рассчитывать по формуле

$$B_{\kappa} = (I_{n,0,c}^2 + 2I_{n,0,c} \cdot I_{n,0,z} \cdot Q_{*\kappa,z} + I_{n,0,z}^2 \cdot B_{*\kappa,z}) \cdot t_{отк} + I_{n,0,c}^2 \cdot T_{a,c} + I_{n,0,z}^2 \cdot T_{a,z} + \frac{4I_{n,0,c} \cdot I_{n,0,z}}{1/T_{a,c} + 1/T_{a,z}}. \quad (1.19)$$

При КЗ вблизи группы электродвигателей все электродвигатели заменяются эквивалентным электродвигателем, а все источники объединяются в эквивалентный источник, который является системой по отношению к эквивалентному электродвигателю. Для определения суммарного теплового импульса тока КЗ с учетом электродвигателей рекомендуется [2] пользоваться выражениями (1.16) - (1.19), в которых необходимо заменить  $I_{n,0,z}$  и  $T_{a,z}$  соответственно на  $I_{n,0,d}$  и  $T_{a,d}$  эквивалентного электродвигателя.

Согласно [1, 6] группа электродвигателей заменяется эквивалентным электродвигателем со следующими параметрами: постоянная времени периодической составляющей тока  $T_{\varepsilon\kappa} = 0,07с$ ; постоянная времени аperiodической составляющей тока  $T_{a,d} = 0,04с$ , коэффициент полезного действия  $\eta_d = 0,94$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi_d = 0,87$ , кратность пускового тока  $k_{пуск} = 5,6$ .

Начальный периодический ток эквивалентного электродвигателя определяется по выражению

$$I_{n,0,\delta} = k_{\text{пуск}} \cdot \frac{\sum P_{\text{ном},\delta}}{\eta_{\delta} \cdot \cos \varphi_{\delta} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном},\delta}} = 4,0 \cdot \frac{\sum P_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}}. \quad (1.20)$$

Относительный тепловой импульс тока КЗ  $B_{*К,\delta}$  и относительный токовый импульс  $Q_{*К,\delta}$  от эквивалентного электродвигателя определяются по [2] или кривым, приведенным на рисунках 1.2 и 1.3.

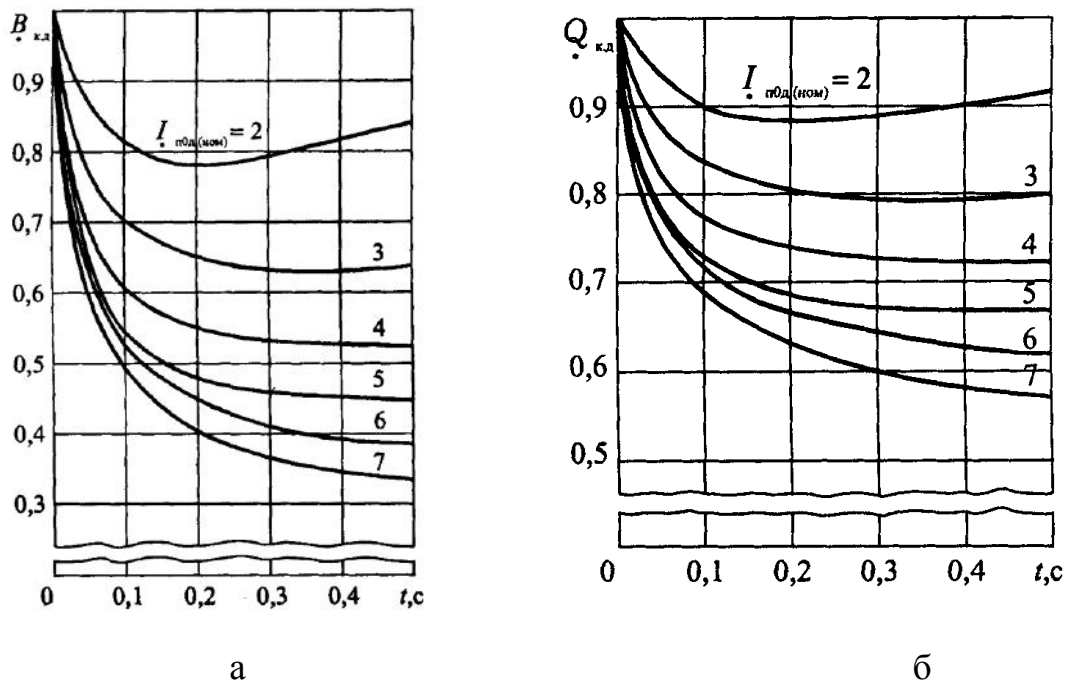


Рисунок 1.2-Кривые для определения относительного теплового импульса тока КЗ  $B_{*К,\delta}$  и относительного токового импульса  $Q_{*К,\delta}$  от синхронного электродвигателя

Допустимое значение теплового импульса  $B_{\text{тер},\text{дон}}$  для коммутационных аппаратов зависит не только от указанного заводом-изготовителем нормированного тока термической стойкости  $I_T$ , но и от соотношения между расчетной продолжительностью тока КЗ  $t_{\text{отк}}$  и допустимым временем термической стойкости  $t_T$  [2].

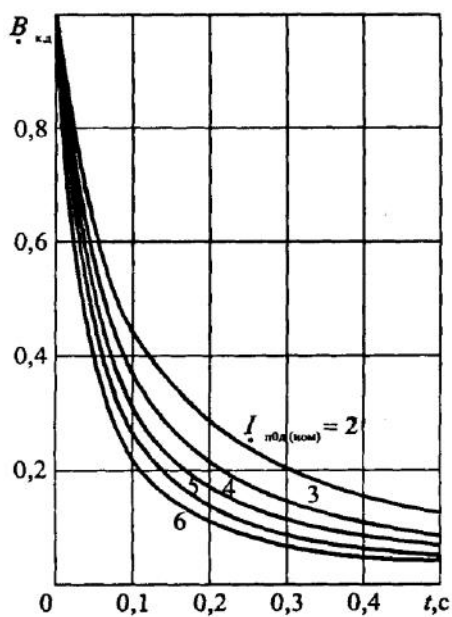
Если  $t_{\text{отк}} \geq t_T$  в этом случае допустимое значение теплового

импульса  $B_{тер, доп}$  равно

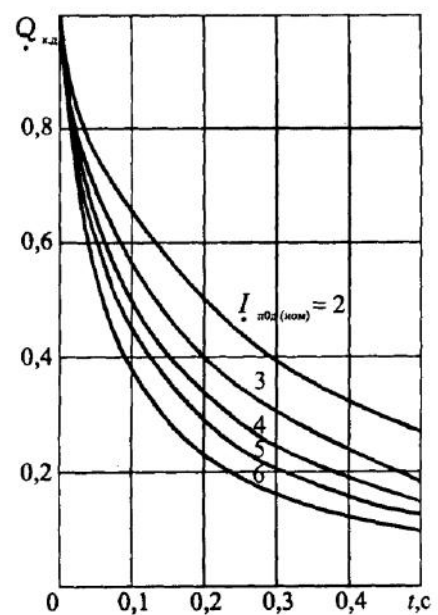
$$B_{тер, доп} = I_T^2 \cdot t_T. \quad (1.21)$$

В том случае если  $t_{отк} \leq t_T$ , то допустимое значение теплового импульса  $B_{тер, доп}$  равно

$$B_{тер, доп} = I_T^2 \cdot t_{отк}. \quad (1.22)$$



а



б

Рисунок 1.3-Кривые для определения относительного теплового импульса тока КЗ  $B_{*к, доп}$  и относительного токового импульса  $Q_{*к, доп}$  от асинхронного электродвигателя

## 2 ВЫБОР КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

### 2.1 Выбор выключателей

Выключатель- это коммутационный аппарат, предназначенный для отключения и включения электрической цепи в различных режимах

работы. Выключатели должны надежно отключать токи нормального режима и режима КЗ, а также малые индуктивные и емкостные токи без появления при этом опасных коммутационных перенапряжений.

При проектировании электроустановок первоначально намечают типы выключателей, а затем производят их выбор по следующим параметрам [1,7]:

а) по напряжению электроустановки

$$U_{уст} \leq U_{ном}, \quad (2.1)$$

где  $U_{уст}$  - номинальное напряжение установки;

$U_{ном}$  - номинальное напряжение выключателя;

б) по длительному току в нормальном и форсированном режимах работы

$$I_{раб,норм} \leq I_{ном}; \quad I_{форс} \leq I_{ном}; \quad (2.2)$$

в) по отключающей способности

При выборе выключателя по отключающей способности сначала производится проверка на симметричный ток отключения по условию:

$$I_{n,\tau} \leq I_{отк,ном}, \quad (2.3)$$

где  $I_{n,\tau}$  - периодическая составляющая тока короткого замыкания, для момента времени  $\tau = t_{отк} = t_{с.в.выкл} + 0,01$ .

Далее проверяют выключатель на возможность отключения апериодической составляющей тока КЗ  $i_{a,\tau}$  по условию:

$$i_{a,\tau} \leq i_{a,ном} = \frac{\sqrt{2} \cdot \beta_{ном} \cdot I_{отк,ном}}{100}, \quad \text{или} \quad \beta \leq \beta_{ном}; \quad (2.4)$$

где  $i_{a,ном}$  - номинальное допускаемое значение апериодической составляющей в отключающем токе для момента времени  $\tau = t_{отк}$ ;

$\beta_{ном}$  - нормированное значение содержания апериодической составляющей в отключаемом токе, %, которое берется по каталогу для выбранного выключателя. Если  $\beta_{ном}$  отсутствует для данного типа

выключателя, то оно может быть определено по кривой  $\beta_{ном} = f(\tau)$  представленной на рисунке 2.1 или рассчитано для момента времени  $\tau$  по выражению:

$$\beta_{ном} = e^{-22,5 \cdot \tau}, \quad (2.5)$$

$i_{a,\tau}$  - апериодическая составляющая тока КЗ в момент расхождения контактов выключателя  $\tau$ ;

$\beta$  - процентное содержание апериодической составляющей в отключаемом токе КЗ, которое определяется по выражению:

$$\beta = \frac{i_{a,\tau}}{\sqrt{2} \cdot I_{n,\tau}} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Если условие (2.3) выполняется, а (2.4) не выполняется, то допускается проверку выключателя по отключающей способности производить по полному току КЗ:

$$(\sqrt{2} \cdot I_{n,\tau} + i_{a,\tau}) \leq \sqrt{2} \cdot I_{отк,ном} \cdot \left(1 + \frac{\beta_{ном}}{100}\right); \quad (2.7)$$

или

$$I_{отк,ном} \geq I_{n,\tau} \cdot \frac{1 + \beta/100}{1 + \beta_{ном}/100} \quad (2.8)$$

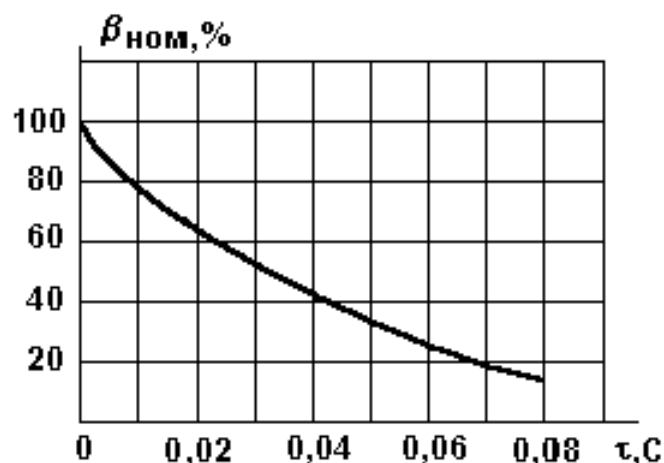


Рисунок 2.1-Нормированное содержание апериодической составляющей в отключаемом токе

Проверка выключателя по включающей способности производится по условию:

$$i_y \leq i_{\text{вкл,ном}}; \quad I_{n,0} \leq I_{\text{вкл,ном}}, \quad (2.9)$$

где  $i_y$  - ударный ток КЗ в месте установки выключателя,

$I_{n,0}$  - начальное значение периодической составляющей тока КЗ в месте установки выключателя,

$I_{\text{вкл,ном}}$  - номинальный ток включения выключателя, равный номинальному току отключения (начальное действующее значение периодической составляющей);

$$i_{\text{вкл,ном}} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{вкл,ном}} - \text{наибольший пик тока включения.}$$

На электродинамическую стойкость выключатель проверяется по двум условиям:

$$I_{\text{дин}} \geq I_{n,0}; \quad i_{\text{дин}} \geq i_y, \quad (2.10)$$

где  $I_{\text{дин}}$  - начальное действующее значение периодической составляющей сквозного предельного тока КЗ, равное номинальному току отключения выключателя;

$$i_{\text{дин}} = 2,55 \cdot I_{\text{отк,ном}} - \text{наибольший пик сквозного предельного тока КЗ.}$$

На термическую стойкость выключатель проверяется по тепловому импульсу тока КЗ в соответствии с выражением (1.12).

Согласно ПУЭ намеченные к установке выключатели должны быть проверены по параметрам переходного восстанавливающегося напряжения (ПВН) на контактах выключателя. ПВН появляется на контактах выключателя после погасания в нем электрической дуги [5,7] .

Для воздушных выключателей рекомендуется выполнить сначала приближенную проверку скорости восстановления напряжения [8]:

$$V = 0,2 \cdot \frac{I_{n,0}^{(3)}}{n} \leq 0,4 \text{ кВ/мкс}, \quad (2.11)$$

где  $I_{n,0}^{(3)}$  - расчетный ток трехфазного КЗ;

$n$  - количество линий, не считая поврежденной.

Если условие (2.11) не выполняется, необходимо произвести уточненный расчет.

Для уточненной проверки выключателей по параметрам восстанавливающегося напряжения необходимо сопоставить расчетную кривую переходного восстанавливающегося напряжения с нормированной. Расчетная кривая ПВН не должна выходить за пределы нормированной характеристики ПВН выключателя и один лишь раз должна пересекать линию запаздывания. Линия запаздывания параллельна начальной части нормированной характеристики ПВН выключателя и определяется двумя координатами  $u'$  и  $t_d$ . Для выключателей напряжением 110 кВ и выше  $u' = 0,5 \cdot u_1$ , а координата  $t_d$  установлена равной 2, 4 и 8 мкс в зависимости от отключаемого тока, равного соответственно 100, 60 и 30% номинального тока отключения.

Нормированная характеристика переходного восстанавливающегося напряжения для сетей с эффективно заземленной нейтралью, напряжением 110 кВ и выше, задается четырьмя координатами  $u_1, t_1$  и  $u_c, t_2$ . Нормированные характеристики ПВН для выключателей напряжением 110 кВ и выше приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Нормированные характеристики ПВН для выключателей напряжением 110 кВ и выше.

$\frac{U_{ном}}{U_{макс}}$	$I_{отк, ном}, \text{ кА}$	$\frac{I_{н,0}}{I_{отк}} \%$	$u_1, \text{ кВ}$	$t_1, \text{ мкс}$	$u_c, \text{ кВ}$	$t_2, \text{ мкс}$	$V_{ном}, \text{ кВ/мкс}$
<u>110</u>	$\leq 31,5$	100	134	112	187	336	1,2
	40,0			96		288	1,4
	50,0			89		267	1,5
	$\geq 63,0$			79		237	1,7
126	$\leq 31,5$	60	134	56	200	168	2,4
	40,0			48		144	2,8
	50,0			44		132	3,0
	$\geq 63,0$			39		117	3,4

$\frac{U_{ном}}{U_{макс}}$	$I_{отк, ном}, \text{ кА}$	$\frac{I_{п,0}}{I_{отк}} \%$	$u_1, \text{ кВ}$	$t_1, \text{ мкс}$	$u_c, \text{ кВ}$	$t_2, \text{ мкс}$	$V_{ном}, \text{ кВ/мкс}$
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	30		22 19 18 16	200	66 57 54 48	6,0 7,0 7,5 8,5
<u>150</u> 172	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	100	183	152 131 122 108	256	456 393 366 324	1,2 1,4 1,5 1,7
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	60		76 65 61 54	274	228 195 183 162	2,4 2,8 3,0 3,4
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	30		30 26 24 22	274	90 78 72 66	6,0 7,0 7,5 8,5
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	100		222 191 167 148	374	666 573 501 444	1,2 1,4 1,6 1,8
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	60		111 95 83 74	400	333 285 249 222	2,4 2,8 3,2 3,6

$\frac{U_{ном}}{U_{макс}}$	$I_{отк, ном}, \text{кА}$	$\frac{I_{п,0}}{I_{отк}} \%$	$u_1, \text{кВ}$	$t_1, \text{мкс}$	$u_c, \text{кВ}$	$t_2, \text{мкс}$	$V_{ном}, \text{кВ/мкс}$
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	30		44 38 33 30	400	132 114 99 90	6,0 7,0 8,0 9,0
<u>330</u> 363	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	100	385	321 257 214 192	540	963 771 642 576	1,2 1,5 1,8 2,0
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	60		160 128 107 96	580	480 384 321 288	2,4 3,0 3,6 4,0
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	30		64 51 43 38	580	192 153 129 114	6,0 7,5 9,0 10,0
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	100		348 309 268 232	780	1044 927 795 696	1,6 1,8 2,1 2,4
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	60		174 155 133 116	835	522 465 393 348	3,2 3,6 4,2 4,8

$\frac{U_{ном}}{U_{макс}}$	$I_{отк, ном}, \text{ кА}$	$\frac{I_{п,0}}{I_{отк}} \%$	$u_1, \text{ кВ}$	$t_1, \text{ мкс}$	$u_c, \text{ кВ}$	$t_2, \text{ мкс}$	$V_{ном}, \text{ кВ/мкс}$
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	30		70 62 53 46	835	210 186 159 138	8,0 9,0 10,5 12,0
<u>750</u> 787	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	100	835	491 418 334 309	1170	1473 1254 1002 927	1,7 2,0 2,5 2,7
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	60		246 209 167 155	1250	738 627 501 465	3,4 4,0 5,0 5,4
	$\leq 31,5$ 40,0 50,0 $\geq 63,0$	30		98 84 70 62	1250	294 250 210 186	8,5 10,0 12,0 13,5

Нормированная характеристика ПВН для сетей с незаземленной нейтралью или заземленной через дугогасительные реакторы с номинальным напряжением 6÷35 кВ задается двумя координатами  $u_c$  и  $t_3$ . Линия запаздывания для данных выключателей определяется координатами  $u' = u_c/3$  и  $t_d = 0,15 \cdot t_3$  [5]. Нормированные характеристики ПВН для выключателей напряжением до 35 кВ включительно приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Нормированные характеристики ПВН для выключателей напряжением до 35 кВ

$\frac{U_{ном}}{U_{макс}}$	$\frac{I_{п,0}}{I_{отк}}, \%$	$u_c, \text{ кВ}$	$t_3, \text{ мкс}$	$V_{ном}, \text{ кВ/мкс}$
6,0/7,2	100	12,3	35,0	0,35
	60	13,2	15,0	0,88
	30	13,2	7,5	1,75
10,0/12,0	100	20,6	51,0	0,40
	60	22,0	22,0	1,00
	30	22,0	11,0	2,00
15,0/17,5	100	30,0	60,0	0,50
	60	32,1	26,0	1,25
	30	32,1	13,0	2,50
20,0/24,0	100	41,1	75,0	0,55
	60	44,1	32,0	1,36
	30	44,1	16,0	2,75
35,0/40,5	100	69,4	99,0	0,70
	60	74,4	42,0	1,75
	30	74,4	21,0	3,50

Аналитический расчет ПВН для проверки выключателей может быть выполнен приближенно с рядом упрощений [5]. При расчете ПВН не учитываются активные сопротивления элементов расчетной схемы и влияние короны воздушных линий электропередач (ЛЭП); изменение отключаемого тока вблизи его нулевого значения принимается линейным; воздушные ЛЭП, подключенные к системе сборных шин распределительного устройства, представляются активными сопротивлениями, равными эквивалентным волновым сопротивлениям линий [6].

Для одноцепных ЛЭП могут быть приняты следующие средние

значения волновых сопротивлений прямой последовательности представленные в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Средние значения волновых сопротивлений прямой последовательности для одноцепных ЛЭП

$U_{ном}, \text{ кВ}$	110 - 330	500	750	1150
$Z_1, \text{ Ом}$	450	360	325	300

Волновые сопротивления нулевой последовательности  $Z_0$  для одноцепных ЛЭП принимаются равными  $2 \cdot Z_1$ , т.е.  $Z_0 = 2 \cdot Z_1$ . Для двух параллельных одноцепных ЛЭП  $Z_0 = 2,5 \cdot Z_1$ , а для двухцепной ЛЭП на одной опоре  $Z_0 = (3-4) \cdot Z_1$ .

Расчетными видами КЗ для определения ПВН являются трехфазное и однофазное КЗ на землю. Трехфазное КЗ без соединения с землей является редким исключением [5].

При трехфазном КЗ на землю в наихудших условиях находится первый полюс выключателя, так как он отключает ток трехфазного КЗ. После погасания дуги в первом полюсе выключателя трехфазное КЗ на землю переходит в двухфазное КЗ на землю, отключаемое вторым полюсом. Третий полюс отключает ток однофазного КЗ.

Трехфазному КЗ на землю соответствует комплексная схема замещения представленная на рисунке 2.2. Входное сопротивление схемы, при  $Z_1 = Z_2$ , равно:

$$z_{\text{эк}}^{(1,1,1)} = \frac{3 \cdot z_1 \cdot z_0}{z_1 + 2 \cdot z_0}. \quad (2.12)$$

Переходное восстанавливающееся напряжение на первом полюсе выключателя при трехфазном КЗ на землю определяется по выражению:

$$u_{\text{в}}(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot L_{\text{эк}}^{(1,1,1)} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{z_{\text{эк}}^{(1,1,1)}}{n \cdot L_{\text{эк}}^{(1,1,1)}} t} \right), \quad (2.13)$$

где  $I$  - действующее значение тока трехфазного КЗ;

$L_{\text{эк}}^{(1,1,1)}$  - эквивалентная индуктивность схемы;

$L_1$  - индуктивность прямой последовательности;

$n$  - количество линий, не считая поврежденной;

$$L_{\text{эк}}^{(1,1,1)} = \frac{3 \cdot L_1 \cdot L_0}{L_1 + 2 \cdot L_0}, \quad L_1 = \frac{x_{*M1} \cdot x_{\bar{6}}}{\omega}, \quad (2.14)$$

где  $x_{*M1}$  - сопротивление прямой последовательности местной электростанции;

$x_{\bar{6}}$  - базисное сопротивление;

$L_0 = x_{*M0} \cdot x_{\bar{6}} / \omega$  - индуктивность нулевой последовательности местной электростанции;

$x_{*M0}$  - сопротивление нулевой последовательности местной электростанции

Скорость восстановления напряжения на полюсе выключателя без учета емкости схемы определяется по выражению:

$$V = \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot \frac{z_{\text{эк}}^{(1,1,1)}}{n} \cdot 10^{-6}. \quad (2.15)$$

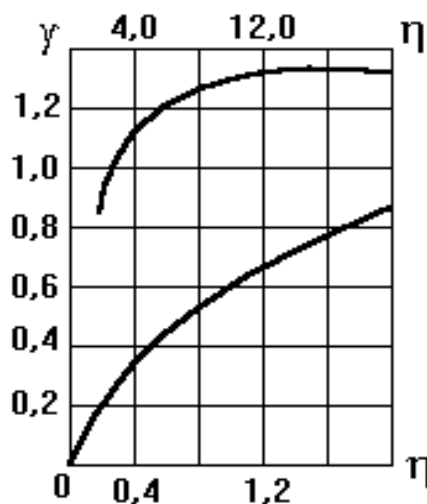


Рисунок 2.3 – Диаграмма для определения множителя  $\gamma$

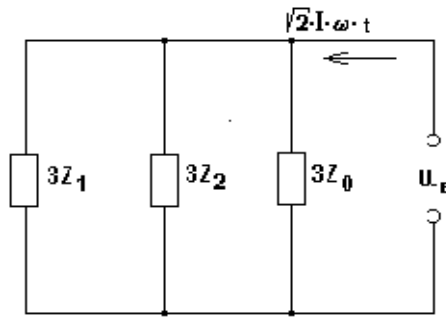


Рисунок 2.2 – Комплексная схема замещения

При учете емкости схемы скорость восстановления напряжения на полюсе выключателя определяется по выражению:

$$V = \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot \frac{z_{кр}}{n} \cdot \gamma, \quad (2.16)$$

где  $z_{кр} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{L_{эк}^{(1,1,1)}}{C_{эк}^{(1,1,1)}}}$  - входное сопротивление схемы при учете емкости;

$$C_{эк}^{(1,1,1)} = \frac{2 \cdot C_1 + C_0}{3} \quad \text{- эквивалентная емкость схемы;}$$

$C_1 = 159 \cdot I \cdot U^{0,48} \cdot 10^{-6}$  - емкость проводников и элементов оборудования схемы;

$I$  - действующее значение тока трехфазного КЗ;

$U$  - линейное напряжение сети;

$C_0 = C_1/1,2$  - эквивалентная емкость нулевой последовательности схемы;

$\gamma$  - дополнительный множитель, определяемый по кривой,  $\gamma = f(\eta)$ , представленной на рисунке 2.3;

$$\eta = \frac{z_{эк}^{(1,1,1)}}{z_{кр}}.$$

При однофазном КЗ на землю комплексная схема замещения, в которой сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей включены последовательно и обтекаются током  $I_1 = I_2 = I_0 = I/3$ ,

представлена на рисунке 2.4.

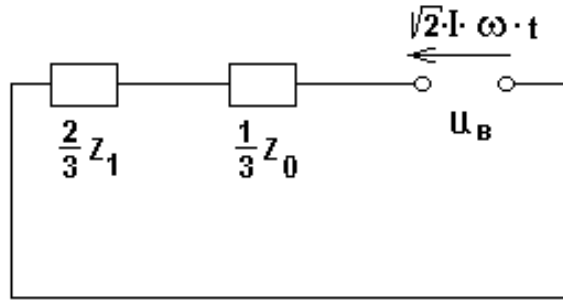


Рисунок 2.4 – Комплексная схема замещения при однофазном КЗ на землю

Входное сопротивление схемы относительно контактов выключателя определяется по выражению:

$$z_{\text{эк}}^{(1)} = \frac{2 \cdot z_1 + z_0}{3}. \quad (2.17)$$

ПВН на полюсе выключателя при однофазном КЗ на землю определяется по выражению:

$$u_{\text{в}}(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot L_{\text{эк}}^{(1)} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{z_{\text{эк}}^{(1)} t}{n \cdot L_{\text{эк}}^{(1)}}} \right), \quad (2.18)$$

где  $L_{\text{эк}}^{(1)} = \frac{2 \cdot L_1 + L_0}{3}$  - эквивалентная индуктивность схемы при однофазном КЗ на землю.

Скорость ПВН на полюсе выключателя без учета емкости схемы при однофазном КЗ на землю определяется по выражению (2.15), в котором  $z_{\text{эк}}^{(1,1,1)}$  необходимо заменить на  $z_{\text{эк}}^{(1)}$ .

При учете емкости схемы скорость ПВН на полюсе выключателя определяется по выражению (2.16), в которое необходимо подставить

$$z_{\text{кр}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{L_{\text{эк}}^{(1)}}{C_{\text{эк}}^{(1)}}}, \quad (2.19)$$

где  $C_{\text{эк}}^{(1)} = \frac{3 \cdot C_1 \cdot C_0}{C_1 + 2 \cdot C_0}$  - эквивалентная емкость схемы при однофазном КЗ на землю.

При трехфазном КЗ без замыкания на землю входное сопротивление схемы принимается равным  $z_{\text{эк}}^{(3)} = 1,5 \cdot Z_1$ .

ПВН на полюсе выключателя определяется по выражению (2.13), где вместо  $L_{\text{эк}}^{(1,1,1)}$  и  $z_{\text{эк}}^{(1,1,1)}$  необходимо подставить  $L_1$  и  $Z_1$ .

Скорость ПВН на полюсе выключателя без учета емкости схемы определяется по выражению (2.15), где вместо  $z_{\text{эк}}^{(1,1,1)}$  необходимо подставить  $Z_1$ , а при учете емкости схемы по выражению (2.16), где

$$z_{\text{кп}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}.$$

Приведенные выражения позволяют исследовать лишь первую стадию переходного процесса восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя, за которой следует вторая стадия [5]. Вторая стадия переходного процесса является следствием волновых процессов в длинных линиях. Напряжение  $u_{\text{с}}(t)$  второй стадии переходного процесса рассматривается как волна, распространяющаяся от выключателя по линиям со скоростью света. Достигнув концов линии, волны отражаются с коэффициентом  $k_{\text{ом}}$ , равным единице при входном сопротивлении схемы  $Z_{\text{с}}$ , равном бесконечности (короткая линия разомкнута) или с коэффициентом  $k_{\text{ом}}$ , равным “минус” единице при входном сопротивлении схемы  $Z_{\text{с}}$  равным нулю.

Отраженные волны  $k_{\text{ом}} \cdot u_{\text{с}}(t)$  возвращаются к станции. Первую отраженную волну следует ожидать по короткой линии спустя время

$$2 \cdot t = \frac{2 \cdot l}{c}, \quad (2.20)$$

где  $t$  - время пробега волны на длине  $l$ , мкс;

$l$  - длина линии, км;

$c$  - скорость распространения света, км/с.

Отраженная волна, достигнув сборных шин, набегаёт на входное сопротивление  $Z_{\text{с}}$ , которое состоит из результирующего волнового сопротивления длинных линий  $z_{\text{эк}}^{(1)}/(n-1)$  и индуктивности станции  $L_{\text{эк}}^{(1)}$ , включенных параллельно. Данная волна частично отражается, частично

проникает в сопротивление  $Z_{\epsilon}$  и изменяет ПВН на полюсе выключателя.

Отраженная волна, проникшая в сопротивление  $Z_{\epsilon}$ , равна по величине

$$k_n \cdot k_{om} \cdot u_{\epsilon}(t), \quad (2.21)$$

где  $k_n = \frac{2 \cdot z_{\epsilon}^{(1)} / (n-1)}{z_{\epsilon}^{(1)} / (n-1) + z_{\epsilon}^{(1)}} = \frac{2 \cdot z_B}{z_B + z_{\epsilon}^{(1)}} = \frac{2}{n}$  - коэффициент проникновения

отраженной волны;

$n$  - количество линий, не считая поврежденной.

Наибольшее изменение ПВН создается первой отраженной волной, которая накладывается на кривую ПВН первой стадии переходного процесса.

На рисунке 2.5 показан примерный вид кривых ПВН первой стадии переходного процесса при различных видах КЗ, а на рисунке 2.6 показан вид расчетной кривой ПВН с учетом второй стадии переходного процесса.

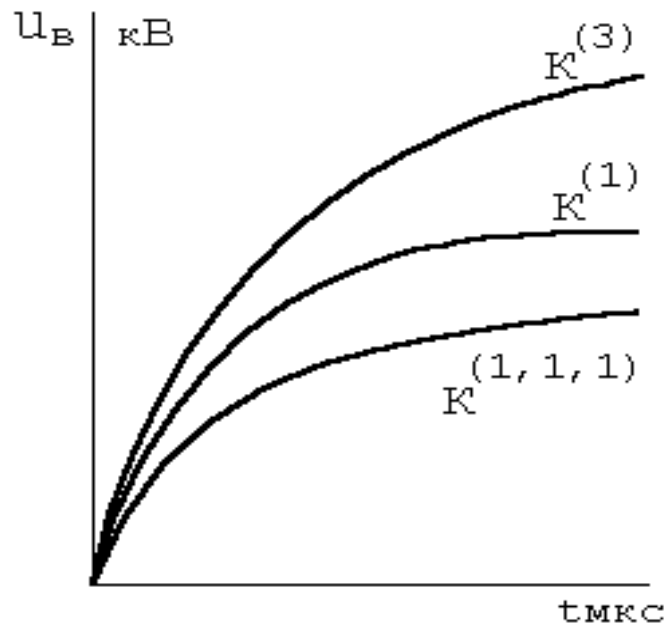


Рисунок 2.5-Кривые ПВН первой стадии переходного процесса при различных видах КЗ

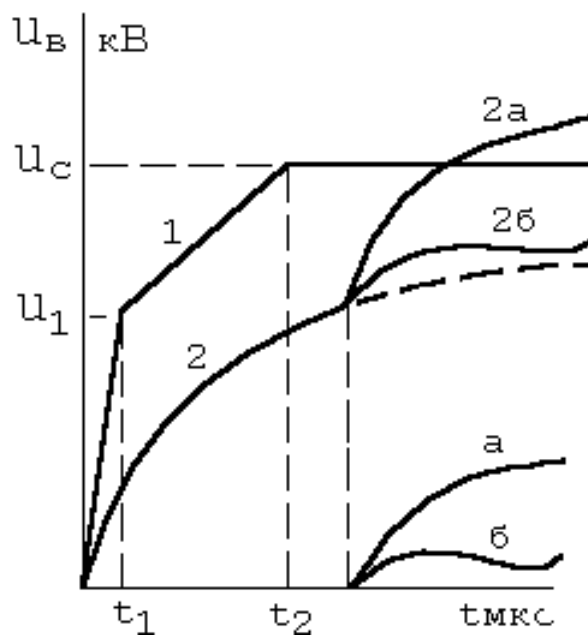


Рисунок 2.6-Расчетная кривая ПВН с учетом второй стадии переходного процесса

Кривую 2а (рисунок 2.6) рассчитанную по выражению (2.21) необходимо сопоставить с нормированной характеристикой ПВН выключателя 1, намеченного к установке.

Если расчетная кривая ПВН 2а выходит за пределы нормированной характеристики необходимо произвести уточненный расчет второй стадии переходного процесса.

При уточненном расчете считают, что входное сопротивление станции состоит из активного сопротивления  $z_{\text{эк}}^{(1)} / (n - 1)$  и индуктивности  $L_{\text{эк}}^{(1)}$ , которые включены параллельно.

Волна, увеличивающая ПВН на полюсе выключателя, при уточненном расчете определяется с помощью кривой приведенной на рисунке 2.7. По оси абсцисс отложено отношение  $Z_{\text{эк}}^{(1)} \cdot t / (n \cdot L_{\text{эк}}^{(1)})$ , а по оси ординат отношение

$$\frac{k_n \cdot k_{\text{от}} \cdot u_B(t)}{2 \cdot U_m / n}. \quad (2.22)$$

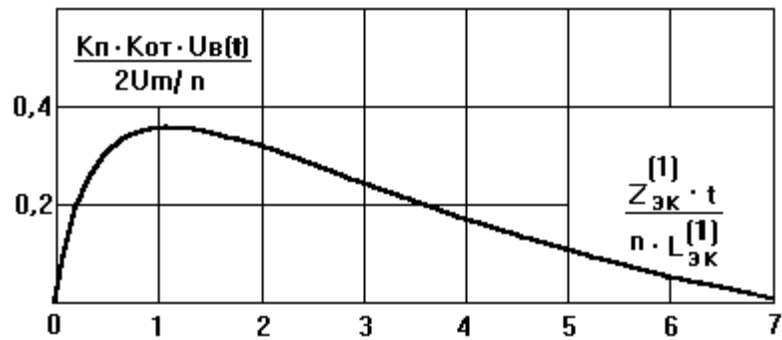


Рисунок 2.7-Кривая для определения накладывающегося напряжения

Для определения кривой накладывающегося напряжения необходимо умножить ординаты вспомогательной кривой на  $2 \cdot U_m / n$ ,

где  $U_m = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$  - амплитуда среднего эксплуатационного фазного напряжения;

$n$  - число линий, не считая поврежденной.

Примерный вид уточненной кривой второй стадии переходного процесса приведен на рисунке 2.6, кривая 2б.

Выбор выключателей рекомендуется производить в виде таблицы 2.4.

## 2.2 Выбор разъединителей, отделителей и короткозамыкателей

Разъединитель, как коммутационный аппарат, предназначен для отключения и включения электрической цепи без тока и для создания видимого разрыва цепи между частями, оставшимися под напряжением, и аппаратами, выведенными в ремонт.

Таблица 2.4 - Расчетные и каталожные данные выключателя

Расчетные параметры цепи	Каталожные данные выключателя	Условие выбора выключателя
$U_{уст}$	$U_{ном}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{форс}$	$I_{ном}$	$I_{форс} \leq I_{ном}$
$I_{n,\tau}$	$I_{отк,ном}$	$I_{n,\tau} \leq I_{отк,ном}$
$i_{a,\tau}$	$i_{a,ном} = \sqrt{2} \cdot I_{отк,ном} \cdot \frac{\beta_{ном}}{100}$	$i_{a,\tau} \leq i_{a,ном}$
$I_{n,\tau} \cdot \frac{1 + \beta/100}{1 + \beta_{ном}/100}$	$I_{отк,ном}$	$I_{отк,ном} \geq I_{n,\tau} \cdot \frac{1 + \beta/100}{1 + \beta_{ном}/100}$
$I_{n,0}$	$I_{вкл,ном}$	$I_{n,0} \leq I_{вкл,ном}$
$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{n,0}$	$i_{вкл,ном} = 2,55 \cdot I_{отк,ном}$	$i_y \leq i_{вкл,ном}$
$I_{n,0}$	$I_{дин}$	$I_{n,0} \leq I_{дин}$
$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{n,0}$	$i_{дин} = 2,55 \cdot I_{отк,ном}$	$i_y \leq i_{дин}$
$B_k$	$B_{тер,доп}$	$B_k \leq B_{тер,доп}$
$V$	$V_{ном}$	$V \leq V_{ном}$

Специальными типами разъединителей являются отделители и короткозамыкатели, которые применяются в распределительных устройствах выполненных по упрощенным схемам, обычно на подстанциях. Короткозамыкателем создается искусственное КЗ на стороне высокого напряжения трансформатора подстанции с целью повышения чувствительности релейной защиты линии. Отделители предназначены для

автоматического отключения поврежденного участка цепи в бестоковую паузу [7].

Выбор разъединителей и отделителей производится по номинальному напряжению установки, номинальному длительному току, по конструкции и роду установки, а проверка производится в режиме КЗ на термическую и электродинамическую стойкость.

Короткозамыкатели выбираются и проверяются по тем же условиям, что и разъединители, но без проверки по току нагрузки.

Расчетные величины для выбора разъединителей, отделителей и короткозамыкателей те же, что и для выключателей.

Условия выбора разъединителей, отделителей и короткозамыкателей сводят в таблицу типа таблицы 2.5.

Таблица 2.5 - Условия выбора разъединителей

Расчетные параметры цепи	Каталожные данные разъединителя	Условие выбора
$U_{уст}$	$U_{ном}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{форс}$	$I_{ном}$	$I_{форс} \leq I_{ном}$
$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{n,0}$	$i_{дин}$	$i_y \leq i_{дин}$
$B_k$	$B_{тер,доп}$	$B_k \leq B_{тер,доп}$

## 2.3 Примеры выбора и проверки электрических аппаратов

**Пример 2.1** Выбрать выключатель и разъединитель в цепи генератора типа ТВФ-63-2ЕУЗ, работающего на шины ГРУ 10 кВ, и выключатель и разъединитель в цепи блока ТВФ-120-2УЗ (рисунок 2.8). Мощность короткого замыкания системы  $S_{кз} = 1500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ . На ТЭЦ установлены трансформаторы связи Т1, Т2 типа ТД-40000/110 и блочный трансформатор Т3 типа ТДЦ-125000/110. На шинах ГРУ установлены секционные реакторы типа РБДГ-10-4000-0,18УЗ.

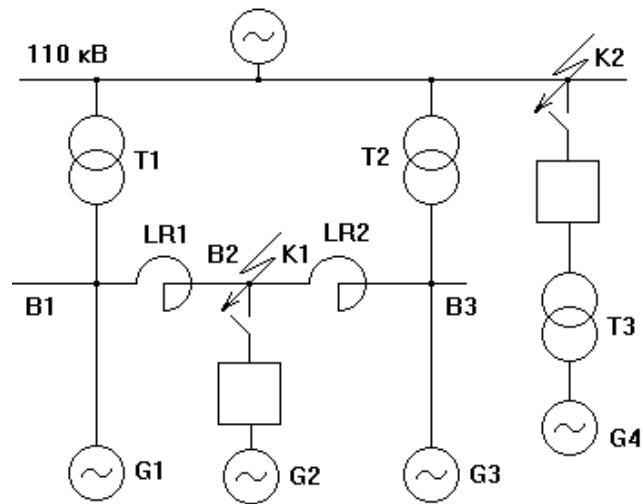


Рисунок 2.8 -.Схема ТЭЦ

Составим схему замещения и определим сопротивления всех элементов при базовой мощности  $S_6 = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ . Схема замещения ТЭЦ представлена на рисунке 2.9.

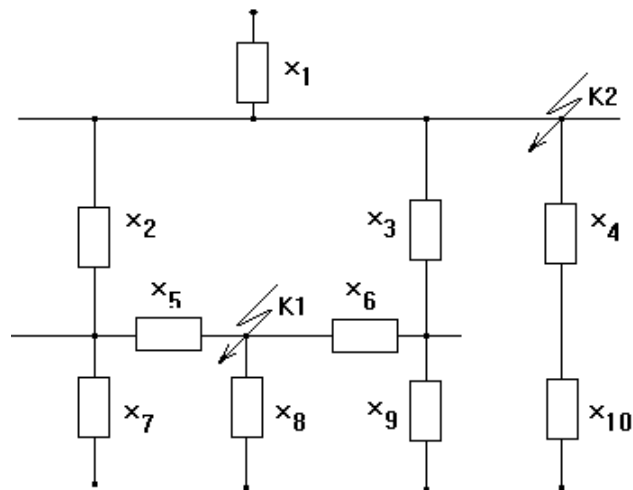


Рисунок 2.9 – Схема замещения ТЭЦ

Сопротивление энергосистемы

$$x_1 = \frac{S_6}{S_{кз}} = \frac{1000}{1500} = 0,667.$$

Сопротивление трансформаторов связи Т1 и Т2

$$x_2 = x_3 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 40} = 2,625.$$

Сопротивление блочного трансформатора ТЗ

$$x_4 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 125} = 0,84.$$

Сопротивление секционных реакторов  $LR1, LR2$ .

$$x_5 = x_6 = x_p \cdot \frac{S_{\delta}}{U^2} = 0,18 \cdot \frac{1000}{10,5^2} = 1,633.$$

Сопротивление генераторов G1, G2, G3

$$x_7 = x_8 = x_9 = x_d'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} = 0,1361 \cdot \frac{1000}{78,75} = 1,728.$$

Сопротивление генератора G4

$$x_{10} = x_d'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{\text{НОМ}}} = 0,192 \cdot \frac{1000}{125} = 1,536.$$

Произведем расчет токов КЗ в точке К1. Так как схема ТЭЦ является симметричной относительно точки КЗ К1, то ее можно представить в следующем виде, рисунок 2.10.

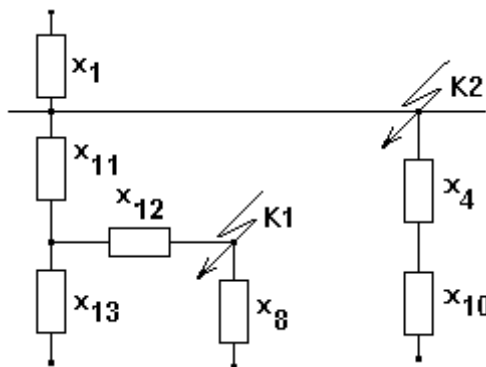


Рисунок 2.10 – Преобразованная схема замещения ТЭЦ

$$x_{11} = \frac{x_2 \cdot x_3}{x_2 + x_3} = \frac{x_2}{2} = \frac{2,625}{2} = 1,3125;$$

$$x_{12} = \frac{x_5 \cdot x_6}{x_5 + x_6} = \frac{x_5}{2} = \frac{1,633}{2} = 0,8165;$$

$$x_{13} = \frac{x_7 \cdot x_9}{x_7 + x_9} = \frac{x_7}{2} = \frac{1,728}{2} = 0,864;$$

$$x_{14} = \frac{x_1 \cdot (x_4 + x_{10})}{x_1 + x_4 + x_{10}} = \frac{0,667 \cdot (0,84 + 1,536)}{0,667 + 0,84 + 1,536} = 0,52.$$

Определим эквивалентную ЭДС  $E_{\text{э1}}$  система - генератор G4

$$E_{\text{э1}} = \frac{E_c \cdot (x_4 + x_{10}) + E_4 \cdot x_1}{x_1 + x_4 + x_{10}} = \frac{1 \cdot (0,84 + 1,536) + 1,13 \cdot 0,667}{0,667 + 0,84 + 1,536} = 1,028.$$

$$x_{15} = x_{11} + x_{14} = 1,3125 + 0,52 = 1,8325.$$

**Результирующее сопротивление ветви система, генераторы G1 , G3 и G4 равно:**

$$x_{16} = x_{12} + \frac{x_{13} \cdot x_{15}}{x_{13} + x_{15}} = 0,8165 + \frac{0,864 \cdot 1,8325}{0,864 + 1,8325} = 1,404.$$

Определим эквивалентную ЭДС  $E_{\text{э2}}$  система, генераторы G1 , G3 и G4

$$E_{\text{э2}} = \frac{E_{\text{э1}} \cdot x_{13} + E_1 \cdot x_{15}}{x_{13} + x_{15}} = \frac{1,028 \cdot 0,864 + 1,08 \cdot 1,8325}{0,864 + 1,8325} = 1,063.$$

Определим начальное значение периодической составляющей тока КЗ по ветвям:

суммарный ток эквивалентного источника

$$I_{n,0,\text{э}} = \frac{E_{\text{э2}}}{x_{16}} \cdot I_{6,1} = \frac{1,063}{1,404} \cdot 54,98 = 41,63 \text{ кА},$$

где  $I_{6,1} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6,1}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 54,98 \text{ кА},$

ток КЗ от генератора G2

$$I_{n,0,G2} = \frac{E_{G2}}{x_8} \cdot I_{6,1} = \frac{1,08}{1,728} \cdot 54,98 = 34,36 \text{ кА}.$$

Суммарный ток КЗ в точке K1

$$I_{n,0,K1} = I_{n,0,\text{э}} + I_{n,0,G2} = 41,63 + 34,46 = 75,99 \text{ кА}.$$

Произведем расчет тока КЗ в точке K2, используя схему замещения

ТЭЦ, представленную на рисунке 2.10.

$$x_{17} = \frac{x_{13} \cdot (x_{12} + x_8)}{x_{13} + x_{12} + x_8} = \frac{0,864 \cdot (0,8165 + 1,728)}{0,864 + 0,8165 + 1,728} = 0,645.$$

Результирующее сопротивление ветви генератора G1 , G2 , G3 равно

$$x_{18} = x_{11} + x_{17} = 1,3125 + 0,645 = 1,9575.$$

Определим начальное значение периодической составляющей тока КЗ по ветвям:

генераторы G1 , G2 , G3

$$I_{n,0,G} = \frac{E_1}{x_{18}} \cdot I_{6,2} = \frac{1,08}{1,9575} \cdot 5,02 = 2,77 \text{ кА},$$

где  $I_{6,2} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{6,2}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02 \text{ кА},$

энергосистема

$$I_{n,0,c} = \frac{E_c}{x_1} \cdot I_{6,2} = \frac{1}{0,667} \cdot 5,02 = 7,53 \text{ кА},$$

генератор G4

$$I_{n,0,G4} = \frac{E_4}{x_4 + x_{10}} \cdot I_{6,2} = \frac{1,13 \cdot 5,02}{0,84 + 1,536} = 2,29 \text{ кА}.$$

Суммарный ток КЗ в точке К2

$$I_{n,0,K2} = I_{n,0,c} + I_{n,0,G4} + I_{n,0,G} = 2,77 + 7,53 + 2,39 = 12,69 \text{ кА}.$$

Определим ударные токи трехфазного КЗ для точек К1 и К2.

Для точки К1 ударные токи равны:

эквивалентного источника

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{n,0,3} = \sqrt{2} \cdot 1,9 \cdot 41,63 = 111,86 \text{ кА},$$

где  $k_y = 1,9$  согласно таблицы 3.8 [1],

генератора G2

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{n,0,G2} = \sqrt{2} \cdot 1,95 \cdot 34,36 = 94,76 \text{ кА}.$$

Суммарный ударный ток в точке К1

$$i_y = 111,86 + 94,76 = 206,62 \text{ кА} .$$

Для точки К2 ударные токи равны:

генераторов G1 , G2 , G3

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{n,0} = \sqrt{2} \cdot 1,935 \cdot 2,77 = 7,58 \text{ кА} ;$$

системы

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{n,0,c} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 7,53 = 18,1 \text{ кА} ;$$

генератора G4

$$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{n,0,G4} = \sqrt{2} \cdot 1,965 \cdot 2,39 = 6,64 \text{ кА} .$$

Суммарный ударный ток в точке К2

$$i_y = 7,58 + 18,6 + 6,64 = 32,82 \text{ кА} .$$

Для выбора выключателя и разъединителя в цепи генератора G2 определим расчетные токи рабочего режима.

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{78,75}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4330 \text{ кА} ;$$

$$I_{форс} = I_{макс} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot 0,95} = \frac{78,75}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,95} = 4558 \text{ кА} .$$

Принимаем к установке выключатель типа МГГ-10-5000-63У3 и разъединитель типа РВР-20/6300У3.

Расчетным током КЗ для проверки выключателя при напряжении ниже 35 кВ является наибольший ток, протекающий через выключатель [1]. В данном случае наибольшим током КЗ является ток от эквивалентного источника  $I_{n,0} = I_{n,0,э} = 41,63 \text{ кА}$ .

Периодическая составляющая тока КЗ от энергосистемы и присоединенных к ней генераторов G1, G3, G4 считается неизменной во времени и равна  $I_{n,\tau} = I_{n,0,\varepsilon} = 41,63 \text{ кА}$ .

Апериодическая составляющая тока КЗ от эквивалентного источника равна

$$i_{a,\tau} = \sqrt{2} \cdot I_{n,0,\varepsilon} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a}} = \sqrt{2} \cdot 41,63 \cdot e^{-\frac{0,12}{0,1}} = 17,73 \text{ кА},$$

где  $T_a = 0,05 - 0,1 \text{ с}$  - согласно таблицы 1.1;

$$\tau = t_{\text{отк,выкл}} - t_0 + 0,01 = 0,01 = 0,15 - 0,04 + 0,01 = 0,12 \text{ с};$$

$t_{\text{отк,выкл}}$  – полное время отключения выключателя;

$t_0 = 0,04 \text{ с}$  – время горения дуги.

Проверим выключатель на отключение симметричного тока по условию (2.3)

$$I_{n,\tau} = 41,63 \text{ кА} < I_{\text{отк,ном}} = 63 \text{ кА}.$$

Проверим выключатель на возможность отключения апериодической составляющей тока КЗ  $i_{a,\tau}$  по условию (2.4).

$$i_{a,\tau} = 17,73 \text{ кА} > i_{a,\text{ном}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \beta_{\text{ном}} \cdot I_{\text{отк,ном}}}{100} = \sqrt{2} \cdot e^{-22,5\tau} \cdot I_{\text{отк,ном}} = \sqrt{2} \cdot e^{-22,5 \cdot 0,12} \cdot 63 = 6 \text{ кА}.$$

Так как выключатель по условию отключения апериодической составляющей тока КЗ не проходит, проверим его по полному току КЗ, согласно выражению (2.7)

$$\sqrt{2} \cdot I_{n,\tau} + i_{a,\tau} \leq \sqrt{2} \cdot I_{\text{отк,ном}} \cdot \left(1 + \frac{\beta_{\text{ном}}}{100}\right).$$

$$\sqrt{2} \cdot 41,63 + 23,71 = 82,58 \text{ кА} < \sqrt{2} \cdot 63 \cdot \left(1 + e^{-22,5 \cdot 0,12}\right) = 95,06 \text{ кА}.$$

Таким образом, принятый выключатель проходит по полному току КЗ.

Проверим выключатель по включающей способности по условию (2.9)

$$I_{n,0,э} = 41,63 \text{ кА} < I_{вкл,ном} = 63 \text{ кА};$$

$$i_y = 111,86 \text{ кА} < i_{вкл,ном} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{вкл,ном} = 1,9 \cdot \sqrt{2} \cdot 63 = 169,28 \text{ кА}.$$

Условие (2.9) выполняется.

Проверим выключатель по условию (2.10) на электродинамическую стойкость

$$I_{дин} = 64 \text{ кА} > I_{n,0,э} = 41,63 \text{ кА};$$

$$i_{дин} = 170 \text{ кА} > i_y = 111,86 \text{ кА},$$

так как условие выполняется, то выключатель электродинамически стойкий.

Проверим выключатель на термическую стойкость по условию (1.12). Так как  $t_{отк} = 4 \text{ с} > 3 \cdot T_a = 3 \cdot 0,1 = 0,3 \text{ с}$ , то тепловой импульс  $B_k$ , в месте установки выключателя, определяется по формуле (1.15), а допустимое значение

теплого импульса  $B_{тер,доп}$  по формуле (1.21), так как  $t_{отк} = 4 \text{ с} \geq t_T = 4 \text{ с}$ .

$$B_k = I_{n,0,э}^2 \cdot (t_{отк} + T_a) = 41,63^2 \cdot (4 + 0,1) = 7105,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$B_{тер,доп} = I_T^2 \cdot t_T = 64^2 \cdot 4 = 16384 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$B_k = 7105,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} < B_{тер,доп} = 16384 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Таким образом, выбранный выключатель МГГ-10-5000-63УЗ проходит по всем параметрам.

Расчетные и каталожные данные выключателя и разъединителя в цепи генератора G2 приведены в таблице 2.6.

Расчетные токи в цепи блока генератор - трансформатор определяются по наибольшей электрической мощности генератора в соответствии с формулами (1.1), (1.2)

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{125}{\sqrt{3} \cdot 115} = 627,6 \text{ А};$$

Таблица 2.6 - Расчетные и каталожные данные

Расчетные данные	Каталожные данные		Условия выбора и проверки
	Выключатель МГГ-10-5000- 63УЗ	Разъединитель РВР-20/6300УЗ	
$U_{уст} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 10 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 20 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{макс} = 4558 \text{ А}$	$I_{ном} = 5000 \text{ А}$	$I_{ном} = 6300 \text{ А}$	$I_{макс} \leq I_{ном}$
$I_{П,\tau} = 41,63 \text{ кА}$	$I_{отк,ном} = 63 \text{ кА}$	-	$I_{П,\tau} \leq I_{отк,ном}$
$i_{a,\tau} = 17,73 \text{ кА}$	$i_{a,ном} = 6 \text{ кА}$	-	$i_{a,\tau} \leq i_{a,ном}$
$\sqrt{2} \cdot I_{П,\tau} + i_{a,\tau} =$ $= 82,58 \text{ кА}$	$\sqrt{2} I_{отк,ном} \left( 1 + \frac{\beta_{ном}}{100} \right) =$ $= 95,06 \text{ кА}$	-	$\sqrt{2} I_{П,\tau} + i_{a,\tau} \leq$ $\leq \sqrt{2} I_{отк,ном} \left( 1 + \frac{\beta_{ном}}{100} \right)$
$I_{П,0} = 41,63 \text{ кА}$	$I_{вкл,ном} = 63 \text{ кА}$	-	$I_{П,0} \leq I_{вкл,ном}$
$i_y = 111,86 \text{ кА}$	$i_{вкл,ном} = 170 \text{ кА}$	-	$i_y \leq i_{вкл,ном}$
$I_{П,0} = 41,63 \text{ кА}$	$I_{дин} = 63 \text{ кА}$	-	$I_{П,0} \leq I_{дин}$
$i_y = 111,86 \text{ кА}$	$i_{дин} = 170 \text{ кА}$	$i_{дин} = 260 \text{ кА}$	$i_y \leq i_{дин}$
$B_k = 7105,5 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{тер,доп} = 16384 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{тер,доп} =$ $= 40000 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_k \leq B_{тер,доп}$

$$I_{форс} = I_{макс} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot 0,95} = \frac{125}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 0,95} = 660,6 \text{ А}.$$

Принимаем к установке выключатель типа У-110А-2000-40У1 и разъединитель типа РНДЗ.1-110/1000ХЛ1.

Выключатели распределительных устройств напряжением 35 кВ и выше выбираются обычно однотипными для всех цепей данного РУ и проверяются по суммарному току КЗ [1].

Определим периодическую составляющую тока КЗ в точке К2 для момента времени:

$$\tau = t_{c.бвкл} + 0,01 = 0,06 + 0,01 = 0,07 \text{ с}.$$

Периодическая составляющая тока КЗ определяется суммированием периодических составляющих токов по ветвям энергосистемы, генераторов G1, G2, G3 и генератора G4.

Периодическая составляющая тока КЗ энергосистемы принимается неизменной во времени и равной:

$$I_{n,\tau,c} = I_{n,0,c} = 7,53 \text{ кА}.$$

Периодическая составляющая тока КЗ от генераторов G1, G2 и G3 определяется по типовым кривым, приведенным в [2] или в приложении А. Для этого предварительно определим номинальный ток генераторов G1, G2 и G3.

$$I'_{ном} = \frac{3 \cdot 78,75}{\sqrt{3} \cdot 115} = 1,186 \text{ кА}.$$

Определим отношение начального значения периодической составляющей тока КЗ от генераторов G1, G2 и G3 в точке К2,  $I_{n,0,G} = 2,77$  кА, к номинальному току  $I'_{ном} = 1,186$  кА

$$\frac{I_{n,0,G}}{I'_{ном}} = \frac{2,77}{1,186} = 2,34.$$

По данному отношению и времени  $\tau = 0,07 \text{ с}$  по кривым, рисунок А.1,в, имеем

$$\gamma = \frac{I_{n,\tau,G}}{I_{n,0,G}} = 0,94.$$

Таким образом, периодическая составляющая тока КЗ от генераторов G1, G2 и G3 к моменту времени  $\tau = 0,07 \text{ с}$  будет:

$$I_{n,\tau,G} = \gamma \cdot I_{n,0,G} = 0,94 \cdot 2,77 = 2,604 \text{ кА}.$$

Аналогичным образом по кривым рисунка А.1,б определим

периодическую составляющую тока КЗ в точке К2 от генератора G4:

$$I_{n,0,G4} = 2,39 \text{ кА}; \quad I'_{ном} = \frac{76,75}{\sqrt{3} \cdot 115} = 0,395 \text{ кА};$$

$$\frac{I_{n,0,G4}}{I'_{ном}} = \frac{2,39}{0,395} = 6,05; \quad \gamma = \frac{I_{n,\tau,G4}}{I_{n,0,G4}} = 0,8;$$

$$I_{n,\tau,G4} = 0,8 \cdot 2,39 = 1,912 \text{ кА}.$$

Суммарное значение периодической составляющей тока КЗ в точке К2 для момента времени  $\tau = 0,07 \text{ с}$ :

$$I_{n,\tau} = I_{n,\tau,c} + I_{n,\tau,G} + I_{n,\tau,G4} = 7,53 + 2,604 + 1,912 = 12,046 \text{ кА}.$$

Апериодическая составляющая тока КЗ по ветвям:

энергосистемы

$$i_{a,\tau,c} = \sqrt{2} \cdot I_{n,0,c} \cdot e^{-\tau/T_a} = \sqrt{2} \cdot 7,53 \cdot e^{-0,07/0,025} = 0,648 \text{ кА};$$

генераторов G1, G2 и G3

$$i_{a,\tau,G} = \sqrt{2} \cdot 2,77 \cdot e^{-0,07/0,15} = 2,46 \text{ кА};$$

генератора G4

$$i_{a,\tau,G4} = \sqrt{2} \cdot 2,39 \cdot e^{-0,07/0,26} = 2,58 \text{ кА}.$$

Постоянная времени  $T_a$  взята из таблицы 1.1.

Суммарное значение апериодической составляющей тока КЗ в точке

К2 для момента времени  $\tau = 0,07 \text{ с}$  равно:

$$i_{a, \tau} = i_{a, \tau, c} + i_{a, \tau, G} + i_{a, \tau, G4} = 0,648 + 2,46 + 2,58 = 5,688 \text{ кА}.$$

Все расчетные и каталожные данные выключателя и разъединителя для РУ 110 кВ приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - Расчетные и каталожные данные

Расчетные данные	Каталожные данные		Условия выбора и проверки
	Выключатель У-110А-2000-40У1	Разъединитель РНДЗ.1-110/1000	
$U_{уст} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 110 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{макс} = 660,6 \text{ А}$	$I_{ном} = 2000 \text{ А}$	$I_{ном} = 1000 \text{ А}$	$I_{макс} \leq I_{ном}$
$I_{n, \tau} = 12,046 \text{ кА}$	$I_{отк, ном} = 40 \text{ кА}$	-	$I_{n, \tau} \leq I_{отк, ном}$
$i_{a, \tau} = 5,688 \text{ кА}$	$i_{a, ном} = \sqrt{2} \cdot \frac{\beta_{ном}}{100} \times$ $\times I_{ном} = \sqrt{2} \cdot \frac{20 \cdot 40}{100} =$ $= 11,31 \text{ кА}$	-	$i_{a, \tau} \leq i_{a, ном}$
$I_{n, 0} = 12,69 \text{ кА}$	$I_{вкл, ном} = 40 \text{ кА}$	-	$I_{n, 0} \leq I_{вкл, ном}$
$i_y = 32,32 \text{ кА}$	$i_{вкл, ном} = 102 \text{ кА}$	-	$i_y \leq i_{вкл, ном}$
$I_{n, 0} = 12,69 \text{ кА}$	$I_{дин} = 40 \text{ кА}$	-	$I_{n, 0} \leq I_{дин}$
$i_y = 32,32 \text{ кА}$	$i_{дин} = 102 \text{ кА}$	$i_{дин} = 80 \text{ кА}$	$i_y \leq i_{дин}$
$B_{\kappa} = 12,69^2 \times$ $\times (0,18 + 0,08) =$ $= 41,9 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{тер, доп} = 40^2 \cdot 0,18 =$ $= 288 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{тер, доп} = 31,5^2 \times$ $\times 0,18 = 178,6 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{\kappa} \leq B_{тер, доп}$

**Пример 2.2** Выбрать выключатели для РУ 220 кВ ГРЭС мощностью 2400 МВт при следующих параметрах элементов:

генераторы:  $8 \times 300$  МВт;  $S_{с,ном} = 353 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $x_d'' = 0,195$ ;

трансформаторы:  $5 \times \text{ТДЦ-400000/220}$  с  $u_k = 11\%$  и  $3 \times \text{ТДЦ-400000/110}$  с  $u_k = 10,5\%$ ;

автотрансформаторы:  $2 \times \text{АТДЦТН-200000/220/110}$  с  $u_{кВ-С} = 11\%$ ,  $u_{кВ-Н} = 32\%$  и  $u_{кС-Н} = 20\%$ ;

линии ОРУ 220 кВ: 4 линии длиной 120 км связаны с системой и 2 линии длиной по 50 км идут к потребителям. Индуктивное сопротивление прямой последовательности  $x_{y0,1} = 0,435 \text{ Ом/км}$ , сопротивление нулевой последовательности  $x_{y0,0} = 3 \cdot x_{y0,1} = 1,305 \text{ Ом/км}$ .

Мощность системы  $S_{с,ном} = 3500 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ , относительное сопротивление системы прямой последовательности  $x_{c1} = 0,09$ ; нулевой -  $x_{c0} = 0,02$ .

Схема ГРЭС представлена на рисунке 2.11.

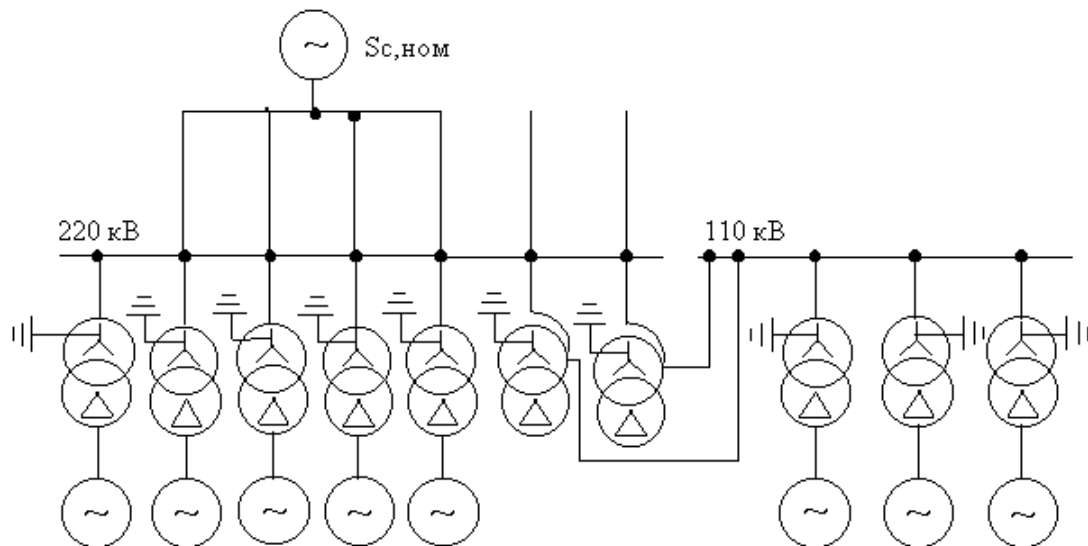


Рисунок 2.11 - Принципиальная схема ГРЭС

Схема замещения прямой последовательности ГРЭС приведена на рисунке 2.12.

Для расчета токов КЗ определим относительные сопротивления всех элементов схемы при  $S_6 = 1000 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_6 = 230 \text{ кВ}$ ,

$$I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 230} = 2,51 \text{ кА}, \quad x_6 = \frac{U_6}{\sqrt{3} \cdot I_6} = \frac{230}{\sqrt{3} \cdot 2,51} = 50,6 \text{ Ом}.$$

$$x_{c1} = x_{c1} \cdot \frac{S_6}{S_{c,ном}} = 0,09 \cdot \frac{1000}{3500} = 0,0257;$$

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_{y0,1} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = x_{y0,1} \cdot \frac{l}{x_6} = 0,435 \cdot \frac{120}{50,6} = 1,032;$$

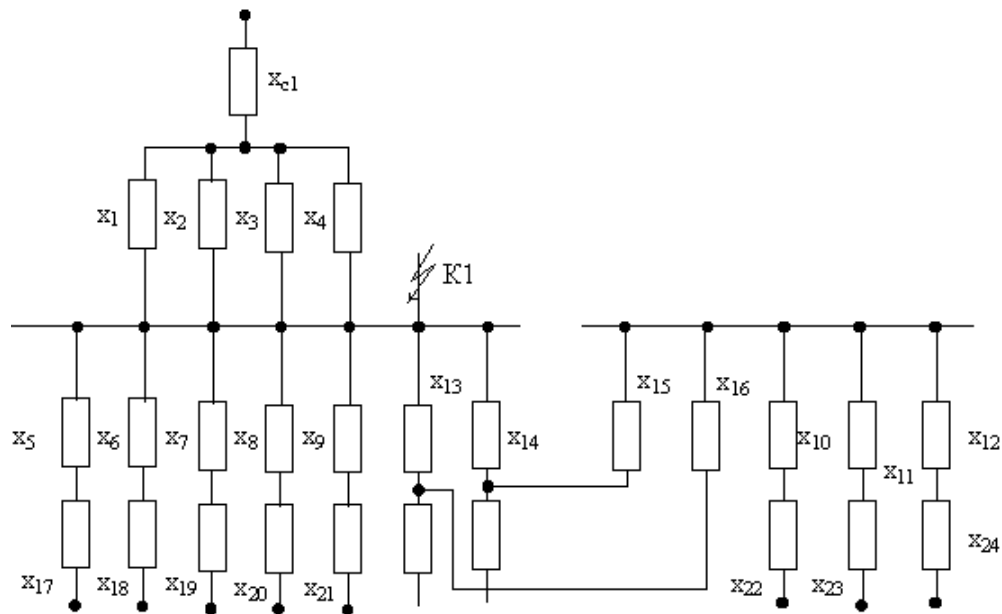


Рисунок 2.12 - Схема замещения прямой последовательности ГРЭС

$$x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = x_9 = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{ном,м}} = \frac{11 \cdot 1000}{100 \cdot 400} = 0,275;$$

$$x_{10} = x_{11} = x_{12} = \frac{u_k \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{ном,м}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 400} = 0,2625;$$

$$x_{17} = x_{18} = x_{19} = x_{20} = x_{21} = x_{22} = x_{23} = x_{24} = x_d'' \cdot \frac{S_6}{S_{ном,з}} = 0,195 \cdot \frac{1000}{353} = 0,552;$$

$$u_{kB} = 0,5 \cdot (u_{kB-C} + u_{kB-H} - u_{kC-H}) = 0,5 \cdot (11 + 32 - 20) = 11,5\%;$$

$$u_{kC} = 0,5 \cdot (u_{kB-C} + u_{kC-H} - u_{kB-H}) = 0,5 \cdot (11 + 20 - 32) = -0,5\%;$$

$$u_{kH} = 0,5 \cdot (u_{kB-H} + u_{kC-H} - u_{kB-C}) = 0,5 \cdot (32 + 20 - 11) = 20,5\%;$$

$$x_{15} = x_{16} = 0 ;$$

$$x_{13} = x_{14} = \frac{u_{кВ}}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{ном,м}} = \frac{11,5 \cdot 1000}{100 \cdot 400} = 0,575 .$$

Определим ток трехфазного КЗ на шинах ОРУ 220 кВ, для этого преобразуем схему замещения.

$$x_{25} = \frac{x_{10} + x_{22}}{3} = \frac{0,2625 + 0,552}{3} = 0,2715 ;$$

$$x_{26} = x_{25} + \frac{x_{14}}{2} = 0,2715 + \frac{0,575}{2} = 0,559 ;$$

$$x_{27} = \frac{x_5 + x_{17}}{5} = \frac{0,275 + 0,552}{5} = 0,1654 ;$$

$$x_{28} = x_{c1} + \frac{x_1}{4} = 0,0257 + \frac{1,032}{4} = 0,2837 ;$$

$$x_{29} = \frac{x_{26} \cdot x_{27}}{x_{26} + x_{27}} = \frac{0,559 \cdot 0,1654}{0,559 + 0,1654} = 0,1276 .$$

Результирующее сопротивление до точки КЗ равно:

$$x_{рез} = \frac{x_{28} \cdot x_{29}}{x_{28} + x_{29}} = \frac{0,2837 \cdot 0,1276}{0,2837 + 0,1276} = 0,088 .$$

Эквивалентная ЭДС равна:

$$E_э = \frac{E_c \cdot x_{29} + E_G \cdot x_{28}}{x_{29} + x_{28}} = \frac{1 \cdot 0,1276 + 1,13 \cdot 0,2837}{0,1276 + 0,2837} = 1,09 .$$

Ток трехфазного КЗ равен:

$$I_{н,0}^{(3)} = \frac{E_э \cdot I_6}{x_{рез}} = \frac{1,09}{0,088} \cdot 2,51 = 31,09 \text{ кА} .$$

Намечаем к установке выключатель типа ВНВ-220. Произведем приближенную проверку выключателя по скорости восстановления напряжения по выражению (2.11):

$$V = 0,2 \cdot \frac{I_{н,0}^{(3)}}{n} = 0,2 \cdot \frac{31,09}{5} = 1,24 \text{ кВ} / \text{мкс} \succ 0,4 \text{ кВ} / \text{мкс} .$$

Так как условие (2.11) не выполняется необходимо произвести уточненный расчет скорости восстановления напряжения на полюсах выключателя.

Произведем дополнительно расчет тока однофазного КЗ, для определения расчетного вида КЗ. Схема замещения нулевой последовательности приведена на рисунке 2.13.

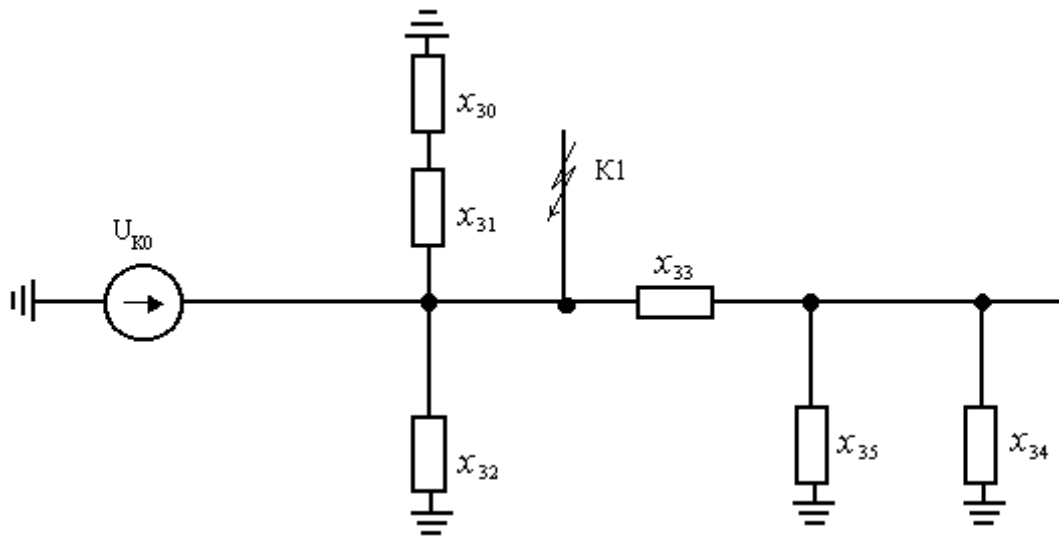


Рисунок 2.13 - Схема замещения нулевой последовательности ГРЭС

$$x_{30} = x_{c0} \cdot \frac{S_6}{S_{c,ном}} = 0,02 \cdot \frac{1000}{3500} = 0,0057;$$

$$x_{31} = x_{y0,0} \cdot \frac{1}{x_6 \cdot n} = 1,305 \cdot \frac{120}{50,6 \cdot 4} = 0,774;$$

$$x_{32} = \frac{x_5}{5} = \frac{0,275}{5} = 0,055; \quad x_{33} = \frac{x_{13}}{2} = \frac{0,575}{2} = 0,2875;$$

$$x_{34} = \frac{x_{10}}{3} = \frac{0,2625}{3} = 0,0875; \quad x_{35} = \frac{u_{кН} \% \cdot S_6}{2 \cdot 100 \cdot S_{ном,т}} = \frac{20,5 \cdot 1000}{100 \cdot 200 \cdot 2} = 0,5125.$$

Преобразуем схему замещения нулевой последовательности:

$$x_{36} = x_{33} + \frac{x_{34} \cdot x_{35}}{x_{34} + x_{35}} = 0,2875 + \frac{0,0875 \cdot 0,5125}{0,0875 + 0,5125} = 0,362;$$

$$x_{37} = \frac{x_{32} \cdot x_{36}}{x_{32} + x_{36}} = \frac{0,055 \cdot 0,362}{0,055 + 0,362} = 0,0477;$$

$$x_{38} = x_{30} + x_{31} = 0,0057 + 0,774 = 0,7797.$$

Результирующее сопротивление нулевой последовательности до точки КЗ равно:

$$x_{рез,0} = \frac{x_{37} \cdot x_{38}}{x_{37} + x_{38}} = \frac{0,0477 \cdot 0,7797}{0,0477 + 0,7797} = 0,04495.$$

Ток однофазного КЗ равен:

$$I_{n,0}^{(1)} = \frac{3 \cdot E_{\phi} \cdot I_{\phi}}{2 \cdot x_{рез} + x_{рез,0}} = \frac{3 \cdot 1,09 \cdot 2,51}{2 \cdot 0,088 + 0,04495} = 37,15 \text{ кА}.$$

Произведем расчет ПВН. Для этого определим индуктивности, волновые сопротивления и емкости прямой и нулевой последовательностей.

Индуктивности прямой и нулевой последовательности местной электростанции (ГРЭС) равны:

$$L_1 = \frac{x_{м1} \cdot x_{\phi}}{\omega} = \frac{0,1276 \cdot 50,6}{314} = 0,0206 \text{ Гн};$$

$$L_0 = \frac{x_{м0} \cdot x_{\phi}}{\omega} = \frac{0,0477 \cdot 50,6}{314} = 0,00768 \text{ Гн};$$

где  $x_{м1} = x_{29}$  - сопротивление прямой последовательности ГРЭС;

$x_{м0} = x_{37}$  - сопротивление нулевой последовательности ГРЭС.

Эквивалентные индуктивности схемы при трехфазном и однофазном КЗ в соответствии с (2.14) равны:

$$L_{\text{эк}}^{(1,1,1)} = \frac{3 \cdot L_1 \cdot L_0}{L_1 + 2 \cdot L_0} = \frac{3 \cdot 0,0206 \cdot 0,00768}{0,0206 + 2 \cdot 0,00768} = 0,0132 \text{ Гн};$$

$$L_{\text{эк}}^{(1)} = \frac{3 \cdot L_1 \cdot L_0}{3} = \frac{3 \cdot 0,0206 \cdot 0,00768}{3} = 0,0163 \text{ Гн}.$$

Волновое сопротивление прямой последовательности одноцепной

линии определяем из таблицы 2.3, которое для линии напряжением 220 кВ равно  $z_1 = 450 \text{ Ом}$ .

Волновое сопротивление нулевой последовательности одноцепной линии принимается равным  $z_0 = 2 \cdot z_1 = 2 \cdot 450 = 900 \text{ Ом}$ .

Определим входные сопротивления схемы при трехфазном и однофазном КЗ. Данные сопротивления в соответствии с выражениями (2.12) и (2.17) равны:

$$z_{\text{эк}}^{(1,1,1)} = \frac{3 \cdot z_1 \cdot z_0}{z_1 + 2 \cdot z_0} = \frac{3 \cdot 450 \cdot 900}{450 + 2 \cdot 900} = 540 \text{ Ом};$$

$$z_{\text{эк}}^{(1)} = \frac{2 \cdot z_1 + z_0}{3} = \frac{2 \cdot 450 + 900}{3} = 600 \text{ Ом}.$$

Эквивалентные емкости схемы при трехфазном и однофазном КЗ равны:

$$C_{\text{эк}}^{(1,1,1)} = \frac{2 \cdot C_1 + C_0}{3} = \frac{2 \cdot 0,0672 + 0,056}{3} = 0,0635 \text{ мкФ};$$

$$C_{\text{эк}}^{(1)} = \frac{3 \cdot C_1 \cdot C_0}{C_1 + 2 \cdot C_0} = \frac{3 \cdot 0,0672 \cdot 0,056}{0,0672 + 2 \cdot 0,056} = 0,063 \text{ мкФ};$$

где  $C_1 = 159 \cdot I \cdot U^{0,48} \cdot 10^{-6} = 159 \cdot 31,09 \cdot 230^{0,48} \cdot 10^{-6} = 0,0672 \text{ мкФ}$ ;

$$C_0 = \frac{C_1}{1,2} = 0,0672/1,2 = 0,056 \text{ мкФ}.$$

Определим восстанавливающееся напряжение на первом полюсе выключателя, при трехфазном КЗ на землю, при не учете емкости. Данное напряжение определяется по формуле (2.13)

$$u_{\text{г}}(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot L_{\text{эк}}^{(1,1,1)} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{z_{\text{эк}}^{(1,1,1)} \cdot t}{n \cdot L_{\text{эк}}^{(1,1,1)}}} \right) = \sqrt{2} \cdot 31,09 \cdot 314 \cdot 0,0132 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{540 \cdot t}{5 \cdot 0,0132}} \right).$$

При  $t = \infty$  имеем напряжение на первом полюсе выключателя  $u_{\text{г}} = u_{\text{макс}} = 182,3 \text{ кВ}$ .

Скорость ПВН согласно уравнения (2.15) равна:

$$V = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot z_{\text{ЭК}}^{(1,1,1)} \cdot 10^{-6}}{n} = \frac{2 \cdot 31,09 \cdot 314 \cdot 540 \cdot 10^{-6}}{5} = 1,49 \text{ кВ} / \text{мкс} .$$

Определим скорость ПВН при учете емкости. Данная скорость ПВН определяется по уравнению (2.16):

$$V = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot z_{\text{кр}} \cdot \gamma \cdot 10^{-6}}{n} = \frac{2 \cdot 31,09 \cdot 314 \cdot 228 \cdot 0,9 \cdot 10^{-6}}{5} = 0,567 \text{ кВ} / \text{мкс} ;$$

$$\text{где } z_{\text{кр}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{L_{\text{ЭК}}^{(1,1,1)}}{C_{\text{ЭК}}^{(1,1,1)}}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{0,0132}{0,0635 \cdot 10^{-6}}} = 228 \text{ Ом} ;$$

$$\gamma = f\left(\frac{z_{\text{ЭК}}^{(1,1,1)}}{z_{\text{кр}}}\right) = f(\eta); \quad \eta = \frac{540}{228} = 2,37 .$$

При  $\eta = 2,37$  в соответствии с кривой  $\gamma = f(\eta)$ , рисунок 2.3, имеем  $\gamma = 0,9$ .

Определим ПВН на первом полюсе выключателя и скорость его изменения при трехфазном КЗ без учета емкости. При трехфазном КЗ  $z_{\text{ЭК}}^{(3)} = 1,5 \cdot z_1$  поэтому

$$u_{\text{г}}(t) = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot L_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{z_1 \cdot t}{n \cdot L_1}}\right) = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 31,09 \cdot 314 \cdot 0,0206 \cdot \left(1 - e^{-\frac{450t}{5 \cdot 0,0206}}\right) .$$

При  $t = \infty$  напряжение на первом полюсе выключателя равно  $u_{\text{г}} = u_{\text{макс}} = 426,6 \text{ кВ}$ .

$$V = \frac{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot z_1 \cdot 10^{-6}}{n} = \frac{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 31,09 \cdot 314 \cdot 450 \cdot 10^{-6}}{5} = 1,864 \text{ кВ} / \text{мкс} .$$

С учетом емкости скорость изменения ПВН равна:

$$V = \frac{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot z_{\text{кр}} \cdot \gamma \cdot 10^{-6}}{n} = \frac{1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot 31,09 \cdot 314 \cdot 276,8 \cdot 0,83 \cdot 10^{-6}}{5} = 0,95 \text{ кВ} / \text{мкс} ,$$

$$\text{где } z_{\text{кр}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{0,0206}{0,0672 \cdot 10^{-6}}} = 276,8 \text{ Ом} ;$$

$$\eta = \frac{z_1}{z_{кр}} = \frac{450}{276,8} = 1,63.$$

По кривым рисунка 2.3 для  $\eta = 1,63$  находим  $\gamma = 0,83$ .

Определим величину ПВН на первом полюсе выключателя и скорость его изменения при однофазном КЗ без учета емкости.

$$u_{\epsilon}(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot L_{\epsilon\kappa}^{(1)} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{z_{\epsilon\kappa}^{(1)} \cdot t}{n \cdot L_{\epsilon\kappa}^{(1)}}} \right) = \sqrt{2} \cdot 37,16 \cdot 314 \cdot 0,0163 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{600t}{5 \cdot 0,0163}} \right).$$

При  $t = \infty$  напряжение на первом полюсе выключателя равно  $u_{\epsilon} = u_{макс} = 269 \text{ кВ}$ .

$$V = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot z_{\epsilon\kappa}^{(1)} \cdot 10^{-6}}{n} = \frac{\sqrt{2} \cdot 37,16 \cdot 314 \cdot 600 \cdot 10^{-6}}{5} = 1,98 \text{ кВ / мкс}.$$

С учетом емкости скорость изменения напряжения при однофазном КЗ равна:

$$V = \frac{\sqrt{2} \cdot I \cdot \omega \cdot z_{кр} \cdot \gamma \cdot 10^{-6}}{n} = \frac{\sqrt{2} \cdot 37,16 \cdot 314 \cdot 254,3 \cdot 0,89 \cdot 10^{-6}}{5} = 0,75 \text{ кВ / мкс},$$

$$\text{где } z_{кр} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{L_{\epsilon\kappa}^{(1)}}{C_{\epsilon\kappa}^{(1)}}} = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{0,0163}{0,063 \cdot 10^{-6}}} = 254,3 \text{ Ом}; \quad \eta = \frac{z_{\epsilon\kappa}^{(1,1,1)}}{z_{кр}} = \frac{600}{254,3} = 2,36.$$

Значению  $\eta = 2,36$  по кривым рисунка 2.3 соответствует  $\gamma = 0,89$ .

Результаты выполненных выше расчетов приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Значения скорости ПВН для различных видов КЗ

Вид короткого замыкания	$k^{(1,1,1)}$	$k^{(3)}$	$k^{(1)}$
Отключаемый ток, кА	31,09	31,09	37,16
Максимальное значение $u_{макс}$ , кВ	182,3	426,6	269
Скорость ПВН без учета емкости $V$ , кВ/мкс	1,49	1,864	1,98
Скорость ПВН с учетом	0,567	0,95	0,75

емкости $V$ , кВ/мкс			
----------------------	--	--	--

Кривые ПВН при различных видах короткого замыкания приведены на рисунке 2.14, а их значения в таблице 2.9.

Произведем расчет второй стадии переходного процесса. Напряжение второй стадии переходного процесса рассматриваем как волну, распространяющуюся от выключателя по линиям со скоростью света.

Таблица 2.9 - Значения ПВН при различных видах КЗ

$t$ , мкс	100	200	300	333	400	800	1200	1600
$k^{(3)}, u_{\epsilon}$ , кВ	151,0	248,9	311,6	327,1	352,3	413,7	424,3	426,2
$k^{(1,1,1)}, u_{\epsilon}$ , кВ	101,9	146,8	166,6	170,4	175,4	182,0	182,3	182,3
$k^{(1)}, u_{\epsilon}$ , кВ	140,2	207,3	239,5	245,9	254,8	268,2	268,9	269,0

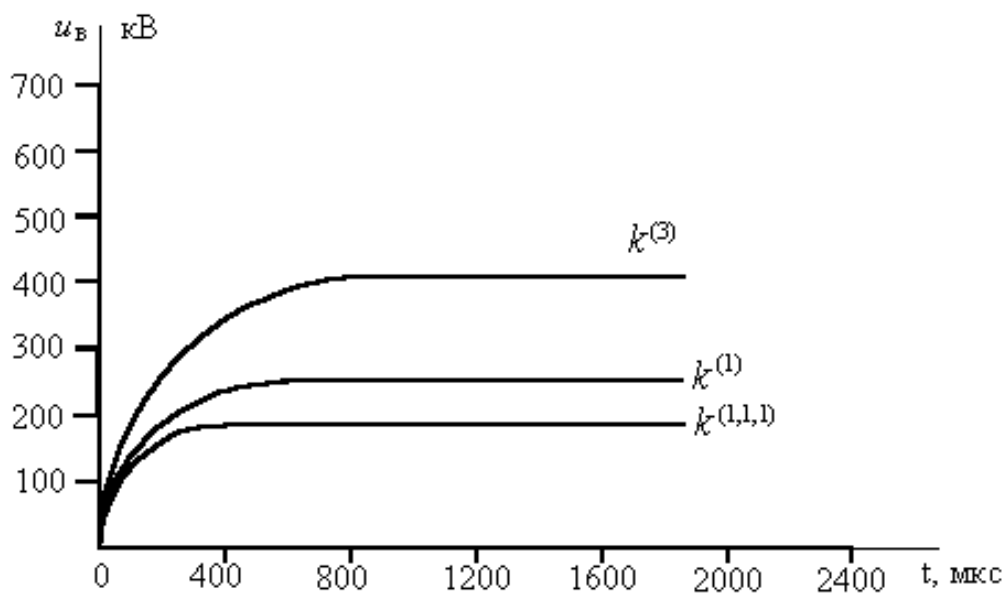


Рисунок 2.14 - Кривые ПВН при различных видах КЗ

Первую отраженную волну следует ожидать по короткой линии спустя время

$$2 \cdot t = \frac{2 \cdot l}{c} = \frac{2 \cdot 50 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^5} = 333,3 \text{ мкс}.$$

Отраженная волна частично отражается, частично проникает во входное сопротивление  $z_{\text{в}}$  и изменяет ПВН на полюсе выключателя. Отраженная волна, проникающая в сопротивление  $z_{\text{в}}$ , определяется по формуле:

$$k_n \cdot k_{\text{ом}} \cdot u_{\text{в}}(t) = 0,4 \cdot 269 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{600}{5 \cdot 0,0163}} \right),$$

где  $k_{\text{ом}} = 1$  - при входном сопротивлении схемы равном бесконечности, короткая линия разомкнута на конце;

$$k_n = \frac{2 \cdot z_{\text{эк}}^{(1)} / (n-1)}{z_{\text{эк}}^{(1)} / (n-1) + z_{\text{эк}}^{(1)}} = \frac{2 \cdot z_{\text{в}}}{z_{\text{в}} + z_{\text{эк}}^{(1)}} = \frac{2}{n} = \frac{2}{5} = 0,4.$$

Результаты расчета второй стадии переходного процесса приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 - Значения ПВН второй стадии переходного процесса

$t$ , мкс	333,3	400,0	600,0	800,0	1000,0	1200,0
$k_n \cdot k_{\text{ом}} \cdot u_{\text{в}}(t)$ , кВ	0	41,8	92,5	104,1	106,8	107,4

Кривые ПВН с учетом второй стадии переходного процесса приведены на рисунке 2.15.

Кривую 1а необходимо сопоставить с номинальной характеристикой ПВН выключателя, намеченного к установке.

Принимаем к установке выключатель с номинальным током отключения 40 кА, таблица 2.1. При однофазном КЗ в точке К1 выключатель линии отключает ток, равный 37,16 кА, что составляет примерно 93% от номинального тока отключения. Поэтому нормированная характеристика ПВН выключателя соответствует 100% тока отключения.

Нормированная характеристика ПВН имеет вид ломаной прямой с параметрами  $u_1 = 267 \text{ кВ}$ ,  $t_1 = 191 \text{ мкс}$ ,  $u_c = 374 \text{ кВ}$ ,  $t_2 = 573 \text{ мкс}$ .

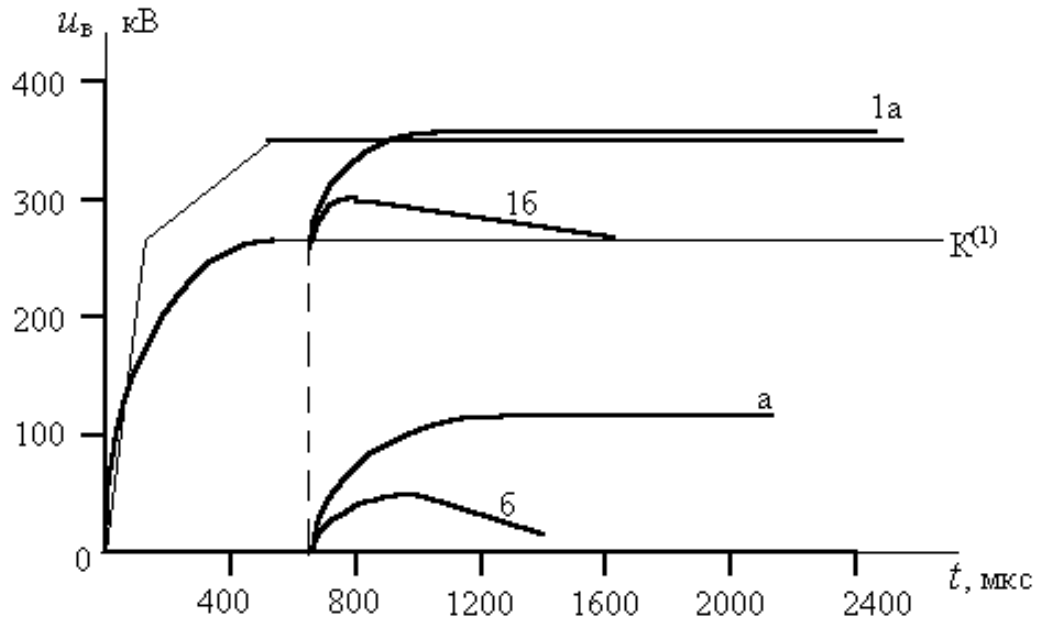


Рисунок 2.15 - Кривые ПВН с учетом второй стадии переходного процесса

Так как расчетная кривая ПВН выходит за пределы номинальной характеристики выключателя, необходимо уточнить расчет.

При уточненном расчете считаем, что входное сопротивление станции состоит из активного сопротивления  $z_{\text{эк}}^{(1)} / (n-1)$  и индуктивного  $L_{\text{эк}}^{(1)}$ , включенных параллельно.

Волну, увеличивающую ПВН на полюсе выключателя, при уточненном расчете определим с помощью кривой представленной на рисунке 2.7. Для определения кривой накладываемого напряжения, необходимо умножить ординаты вспомогательной кривой на  $2 \cdot U_m / n$ ,

где  $U_m = \frac{230 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 187,8 \text{ кВ}$  - амплитуда среднего эксплуатационного фазного напряжения;

$n$  - число линий, не считая поврежденной.

$$\frac{z_{\text{эк}}^{(1)}}{L_{\text{эк}}^{(1)} \cdot n} = \frac{600}{5 \cdot 0,0163} = 7361,96 \text{ с}^{-1}; \quad \frac{2 \cdot U_m}{n} = \frac{2 \cdot 187,8}{5} = 75,12 \text{ кВ}.$$

Расчеты кривой сведены в таблицу 2.11.

Таблица 2.11 - Уточненные значения ПВН второй стадии переходного процесса

$t$ , мкс	34	68	102	136	170	200
$7361,96 \cdot 10^{-6} \cdot t$	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,472
Ординаты кривой	0,25	0,325	0,35	0,375	0,35	0,325
Ординаты кривой умноженные на 75,12 кВ	18,78	24,4	26,3	28,2	26,3	24,4
$t$ , мкс	238	300	400	600		
$7361,96 \cdot 10^{-6} \cdot t$	1,75	2,208	2,945	4,417		
Ординаты кривой	0,3	0,25	0,15	0,05		
Ординаты кривой умноженные на 75,12 кВ	22,5	18,78	11,3	3,75		

Как видно из рисунка 2.15, уточненный расчет, кривая 1б, дает заметное снижение максимума ПВН. Таким образом, выбранный выключатель проходит по скорости восстановления напряжения.

Для дальнейшего выбора и проверки выключателя определим активные результирующие сопротивления схемы  $R_{\Sigma 1}$ ,  $R_{\Sigma 0}$  и постоянные времени  $T_a^{(3)}$ ,  $T_a^{(1)}$ .

Активные сопротивления элементов схемы выразим в Омах, отнесенных к напряжению 230 кВ;

для генераторов

$$R_{*,\varepsilon} = \frac{x_2 \cdot S_6}{\omega \cdot T_a^{(3)} \cdot S_{\varepsilon,ном}}$$

где  $x_2 = 0,238$  - сопротивление обратной последовательности генератора в относительных единицах [9];

$T_a^{(3)} = 0,54$  с - постоянная времени апериодической составляющей тока КЗ, при трехфазном КЗ на выводах генератора [9].

$$R_{*,\varepsilon} = \frac{0,238 \cdot 1000}{314 \cdot 0,54 \cdot 353} = 3976 \cdot 10^{-6},$$

или в омах  $R_{\varepsilon} = R_{*,\varepsilon} \cdot x_{\varepsilon} = 3976 \cdot 10^{-6} \cdot 50,6 = 0,201$  Ом;

для блочных трансформаторов типа ТДЦ-400000/220

$$R'_m = \frac{P_{\kappa}}{3 \cdot I_{ном}^2} = \frac{880 \cdot 10^3}{3 \cdot 1005^2} = 0,29$$
 Ом,

где  $P_{\kappa} = 880$  кВт - потери короткого замыкания в трансформаторе;

$I_{ном} = 1005$  А - номинальный ток трансформатора;

для блочных трансформаторов типа ТДЦ-400000/110

$$R''_m = \frac{900 \cdot 10^3}{3 \cdot 2010^2} \cdot \left( \frac{230}{115} \right)^2 = 0,297$$
 Ом;

для автотрансформаторов типа АТДЦТН-200000/220/110

$$R_m = \frac{430 \cdot 10^3}{3 \cdot (502,6)^2} = 0,567$$
 Ом.

Параметры воздушных линий: провода АС сечением 240 мм<sup>2</sup>, длиной 120 км, активное сопротивление 0,121 Ом/км. Результирующее сопротивление прямой последовательности четырех линий, включенных параллельно,

$$R_1 = \frac{0,121 \cdot 120}{4} = 3,63$$
 Ом.

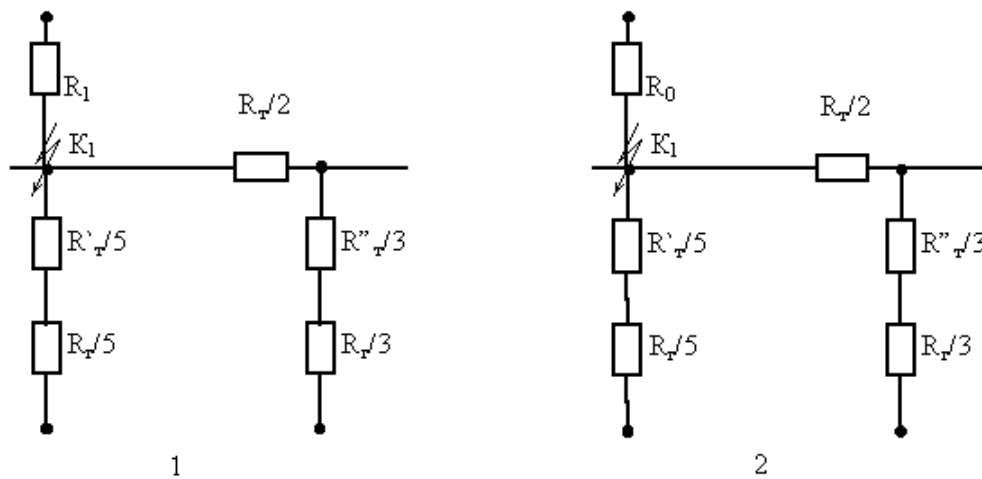
Результирующее сопротивление нулевой последовательности четырех линий, включенных параллельно, с учетом сопротивления земли

равно

$$R_0 = R_1 + 0,15 \cdot l / 4 = 3,63 + 0,15 \cdot 120 / 4 = 8,13 \text{ Ом}.$$

Активным сопротивлением системы пренебрегаем, так как оно ничтожно мало.

Схемы замещения для определения результирующих сопротивлений приведены на рисунке 2.16.



1 - схема замещения прямой последовательности;

2 - схема замещения нулевой последовательности.

Рисунок 2.16 - Схемы замещения для определения результирующих сопротивлений

$$R_2 = \frac{R'_m}{5} + \frac{R_z}{5} = \frac{0,29}{5} + \frac{0,201}{5} = 0,0982 \text{ Ом};$$

$$R_3 = \frac{R''_m}{3} + \frac{R_z}{3} + \frac{R_m}{2} = \frac{0,297 + 0,201}{3} + \frac{0,567}{2} = 0,4495 \text{ Ом};$$

$$R_4 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3} = \frac{0,0982 \cdot 0,4495}{0,0982 + 0,4495} = 0,0806 \text{ Ом};$$

$$R_{\Sigma,1} = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_1 + R_4} = \frac{0,0806 \cdot 3,63}{0,0806 + 3,63} = 0,0788 \text{ Ом};$$

$$R_{\Sigma,0} = \frac{R_0 \cdot R_4}{R_0 + R_4} = \frac{0,0806 \cdot 8,13}{0,0806 + 8,13} = 0,0798 \text{ Ом}.$$

Результирующие индуктивные сопротивления прямой и нулевой последовательностей равны:

$$x_{\Sigma,1} = x_{рез} \cdot x_{\bar{\theta}} = 0,088 \cdot 50,6 = 4,453 \text{ Ом};$$

$$x_{\Sigma,0} = x_{рез,0} \cdot x_{\bar{\theta}} = 0,04495 \cdot 50,6 = 2,275 \text{ Ом}.$$

Постоянные времени  $T_a^{(3)}$  и  $T_a^{(1)}$  равны:

$$T_a^{(3)} = \frac{x_{\Sigma,1}}{\omega \cdot R_{\Sigma,1}} = \frac{4,453}{314 \cdot 0,0788} = 0,18 \text{ с};$$

$$T_a^{(1)} = \frac{x_{\Sigma,0} + 2 \cdot x_{\Sigma,1}}{\omega \cdot (2 \cdot R_{\Sigma,1} + R_{\Sigma,0})} = \frac{2 \cdot 4,453 + 2,275}{314 \cdot (2 \cdot 0,0788 + 0,789)} = 0,15 \text{ с}.$$

Принимаем к установке двухпериодные выключатели серии ВНВ с собственным временем отключения  $t_{с,в\text{ выкл}} = 0,025 \text{ с}$  и с номинальным током отключения 40 кА. Расчетное время размыкания контактов

$$\tau = t_{с,в\text{ выкл}} + 0,01 = 0,025 + 0,01 = 0,035 \text{ с}.$$

Так как выключатель быстродействующий, то можно пренебречь затуханием периодической составляющей тока КЗ. Расчетным видом является однофазное КЗ.

$$I_{n,\tau}^{(1)} = I_{n,0}^{(1)} = 37,15 \text{ кА}, \quad T_a^{(1)} = 0,15 \text{ с};$$

$$i_{a,\tau}^{(1)} = \sqrt{2} \cdot I_{n,0}^{(1)} \cdot e^{-\frac{\tau}{T_a^{(1)}}} = \sqrt{2} \cdot 37,15 \cdot e^{-\frac{0,035}{0,15}} = 41,61 \text{ кА};$$

$$\beta = \frac{i_{a,\tau} \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot I_{n,\tau}^{(1)}} = \frac{41,61 \cdot 100}{\sqrt{2} \cdot 37,15} = 79,2\%.$$

Для момента времени  $\tau = 0,035 \text{ с}$  по кривой, рисунок 2.1, определяем  $\beta_{ном} = 45\%$ .

$$i_{a,\tau,ном} = \sqrt{2} \cdot I_{отк,ном} \cdot \frac{\beta_{ном}}{100} = \sqrt{2} \cdot 40 \cdot 0,45 = 25,46 \text{ кА}.$$

Так как  $i_{a,\tau} = 41,61 \text{ кА} > i_{a,\tau,ном} = 25,46 \text{ кА}$ , то проверяем выключатель по полному току отключения.

$$I_{отк,ном} < I_{n,\tau}^{(1)} \cdot \frac{1 + \beta/100}{1 + \beta_{ном}/100} = 37,15 \cdot \frac{1 + 0,792}{1 + 0,45} = 45,92 \text{ кА}.$$

Поскольку  $I_{отк,ном} = 40 \text{ кА} < 45,92 \text{ кА}$ , то принимаем к установке выключатель с номинальным током отключения  $I_{отк,ном} = 50 \text{ кА}$ .

$$i_{a,\tau,ном} = \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0,45 = 31,8 \text{ кА} < i_{a,\tau} = 41,61 \text{ кА}, \text{ однако}$$

$$I_{отк,ном} = 50 \text{ кА} > I_{n,\tau}^{(1)} \cdot \frac{1 + \beta/100}{1 + \beta_{ном}/100} = 45,92 \text{ кА},$$

таким образом, принятый выключатель с номинальным током отключения 50 кА, проходит по отключающей способности при однофазном КЗ.

Ударный коэффициент при однофазном КЗ равен

$$k_y^{(1)} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a^{(1)}}} = 1 + e^{-\frac{0,01}{0,15}} = 1,936.$$

Проверим выключатель по току включения:

$$I_{вкл,ном} = 50 \text{ кА} > I_{n,0}^{(1)} = 37,15 \text{ кА};$$

$$i_{вкл,ном} = 2,55 \cdot I_{отк,ном} = 2,55 \cdot 50 = 127,5 \text{ кА} > \sqrt{2} \cdot k_y^{(1)} \cdot I_{n,0}^{(1)} = \sqrt{2} \cdot 1,936 \cdot 37,15 = 101,74 \text{ кА}.$$

Проверим выключатель на электродинамическую стойкость

$$I_{дин,ном} = I_{отк,ном} = 50 \text{ кА} > I_{n,0}^{(1)} = 37,15 \text{ кА};$$

$$i_{дин,ном} = 2,55 \cdot I_{отк,ном} = 2,55 \cdot 50 = 127,5 \text{ кА} > \sqrt{2} \cdot k_y^{(1)} \cdot I_{n,0}^{(1)} = \sqrt{2} \cdot 1,936 \cdot 37,15 = 101,74 \text{ кА}$$

Проверим выключатель на термическую стойкость

$$B_{\kappa} = B_{\kappa,n} + B_{\kappa,a} \leq B_{тер,доп},$$

где  $B_{тер,доп} = I_T^2 \cdot t_{отк} = 50^2 \cdot 2 = 5000 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$ , так как  $t_{отк} = 2 \text{ с} < t_T = 3 \text{ с}$ .

Термический импульс тока КЗ при  $t_{отк} = 2 \text{ с} \geq 3 \cdot T_a = 3 \cdot 0,15 = 0,45 \text{ с}$  определяем по формуле (1.15)

$$B_{\kappa} = (I_{n,0}^{(1)})^2 \cdot (t_{отк} + T_a) = 37,15^2 \cdot (2 + 0,15) = 2967,26 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

где  $t_{отк} = 2\text{ с}$  - расчетная продолжительность КЗ, равная времени срабатывания резервной защиты.

Выбранный выключатель термически стойкий так как

$$B_{\kappa} = 2967,26 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} < B_{тер, доп} = 5000 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Результаты выбора выключателя сведены в таблицу 2.12.

Таблица 2.12 - Расчетные и каталожные данные выключателя

Расчетные данные	Каталожные данные выключателя ВНВ	Условия выбора и проверки
$U_{уст} = 220 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 220 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{макс} = 975 \text{ А}$	$I_{ном} = 3150 \text{ А}$	$I_{макс} \leq I_{ном}$
$I_{n,\tau} = 37,15 \text{ кА}$	$I_{отк,ном} = 50 \text{ кА}$	$I_{n,\tau} \leq I_{отк,ном}$
$i_{a,\tau} = 41,61 \text{ кА}$	$i_{a,\tau,ном} = 31,8 \text{ кА}$	$i_{a,\tau} \leq i_{a,\tau,ном}$
$I_{n,\tau} \cdot \frac{1 + \beta/100}{1 + \beta_{ном}/100} = 45,92 \text{ кА}$	$I_{отк,ном} = 50 \text{ кА}$	$I_{n,\tau} \cdot \frac{1 + \beta/100}{1 + \beta_{ном}/100} \leq I_{отк,ном}$
$I_{n,0} = 37,15 \text{ кА}$	$I_{вкл,ном} = 50 \text{ кА}$	$I_{n,0} \leq I_{вкл,ном}$
$i_y = 101,74 \text{ кА}$	$i_{вкл,ном} = 127,5 \text{ кА}$	$i_y \leq i_{вкл,ном}$
$I_{n,0} = 37,15 \text{ кА}$	$I_{дин} = 50 \text{ кА}$	$I_{n,0} \leq I_{дин}$
$i_y = 101,74 \text{ кА}$	$i_{дин} = 127,5 \text{ кА}$	$i_y \leq i_{дин}$
$B_{\kappa} = 2967,26 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{тер, доп} = 5000 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{\kappa} \leq B_{тер, доп}$
$V = 0,75 \text{ кВ} / \text{мкс}$	$V_{ном} = 1,6 \text{ кВ} / \text{мкс}$	$V \leq V_{ном}$

### 3 ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

#### 3.1 Выбор трансформаторов тока

Трансформатор тока предназначен для преобразования тока до значения удобного для измерения, а также для отделения цепей измерения и защиты от первичных цепей высокого напряжения.

Для питания измерительных приборов и устройств релейной защиты и автоматики целесообразно использовать трансформаторы тока (ТА) с несколькими сердечниками. Класс точности измерительного трансформатора тока выбирается в зависимости от его назначения. Если к трансформатору тока подключаются расчетные счетчики электроэнергии, то класс точности его работы должен быть 0,5. Если же к трансформатору тока подключаются только измерительные приборы, то достаточен класс точности единица.

Трансформаторы тока, предназначенные для питания измерительных приборов, выбираются:

а) по напряжению

$$U_{уст} \leq U_{ном}; \quad (3.1)$$

б) по току

$$I_{раб,ном} \leq I_{1ном} \quad I_{форс} \leq I_{1ном}. \quad (3.2)$$

Номинальный первичный ток трансформатора тока должен быть как можно ближе к рабочему току установки, так как недогрузка первичной обмотки приводит к увеличению погрешностей;

в) по конструкции и классу точности.

Выбранные трансформаторы тока должны быть проверены:

а) по электродинамической стойкости

$$i_y \leq k_{эд} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1ном} \quad \text{или} \quad i_y \leq i_{дин} \quad (3.3)$$

где  $i_y$  - ударный ток КЗ в месте установки трансформатора тока;

$k_{эд}$  - кратность электродинамической стойкости трансформатора тока по каталогу;

$I_{1ном}$  - номинальный первичный ток трансформатора тока;

$i_{дин}$  - ток электродинамической стойкости трансформатора тока по каталогу.

Шинные трансформаторы тока на электродинамическую устойчивость не проверяются, так как их устойчивость определяется устойчивостью шинной конструкции;

б) по термической стойкости

$$B_{\kappa} \leq B_{тер, доп}, \quad (3.4)$$

где  $B_{\kappa}$  - тепловой импульс тока КЗ в месте установки трансформатора тока;

$B_{тер, доп}$  - допустимое значение теплового импульса для трансформатора тока, которое определяется по (1.21) при  $t_{отк} \geq t_T$  или по (1.22) при  $t_{отк} < t_T$ .

в) по вторичной нагрузке

$$z_2 \leq z_{2ном}, \quad (3.5)$$

где  $z_2$  - расчетная вторичная нагрузка трансформатора тока;

$z_{2ном}$  - номинальная допустимая нагрузка трансформатора тока для выбранного класса точности.

Расчетная вторичная нагрузка трансформатора тока состоит из сопротивления приборов  $r_{приб}$ , соединительных проводов  $r_{пр}$  и переходного сопротивления контактов  $r_{\kappa}$ :

$$z_2 = r_2 = r_{приб} + r_{пр} + r_{\kappa}. \quad (3.6)$$

Сопротивление приборов определяется по выражению

$$r_{приб} = \frac{S_{приб}}{I_{2ном}^2}, \quad (3.7)$$

где  $S_{приб}$  - мощность, потребляемая приборами;

$I_{2ном}$  - номинальный ток вторичной обмотки трансформатора тока.

Для подсчета мощности потребляемой приборами нужно составить таблицу 3.1, в которую необходимо внести все приборы, подключенные к вторичной обмотке трансформатора тока.

Расчет сопротивления приборов ведется для наиболее нагруженной фазы.

Таблица 3.1 - Вторичная нагрузка трансформаторов тока

Наименование прибора	Тип прибора	Потребляемая мощность ВА		
		фаза А	фаза В	фаза С
Амперметр показывающий	Э-335	0,5	0,5	0,5
Ваттметр регистрирующий	Н-348	10	-	10
Счетчик активной энергии	САЗ-И681	2,5	-	2,5
ИТОГО		13,0	0,5	13,0

Сопротивление контактов принимается равным 0,05 Ом при количестве приборов три и менее и 0,1 Ом при количестве приборов более трех. Сопротивление соединительных проводов зависит от их длины и сечения. Для того чтобы трансформатор тока работал в выбранном классе точности, необходимо выполнить условие

$$r_{приб} + r_{пр} + r_{к} \leq z_{2ном},$$

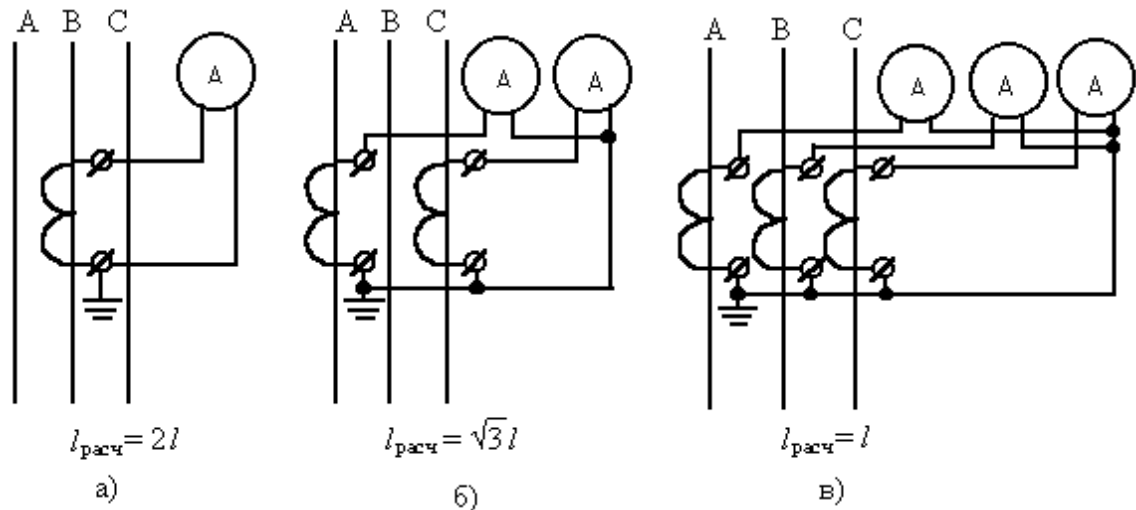
откуда  $r_{пр} = z_{2ном} - r_{приб} - r_{к}$ .

Зная сопротивление проводов  $r_{пр}$  можно определить их сечение:

$$q = \frac{\rho \cdot l_{расч}}{r_{np}}, \quad (3.8)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала провода;

$l_{расч}$  - расчетная длина соединительных проводов, зависящая от схемы соединения трансформаторов тока, рисунок 3.1.



а - включение в одну фазу; б – включение в неполную звезду,  
в - включение в полную звезду

Рисунок 3.1 - Схемы присоединения измерительных приборов к трансформаторам тока

Во вторичных цепях основного и вспомогательного оборудования мощных электростанций с агрегатами 100 МВт и более, а также на подстанциях с высшим напряжением 220 кВ и выше применяются медные провода ( $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ ). В остальных случаях во вторичных цепях применяются провода с алюминиевыми жилами ( $\rho = 0,0283 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ ).

Длину соединительных проводов для разных присоединений берут из таблицы 3.2.

Таблица 3.2 - Длина соединительных проводов

Наименование присоединения	Длина соединительных проводов, м
Все цепи ГРУ 6 - 10 кВ, кроме линий к потребителям	40 ÷ 60
Цепи генераторного напряжения блочных электростанций	20 ÷ 40
Линии 6 ÷ 10 кВ к потребителям	4 ÷ 6
Все цепи распределительных устройств	
35 кВ	60 ÷ 75
110 кВ	75 ÷ 100
220 кВ	100 ÷ 150
330 кВ и выше	150 ÷ 175
Синхронные компенсаторы	25 ÷ 40

Для подстанций указанные длины снижают на 15 - 20 процентов [1].

В соответствии с ПУЭ в качестве соединительных проводов применяются многожильные кабели с бумажной, резиновой, полихлорвиниловой или полиэтиленовой изоляцией параметры которых приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Контрольные кабели

Марка кабеля	Сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	Число жил
--------------	---	-----------

Марка кабеля	Сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	Число жил
Кабели с медными жилами и резиновой изоляцией		
КРСГ, КРСБ, КРСБГ, КРСК	1,00; 1,50; 2,50;	4, 5, 7, 10;
	4,00; 6,00	4, 7, 10
КРВГ, КРВГЭ, КРВБ, КРВБГ, КРНГ, КРВБбГ, КРНБГ, КРБбГ, КРНБ	0,75; 1,00; 1,50	4, 5, 7, 10
КРВБ, КРВБГ, КРВБбГ, КРНГ	2,50	4, 5, 7, 10
	4,00; 6,00	4, 7, 10
Кабели с медными жилами и поливинилхлоридной изоляцией		
КВВГ, КВВГЭ, КВВБ, КВВБГ, КВВБбГ, КВБбШв, КВПбШв	0,75; 1,00; 1,50; 2,50	4, 5, 7, 10
	4,00; 6,00	4, 7, 10
Кабели с медными жилами и полиэтиленовой изоляцией		
КПВГ, КПВБ, КПВБГ, КПВБбГ, КПБбШв, КППбШв, КПсВГ, КПсВГЭ, КПсВБ, КПсВБГ, КПсВБбГ, КПСБбШв, КПсПбШв	0,75; 1,00; 1,50; 2,50	4, 5, 7, 10
	4,00; 6,00	4, 7, 10
Кабели с алюминиевыми жилами и резиновой изоляцией		
АКРВГ, АКРВГЭ	2,50	4, 5, 7, 10
	4,00; 6,00	4, 7, 10
АКРВБ, АКРВБГ,	2,50	4, 5, 7, 10

Марка кабеля	Сечение токопроводящих жил, мм <sup>2</sup>	Число жил
АКРВБбГ, АКРНГ, АКРНБ, АКРНБГ, АКРНБбГ	4,00; 6,00	4, 7, 10
Кабели с алюминиевыми жилами и поливинилхлоридной изоляцией		
АКВВГ, АКВВГЭ, АКВВБ, АКВВБГ, АККВВБбГ, АКВБбШв	2,50	4, 5, 7, 10
	4,00; 6,00	4, 7, 10
Кабели с алюминиевыми жилами и полиэтиленовой изоляцией		
АКПВГ, АКПВБ, АКПВБГ, АКПВБбГ, АКПБбШв, АКПсВГ, АКПсВГЭ, АКПсВБ, АКПсВБГ, АКПсВБбГ, АКПсБбШв	2,50	4, 5, 7, 10
	4,00; 6,00	4, 7, 10

По условиям механической прочности сечение для алюминиевых жил должно быть не менее 4 мм<sup>2</sup>, а для медных жил - 2,5 мм<sup>2</sup>. Провода сечением больше 6 мм<sup>2</sup> обычно не применяются.

Перечень необходимых измерительных приборов устанавливаемых в рассматриваемой цепи выбирается по таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Контрольно-измерительные приборы на электростанциях и подстанциях

Наименование цепи	Место установки приборов	Перечень приборов	Примечания
<b>Электростанции</b>			

Наименование цепи	Место установки приборов	Перечень приборов		Примечания
Турбогенератор	Статор	Амперметр в каждой фазе, вольтметр, ваттметр, варметр, счетчик активной энергии, датчики активной и реактивной мощности. Регистрирующие приборы: ваттметр, амперметр и вольтметр на генераторах 63 МВт и более		а) Перечисленные приборы устанавливаются на БШУ или ГШУ б) На генераторах до 12 МВт в цепи статора устанавливается один амперметр в) На групповом щите турбины устанавливается ваттметр, частотомер в цепи статора, если нет БШУ и вольтметр в цепи возбуждения г) При наличии БШУ на ЦШУ устанавливаются ваттметр и варметр д) На ЦШУ устанавливаются частотомер, суммирующие ваттметр и варметр
	Ротор	Амперметр, вольтметр. Вольтметр в цепи основного и резервного возбудителей. Регистрирующий амперметр на генераторах 63 МВт и более		
Гидрогенератор	Статор	Такие же приборы, что и в цепи статора турбогенератора		В цепи генератора устанавливаются осциллограф и приборы синхронизации
	Ротор	Амперметр, вольтметр		
Блок генератор трансформатор	Генератор	Такие же приборы что и в цепи турбогенератора		
	Блочный трансформатор	НН	-	

Наименование цепи	Место установки приборов	Перечень приборов		Примечания
		СН	Амперметр, ваттметр и варметр с двусторонней шкалой	
		ВН	Амперметр	
Трансформатор связи с энергосистемой или РУ разных напряжений	Двухобмоточный	ВН	-	У трансформаторов, работающих в блоке трансформатор-линия, амперметры устанавливаются во всех фазах
		НН	Амперметр, ваттметр и варметр с двусторонней шкалой	
	Трехобмоточный и автотрансформатор	ВН	Амперметр	
		СН НН	Амперметр, ваттметр и варметр с двусторонней шкалой	
Линия или трансформатор собственных нужд	На одну секцию	Со стороны питания: амперметр, ваттметр, счетчик активной энергии		На блочных ТЭС приборы устанавливаются на вводе 6,3 кВ
	На две секции	На вводе к секциям 6,3кВ: амперметр, ваттметр счетчик активной энергии, датчик активной мощности		
Линии 6-10 кВ к потребителям		Амперметр, расчетные счетчики активной и реактивной энергии на линиях, принадлежащих потребителю		Если по счетчикам не ведется денежный расчет, то счетчик реактивной энергии не устанавливается

Наименование цепи	Место установки приборов	Перечень приборов	Примечания
Линии 35 кВ		Амперметр, расчетные счетчики активной и реактивной энергии на тупиковых потребительских линиях	
Линии 110-220 кВ		Амперметр, ваттметр, варметр, фиксирующий прибор, используемый для определения места КЗ, расчетные счетчики активной и реактивной энергии на тупиковых потребительских линиях	а) Для линий с пофазным управлением устанавливаются три амперметра б) На линиях с двусторонним питанием ваттметр и варметр с двусторонней шкалой, два счетчика активной энергии со стопорами
Линии 350-750 кВ		Амперметр в каждой фазе, ваттметр и варметр с двусторонней шкалой, осциллограф, фиксирующий прибор для определения места КЗ, датчики активной и реактивной	На линиях межсистемной связи устанавливаются счетчики активной энергии со стопорами

Наименование цепи	Место установки приборов	Перечень приборов	Примечания
		мощности	
Сборные шины генераторного напряжения	На каждой секции или системе шин	Вольтметр для измерения междуфазного напряжения, вольтметр с переключением для измерения трех фазных напряжений, частотомер, приборы синхронизации: два частотомера, два вольтметра и синхроскоп	Приборы синхронизации устанавливаются при возможности синхронизации
	Общие приборы с переключением на любую секцию или систему шин	Два регистрирующих вольтметра для измерения междуфазных напряжений и два частотомера	
Шины 6 кВ собственных нужд		Вольтметр для измерения междуфазного напряжения и вольтметр с переключением для измерения трех фазных напряжений	
Электро-двигатель	Статор	Амперметр	На двухскоростных электродвигателях

Наименование цепи	Место установки приборов	Перечень приборов	Примечания
			устанавливаются в каждой обмотке
Сборные шины высшего напряжения электростанции	На каждой секции или системе шин	Вольтметр с переключением для измерения трех междуфазных напряжений; регистрирующие приборы: частотомер, вольтметр и суммирующий ваттметр на электростанциях 200 МВт и более; приборы синхронизации: два частотомера, два вольтметра, синхроноскоп; осциллограф	а) На шинах 35 кВ устанавливается один вольтметр для контроля линейного напряжения и один вольтметр с переключением для измерения трех фазных напряжений б) На шинах 110 кВ устанавливается по одному осциллографу на секцию, на шинах 150-220 кВ - по два осциллографа
Шинное соединение и секционный выключатель		Амперметр	
Обходной выключатель		Амперметр, ваттметр и варметр с двусторонней шкалой, расчетные счетчики и фиксирующий прибор	

Наименование цепи	Место установки приборов	Перечень приборов	Примечания
Шунтирующий реактор		Амперметр, варметр	
Шунтирующая емкость		Амперметр в каждой фазе, варметр	
<b>Подстанции</b>			
Двухобмоточный трансформатор	ВН	-	<b>а)</b> Ваттметр - только для трансформаторов 110 кВ и выше <b>б)</b> Варметр - только для трансформаторов 220 кВ и выше <b>в)</b> Если поток мощности через трансформатор может меняться по направлению, то устанавливаются ваттметры и варметры с двусторонней шкалой и два счетчика со стопорами <b>г)</b> На трансформаторах с расщепленной обмоткой НН, а также на присоединённых к шинам 6-10 кВ через сдвоенные реакторы приборы устанавливаются в каждой цепи НН
	НН	Амперметр, ваттметр, варметр, счетчики активной и реактивной энергии	
Трехобмоточный трансформатор или автотрансформатор	ВН	Амперметр	
	СН НН	Амперметр, ваттметр, варметр, счетчики активной и реактивной энергии	

Наименование цепи	Место установки приборов	Перечень приборов	Примечания
Синхронный компенсатор	Статор	Амперметр, вольтметр, варметр с двусторонней шкалой, счетчики реактивной энергии со стопорами	
	Ротор	мперметр, вольтметр	
Сборные шины 6, 10, 35 кВ	На каждой секции или системе шин	Вольтметр для измерения междуфазного напряжения и вольтметр с переключением для измерения трех фазных напряжений	<ul style="list-style-type: none"> <li>На транзитной подстанции на шинах 35 кВ устанавливается регистрирующий вольтметр, если шины подстанции являются контрольными точками по напряжению в системе</li> </ul>
Сборные шины 110-220 кВ	На каждой секции или системе шин	Вольтметр с переключателем для измерения линейных напряжений и регистрирующий вольтметр; осциллограф на транзитных подстанциях, фиксирующий прибор	На транзитной подстанции на шинах 110-220 кВ устанавливается регистрирующий вольтметр, если шины подстанции являются контрольными точками по напряжению в системе

Наименование цепи	Место установки приборов	Перечень приборов	Примечания
Сборные шины 330 кВ и выше	На каждой секции или системе шин	Те же приборы, что и на шинах 110-220 кВ и регистрирующий частотомер	На подстанции, где по условиям работы энергосистемы требуется точная ручная синхронизация, устанавливается колонка синхронизации
Трансформатор собственных нужд	ВН	-	-
	НН	Амперметр, расчетный счетчик активной энергии	
Дугогасительная катушка	-	Регистрирующий амперметр	-

Сравнение расчетных и каталожных данных выбранного трансформатора тока сводят в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 - Расчетные и каталожные данные трансформатора тока

Расчетные параметры	Каталожные данные	Условия выбора
$U_{уст}$	$U_{ном}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{макс}$	$I_{ном}$	$I_{макс} \leq I_{ном}$
$i_y = \sqrt{2} \cdot k_y \cdot I_{n,0}$	$i_{дин} = \sqrt{2} \cdot k_{дин} \cdot I_{1ном}$	$i_y \leq i_{дин}$
$B_k$	$B_{тер,доп}$	$B_k \leq B_{тер,доп}$
$z_2$	$z_{2ном}$	$z_2 \leq z_{2ном}$

### 3.2 Выбор трансформаторов напряжения

Трансформатор напряжения предназначен для преобразования напряжения до величины удобной для измерения, а также для отделения цепей измерения и релейной защиты от первичных цепей высокого напряжения.

Трансформаторы напряжения выбираются:

а) по напряжению установки

$$U_{уст} \leq U_{ном}; \quad (3.9)$$

б) по конструкции и схеме соединения обмоток;

в) по классу точности;

г) по вторичной нагрузке

$$S_2 \leq S_{ном}, \quad (3.10)$$

где  $S_{ном}$  - номинальная мощность трансформатора напряжения в выбранном классе точности;

$S_2$  - суммарная нагрузка измерительных приборов присоединенных к трансформатору напряжения.

Для подсчета мощности потребляемой приборами составляется таблица 3.6, в которую вносятся все приборы, подключенные к вторичной обмотке трансформатора напряжения.

Таблица 3.6 - Вторичная нагрузка трансформаторов напряжения

Приборы	Тип	$S_{обм},$ ВА	Число обмоток	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	Число приборов	Общая потребляемая мощность	
							$P, \text{ Вт}$	$Q, \text{ ВА}$
Вольтметр	Э-350	3,0	1	1	0	1	3,0	-
Ваттметр	Э-365	1,5	2	1	0	2	6,0	-
Счетчик	И-681	2,0	2	0,38	0,925	1	4,0	9,7

активной энергии								
Частотомер	Э-353	3,0	1	1	0	2	6,0	-
Итого							19,0	9,7

Для упрощения расчетов нагрузку приборов можно не разделять по фазам, тогда

$$S_2 = \sqrt{P_{\text{приб}}^2 + Q_{\text{приб}}^2} . \quad (3.11)$$

Сечение соединительных проводов во вторичной цепи трансформаторов напряжения выбирают по допустимой потере напряжения. Согласно ПУЭ сечение и длина проводов и кабелей должны выбираться в цепях напряжения расчетных счетчиков такими, чтобы потери напряжения в этих цепях составляли не более 0,25% номинального напряжения при питании от трансформаторов напряжения класса точности 0,5 и не более 0,5% при питании от трансформаторов напряжения класса точности 1,0. Для обеспечения этого требования допускается применение отдельных кабелей от трансформаторов напряжения до счетчиков.

До щитовых измерительных приборов потери напряжения должны составлять не более 1,5% при номинальной нагрузке [1].

Для цепей напряжения минимальное сечение соединительных проводов по условию механической прочности составляет 2,5 мм<sup>2</sup> для алюминиевых жил и 1,5 мм<sup>2</sup> для медных жил.

### 3.3 Примеры выбора и проверки измерительных трансформаторов

**Пример 3.1** Выбрать трансформаторы тока и напряжения для

присоединения контрольно-измерительных приборов в цепи генератора типа ТВВ-500-2Е. Значение тока КЗ в месте установки  $I_{n,0}^{(3)} = 53 \text{ кА}$ .

Перечень измерительных приборов устанавливаемых в цепи генератора выбираем по таблице 3.4. Вторичная нагрузка трансформатора тока приведена в таблице 3.7.

Так как в цепи генератора устанавливается комплектный токопровод типа ТЭКН-Е-20-20000-560, то принимаем к установке встроенные трансформаторы тока типа ТШВ-24-24000/5 с параметрами  $I_{ном} = 24000 \text{ А}$ ,  $k_T = 6$ ,  $t_T = 3 \text{ с}$ ,  $r_{2ном} = 4 \text{ Ом}$ .

Таблица 3.7 - Вторичная нагрузка трансформатора тока

Наименование прибора	Тип прибора	Потребляемая мощность, ВА		
		фаза А	фаза В	фаза С
Амперметр	Э-350	0,5	0,5	0,5
Ваттметр	Д-335	0,5	-	0,5
Варметр	Д-335	0,5	-	0,5
Счетчик активной энергии	И-670	2,5	-	2,5
Датчик активной мощности	Е-849	1,0	-	1,0
Датчик реактивной мощности	Е-830	1,0	-	1,0
Регистрирующий ваттметр	Н-395	10,0	-	10,0
Регистрирующий	Н-394	-	10,0	-

амперметр				
Итого		16,0	10,5	16,0

Из таблицы 3.7 видно, что наиболее загруженными являются фазы А и С.

Определим сопротивление приборов по формуле (3.7):

$$r_{\text{приб}} = \frac{S_{\text{приб}}}{I_{2\text{ном}}^2} = \frac{16}{5^2} = 0,64 \text{ Ом}.$$

Принимаем сопротивление контактов  $r_{\kappa} = 0,1 \text{ Ом}$ , так как количество приборов более трех.

Определим из формулы (3.6) допустимое сопротивление проводов

$$r_{\text{пр}} = r_{2\text{ном}} - r_{\text{приб}} - r_{\kappa} = 4,0 - 0,64 - 0,1 = 3,26 \text{ Ом}.$$

В качестве соединительных проводов принимаем кабель с медными жилами, ориентировочную длину которого, в соответствии с таблицей 3.2, принимаем 30 м.

Трансформаторы тока соединены в полную звезду, поэтому  $l_{\text{расч}} = l = 30 \text{ м}$ .

Определим по формуле (3.8) сечение жил кабеля

$$q = \frac{\rho \cdot l_{\text{расч}}}{r_{\text{пр}}} = \frac{0,175 \cdot 30}{3,26} = 0,16 \text{ мм}^2.$$

По условиям механической прочности принимаем, в соответствии с таблицей 3.3, контрольный кабель КРНГ с жилами сечением 2,5 мм<sup>2</sup>.

Нагрузка вторичной обмотки трансформатора тока с учетом контрольного кабеля составляет

$$r_{\text{пр}} = \frac{\rho \cdot l_{\text{расч}}}{q} = \frac{0,1075 \cdot 30}{2,5} = 0,21 \text{ Ом};$$

$$r_2 = 0,21 + 0,1 + 0,64 = 0,95 \text{ Ом}.$$

Сравнение расчетных и каталожных данных трансформатора тока приведены в таблице 3.8.

Шинные трансформаторы тока на электродинамическую устойчивость не проверяются, так как их устойчивость определяется устойчивостью шинной конструкции.

В цепи комплектного токопровода установлены трансформаторы напряжения типа ЗНОМ-20 и ЗНОЛ.06-24. Проверим трансформатор ЗНОМ-20 по вторичной нагрузке. Нагрузка, подключаемая к данному трансформатору напряжения, приведена в таблице 3.9.

Таблица 3.8 - Расчетные и каталожные данные трансформатора тока

Расчетные параметры	Каталожные данные	Условия выбора
$U_{уст} = 20 \text{ кВ}$	$U_{ном} = 24 \text{ кВ}$	$U_{уст} \leq U_{ном}$
$I_{макс} = 17 \text{ кА}$	$I_{ном} = 24 \text{ кА}$	$I_{макс} \leq I_{ном}$
$B_{\kappa} = I_{n,0}^2 \cdot t_{отк} = 53^2 \cdot 4 = 11236 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{тер,доп} = (k_T \cdot I_{ном})^2 \cdot t_T = (6 \cdot 24)^2 \cdot 3 = 62208 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}$	$B_{\kappa} \leq B_{тер,доп}$
$r_2 = 0,95 \text{ Ом}$	$r_{2,ном} = 4 \text{ Ом}$	$r_2 \leq r_{2,ном}$

Вторичная нагрузка трансформатора напряжения равна

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{92^2 + 7,3^2} = 92,22 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Трансформатор напряжения ЗНОМ-20 имеет номинальную мощность 75 ВА в классе точности 0,5.

$$S_2 = 92,22 \text{ В} \cdot \text{А} < S_{ном} = 3 \cdot 75 = 225 \text{ В} \cdot \text{А},$$

таким образом, трансформатор напряжения будет работать в выбранном классе точности.

Для соединения трансформатора напряжения с приборами принимаем

контрольный кабель с медными жилами КРВГ сечением жил 1,5 мм<sup>2</sup> по условию механической прочности.

Таблица 3.9 - Вторичная нагрузка трансформатора напряжения

Наименование прибора	Тип прибора	$S_{обм}$ , ВА	Число обмоток	$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	Число приборов	Общая потребляемая мощность	
							$P$ , Вт	$Q$ , ВА
Вольтметр	Э-350	3	1	1	0	2	6	-
Ваттметр	Д-335	1,5	2			2	6	-
Варметр	Д-335	1,5	2		0	2	6	-
Счетчик активной энергии	И-670	1,5 Вт	2	0,38	0,925	1	3	7,3
Датчик активной мощности	Е-849	10,0	1	1	0	1	10	-
Датчик реактивной мощности	Е-830	10,0	1	1	0	1	10	-
Регистрирующий ваттметр	Н-395	10,0	2	1	0	1	20	-
Регистрирующий вольтметр	Н-394	10,0	1	1	0	1	10	-
Частотомер	Э-362	1,0	1	1	0	1	1	-
Синхроноскоп	Э-327	10,0	2	1	0	1	20	-
ИТОГО							92	7,3

## 4 ВЫБОР ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И ИЗОЛЯТОРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

### 4.1 Выбор шин закрытых распределительных устройств

В закрытых распределительных устройствах (ЗРУ) 6÷20 кВ сборные шины и ошиновка выполняются жесткими алюминиевыми шинами, укрепленными на опорных изоляторах.

При токах до 3000 А применяются одно, двух и трехполосные шины прямоугольного сечения. При больших токах используются шины коробчатого сечения, так как они обеспечивают меньшие потери от эффекта близости и поверхностного эффекта, а также лучшие условия охлаждения [1].

Согласно ПУЭ сборные шины электроустановок и ошиновка в пределах открытых и закрытых распределительных устройств всех напряжений выбираются по допустимому току. Условие выбора имеет вид

$$I_{\max} = I_{\text{форс}} \leq I_{\text{доп}}, \quad (4.1)$$

где  $I_{\max} = I_{\text{форс}}$  - максимальный ток нагрузки ремонтного или послеаварийного режима;

$I_{\text{доп}}$  - допустимый ток нагрузки на шины.

Допустимые токовые нагрузки  $I_{\text{доп,ном}}$  на голые шины стандартных сечений приведены в таблицах 1.3.31, 1.3.35 [3] и в таблицах 7.3÷7.6 [9] при температуре окружающей среды +25 С

При отклонении температуры окружающей среды от нормированной +25°С необходимо произвести перерасчет допустимого тока  $I_{\text{доп}}$  для шин стандартного сечения по формуле

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп,ном}} \cdot \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{дл,доп}} - \vartheta_0}{\vartheta_{\text{дл,доп}} - \vartheta_{0,\text{норм}}}}, \quad (4.2)$$

где  $I_{доп,ном}$  - допустимый ток на шину при температуре окружающей среды  $\vartheta_{0,ном} = 25^{\circ}C$ . При расположении шин прямоугольного сечения площадь токи  $I_{доп,ном}$ , приведенные в таблице 1.3.31 [3] и в таблице 7.3 [9], должны быть уменьшены на 5% для шин с шириной полос до 60 мм и на 8% для шин с шириной полос более 60 мм [3];

$\vartheta_0$  - действительная температура окружающей среды;

$\vartheta_{дл,доп}$  - длительно допустимая температура нагрева шин, равная  $70^{\circ}C$ .

Выбранные по условию (4.1) шины проверяются на термическую и электродинамическую стойкость при коротких замыканиях.

Проверка шин на термическую стойкость при КЗ, согласно [2], производится по условию

$$\vartheta_{\kappa} \leq \vartheta_{\kappa,доп}, \quad (4.3)$$

где  $\vartheta_{\kappa}$  - конечная температура шин при КЗ;

$\vartheta_{\kappa,доп}$  - допустимая температура нагрева шин при КЗ, таблица 4.1.

Температура  $\vartheta_{\kappa}$  шины, до которой она нагревается током КЗ, определяется по кривым,  $\vartheta = f(A_{\vartheta})$  приведенным в [2] или на рисунке 4.1.

Значение вспомогательного коэффициента  $A_{\vartheta} = A_{\vartheta_{\kappa}}$  вычисляется по формуле:

$$A_{\vartheta_{\kappa}} = A_{\vartheta_n} + \frac{B_{\kappa}}{S^2}, \quad (4.4)$$

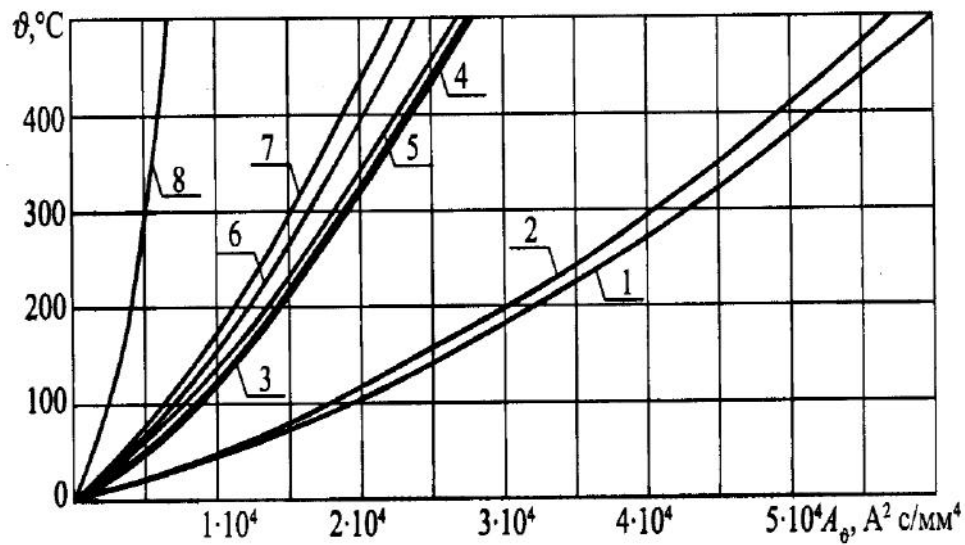
где  $A_{\vartheta_n}$  - определяется по кривым, рисунок 4.1, для температуры проводника  $\vartheta_n$ , которая соответствует нормальному режиму работы;

Таблица 4.1 – Допустимые температуры нагрева проводников

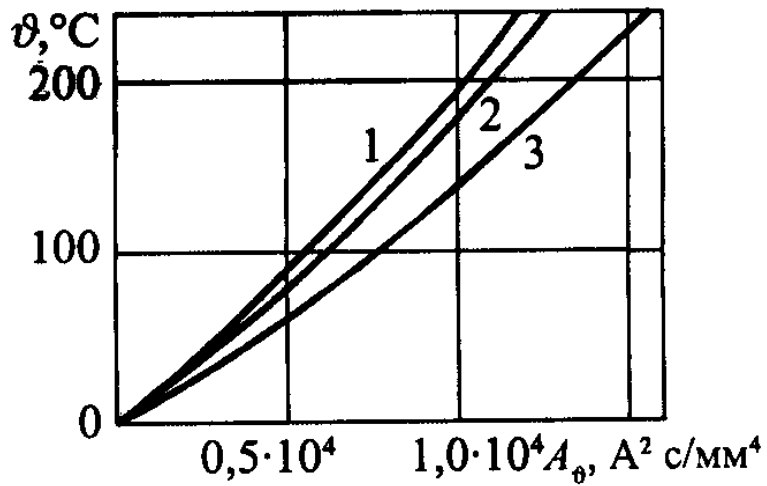
Вид и материал проводника	$\vartheta_{к, доп}$ , °C
Шины медные	300
Шины алюминиевые	200
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией с медными и алюминиевыми жилами напряжением до кВ:	
1	250
6-10	200
20-35	130
110-220	125
Кабели и изолированные провода с медными или алюминиевыми жилами и изоляцией из:	
поливинилхлоридного пластика или резины	160
полиэтилена (кабели напряжением до 35 кВ)	130
вулканизированного полиэтилена (кабели напряжением до 35 кВ)	250
Медные неизолированные провода при тяжениях, Н/мм <sup>2</sup> :	
менее 20	250
20 и более	200
Алюминиевые неизолированные провода при тяжениях, Н/мм <sup>2</sup> :	
менее 10	200
10 и более	160
Алюминиевая часть сталеалюминиевых проводов	200

$B_k$  - тепловой (термический) или квадратичный импульс тока КЗ в месте установки шин, А<sup>2</sup>с;

$S$  - сечение шины,  $\text{мм}^2$ .



а



б

а – материалы проводников: 1-ММ; 2-МТ; 3-АМ; 4-АТ; 5-АДО, АСТ; 6-АДЗ1Т1; 7-АДЗ1Т; 8-СтЗ;

б – материалы проводников: 1-АЖ, АЖКП; 2-АН, АНКП; 3-А, АСКП, АпКП, АС, АСКП, АСКС, АСК, АпС, АпСКС, АпСК.

Рисунок 4.1- Кривые для определения температуры нагрева проводов

Температура шины  $\vartheta_n$ , предшествующая режиму КЗ, определяется по выражению [10]:

$$g_n = g_0 + (g_{\text{дл, доп}} - g_{\text{0, норм}}) \left( \frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{доп, ном}}} \right)^2, \quad (4.5)$$

где  $I_{\text{макс}}$  - максимальный ток нагрузки.

Минимальное сечение шины, отвечающее требованиям термической стойкости, может быть определено по формуле

$$S_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{B_K}{A_{g_{\text{к, доп}}} - A_{g_n}}} = \frac{\sqrt{B_K}}{C}, \quad (4.6)$$

где  $C = \sqrt{A_{g_{\text{к, доп}}} - A_{g_{\text{ном}}}}$  - значение параметра следует брать из таблицы 4.2.

Таблица 4.2- Значение параметра  $C$  для жестких шин

Материал проводника	Значение $C, A \cdot c^{0.5} / \text{мм}^2$ , при $g_n, ^\circ C$		
	70	90	120
Медь	170	-	-
АДО	90	81	68
АД1Н	91	82	69
АДОМ, АД1М	92	83	70
АД31Т1	85	77	64
АД31Т	82	74	62
1911	71	63	53
1915, 1915Т	66	60	51

Сборные шины и ошиновка распределительных устройств электрических станций и подстанций должны обладать достаточной механической прочностью, чтобы противостоять механическим усилиям, возникающим при КЗ.

Динамическую стойкость любой шинной конструкции рассчитывают по наибольшему значению механического напряжения в шине  $\sigma_{\text{макс}}$  и наибольшему значению силы, действующей на головку изолятора  $F_{\text{изол}}$ .

Напряжение  $\sigma_{\text{макс}}$  в материале, однополосных шин, расположенных в одной плоскости, при трехфазном или двухфазном КЗ определяется согласно [2] по формуле:

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{макс}} \cdot l}{\lambda \cdot W} \cdot \eta, \quad (4.7)$$

где  $F_{\text{макс}}$  - максимальная сила, действующая на расчетную фазу при трехфазном или двухфазном КЗ, Н;

$l$  - длина пролета, м;

$W$  - момент сопротивления шины относительно оси, перпендикулярной действию усилия, м<sup>3</sup> (таблица 4.3);

$\lambda$  - коэффициент, зависящий от условия закрепления шин и числа пролетов, определяемый по [2] или по таблице 4.4;

$\eta$  - коэффициент динамической нагрузки шин и изоляторов, определяемый по кривым, приведенным в [2] или на рисунке 4.2.

Максимальная сила  $F_{\text{макс}}$ , действующая при трехфазном или двухфазном КЗ на расчетную фазу определяется по формулам

$$F_{\text{макс}}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \frac{(i_y^{(3)})^2}{a} \cdot k_{\phi} \cdot k_{\text{расч}}; \quad (4.8)$$

$$F_{\text{макс}}^{(2)} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot (i_y^{(2)})^2}{a} \cdot k_{\phi} \cdot k_{\text{расч}},$$

где  $a$  - расстояние между соседними фазами, м;

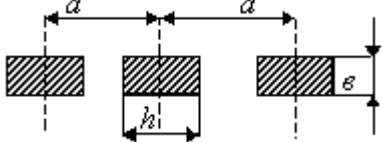
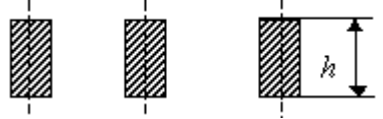
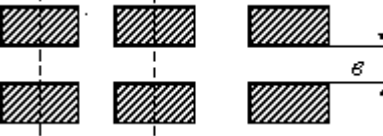
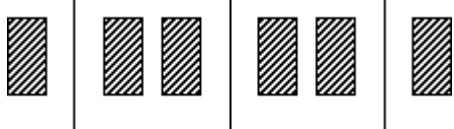

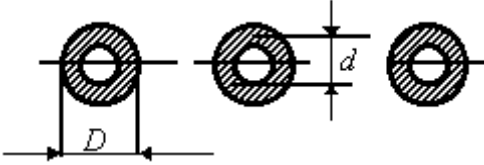
$i_y^{(3)}$  - ударный ток трехфазного КЗ, А;

$i_y^{(2)}$  - ударный ток двухфазного КЗ, А;

$l$  - длина пролета, м;

$k_{\phi}$  - коэффициент формы шины прямоугольного сечения определяемый по кривым рисунка 4.3. Если расстояние в свету между проводниками прямоугольной формы больше периметра поперечного

Таблица 4.3 - Моменты сопротивления и инерции шин

Расположение шин	Момент инерции $J$ , м <sup>4</sup>	Момент сопротивления $W$ , м <sup>3</sup>
	$\frac{b \cdot h^3}{12}$	$\frac{b \cdot h^2}{6}$
	$\frac{h \cdot b^3}{12}$	$\frac{h \cdot b^2}{6}$
	$\frac{b \cdot h^3}{6}$	$\frac{b \cdot h^2}{3}$
	$\frac{h \cdot b^3}{6}$	$\frac{h \cdot b^2}{3}$
	$\frac{\pi \cdot d^4}{64}$	$\frac{\pi \cdot d^3}{32}$
	$\frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot D}$

сечения токоведущей части, т.е.  $a > 2 \cdot (b \cdot h)$ , то  $k_\phi = 1$ . Для шин корытного сечения с высотой сечения  $h \geq 0,1$  м коэффициент формы шин  $k_\phi = 1$ , при  $h = 0,6$  м коэффициент формы  $k_\phi = 1,1$ , а при  $h = 0,8$  м коэффициент формы  $k = 1,06$ . Для проводников кольцевого сечения и круглых проводников сплошного сечения коэффициент формы  $k_\phi = 1$ ;

$k_{расн}$  - коэффициент, зависящий от взаимного расположения шин

определяемый по [2] или таблице 4.5.

Расчетная фаза зависит от взаимного расположения шин, таблица 4.4.

Таблица 4.4- Расчетные схемы шинных конструкций

Расчетная схема	Тип балки	Коэффициенты		
		$\lambda$	$\beta$	$r_1$
	Балка с одним пролетом	8,00	1,00	3,14
	Балка с двумя пролетами	8,00	1,25	3,93
	Балка с тремя и более пролетами			
	для крайних пролетов	10,00	1,13	4,73
	для средних пролетов	12,00	1,00	4,73

Для определения динамического коэффициента  $\eta$ , необходимо рассчитать частоту собственных колебаний шины  $f_1$  и определить отношение  $f_1/f_c$ , где  $f_c = 50$  Гц.

Частота собственных колебаний шины определяется согласно [2] по формуле

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}, \quad (4.9)$$

где  $r_1$  - параметр основной собственной частоты шины, который зависит от типа шинной конструкции и определяется по таблице 4.4;

$E$  - модуль упругости материала шин (таблица 4.6), Па;

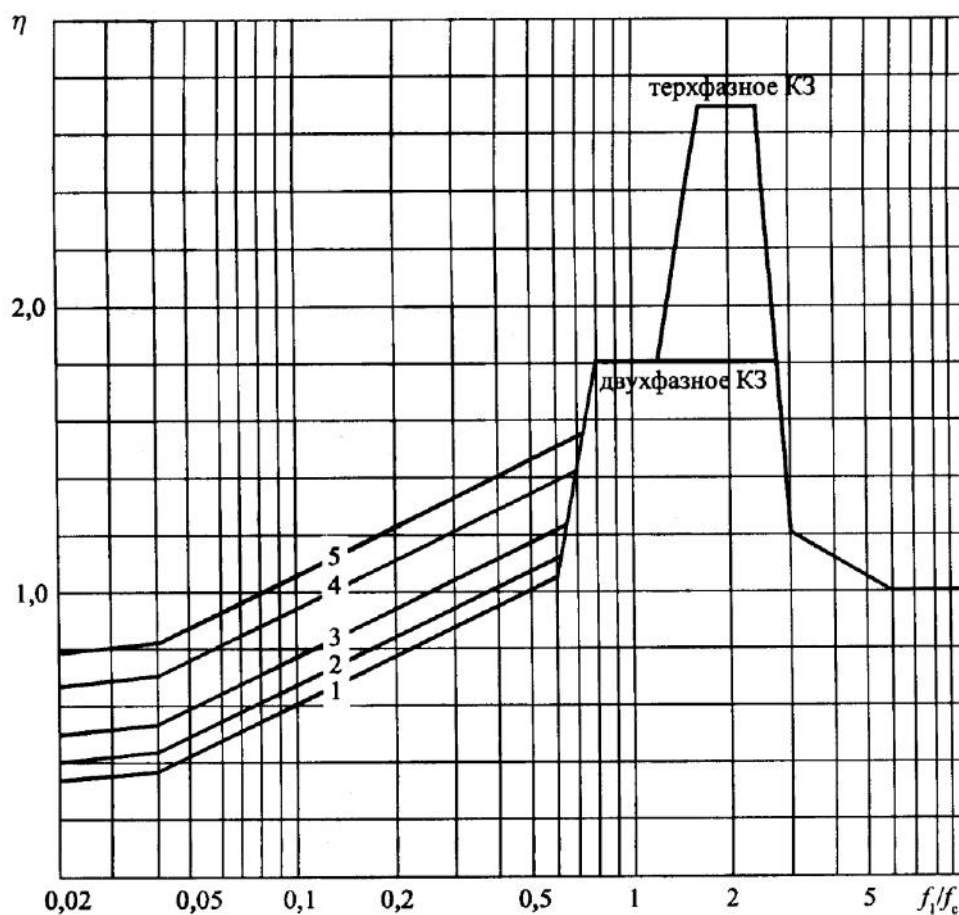
$J$  - момент инерции поперечного сечения шины определяемый по

формулам таблицы 4.3,  $\text{м}^4$ ;

$m = \delta \cdot S$  - масса шины на единицу длины,  $\text{кг/м}$ ;

$\delta$  - плотность материала шины,  $\text{кг/м}^3$ , таблица 4.6;

$S$  - поперечное сечение шины,  $\text{м}^2$ .



1— при  $k_y \geq 1,60$ ; 2— при  $k_y = 1,40$ ; 3— при  $k_y = 1,25$ ; 4— при  $k_y = 1,10$ ;

5 — при  $k_y = 1,00$

Рисунок 4.2- Зависимость коэффициента динамической нагрузки от частоты собственных колебаний шины.

Однополосные шины механически прочны, если

$$\sigma_{\text{макс}} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (4.10)$$

где  $\sigma_{доп}$  - допустимое механическое напряжение в материале шин, таблица 4.6.

Если условие (4.10) не выполняется, то необходимо определить допустимую длину пролета по формуле

$$l_{доп} = l \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{доп}}{\sigma_{макс}}} \quad (4.11)$$

и повторить расчет.

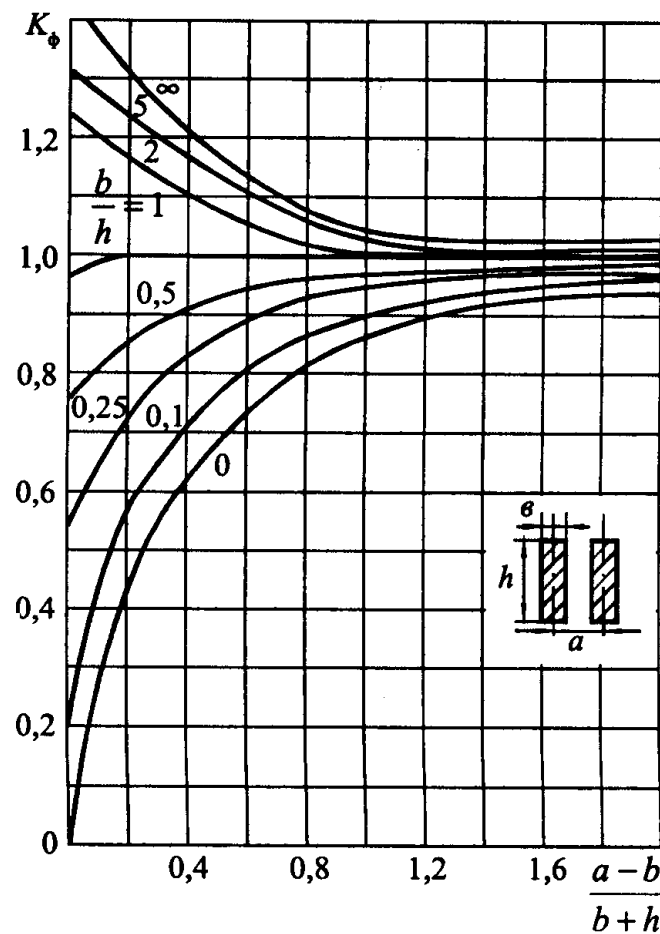


Рисунок 4.3-Диаграмма для определения коэффициента формы проводников прямоугольного сечения

При расчете двухполосных шин необходимо определять две составляющие механического напряжения в материале:  $\sigma_\phi$  от взаимодействия пакетов разных фаз и  $\sigma_n$  от взаимодействия полос

внутри одного пакета.

Двухполосные шины механически прочны, если

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\phi} + \sigma_n \leq \sigma_{\text{доп}}. \quad (4.12)$$

Таблица 4.5- Значения коэффициента  $k_{\text{расп}}$

Расположение шин	Расчетная фаза	Значения коэффициента $k_{\text{расп}}$ для нагрузок			
		результатирующей	изгибающей	растягивающей	сжимающей
В одной плоскости (рисунок 4.4)	В	1,00	1,00	0	0
По вершинам равностороннего треугольника (рисунок 4.6,а)	А, С	1,00	0,94	0,25	0,75
	В	1,00	0,50	1,00	0
По вершинам прямоугольного треугольника (рисунок 4.6,б)	А	0,87	0,87	0,29	0,87
	В	0,95	0,43	0,83	0,07
	С	0,95	0,93	0,14	0,43
По вершинам равностороннего треугольника (рисунок 4.6,в)	А, В, С	1,00	0,50	1,00	0

Напряжение в материале шин от взаимодействия пакетов различных фаз  $\sigma_\phi$  определяется по формуле (4.7).

Таблица 4.6-Характеристики материалов шин

Материал шины	Марка	Временное сопротивление разрыву $\sigma_p$ , МПа		Допустимое напряжение $\sigma_{доп}$ , МПа		Модуль упругости $E \cdot 10^{10}$ , Па	Плотность материала $\delta$ , кг/м <sup>3</sup>
		материала	сварного шва	материала	сварного шва		
Алюминий	АО, А	118	118	82	82	7	2710
	АДО	59-69	59-69	41-48	41-48	7	2710
Алюминиевый сплав	АД31Т	127	120	89	84	7	2710
	АД31Т1	196	120	137	84	7	2710
	АВТ1	304	152	213	106	7	2700
	1915Т	353	318	247	223	7	2700
Медь	МГМ	245-	-	171,5	-	10	8900
		255		-178			
	МГТ	245-294		171,5-206	-	10	8900

Механическое напряжение в материале шин от взаимодействия полос пакета  $\sigma_n$ , определяется согласно [2] по формуле

$$\sigma_n = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot l_n^2 \cdot k_\phi}{\lambda \cdot a_n \cdot W_n} \cdot \left( \frac{i_y}{n} \right)^2 \cdot \eta_n, \quad (4.13)$$

где  $l_n$  - расстояние между прокладками (рисунок 4.4), м;

$a_n$  - расстояние между осями шин пакета (рисунок 4.4), м;

$i_y$  - ударный ток трехфазного или двухфазного КЗ, А;

$W_n$  - момент сопротивления полосы пакета относительно оси, перпендикулярной к направлению действия силы, м<sup>3</sup>;

$n$  - число полос в пакете фазы;

$\eta_n$  - коэффициент динамической нагрузки, который зависит от основной частоты собственных колебаний шин пакета  $f_{1n}$  и определяется по кривым рисунка 4.2.

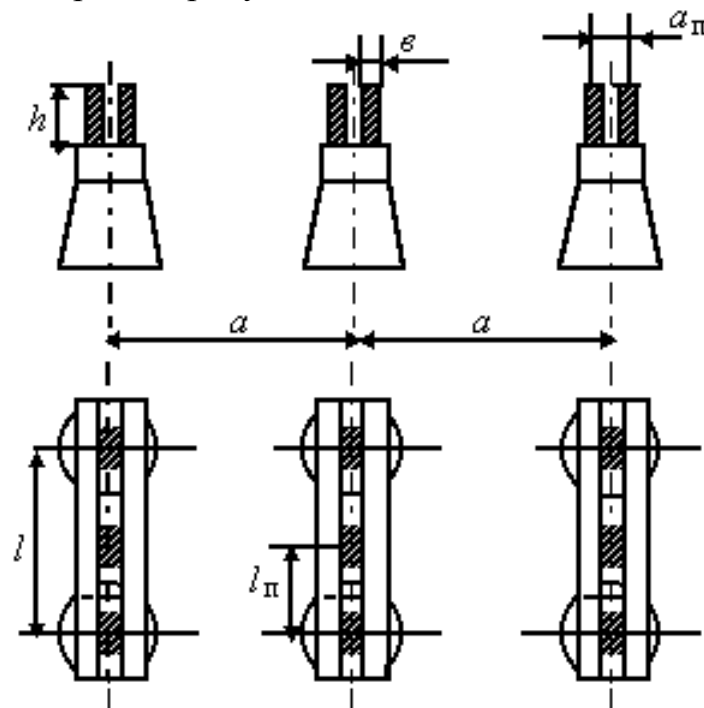


Рисунок 4.4 – Двухполосная шина

Основная частота собственных колебаний шин пакета в соответствии с [2] определяется по формуле

$$f_{1n} = \frac{4,73^2}{2 \cdot \pi \cdot l_n^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_n}{m_n}}, \quad (4.14)$$

где  $J_n$  - момент инерции поперечного сечения шины пакета, м<sup>4</sup>;

$l_n$  - расстояние между прокладками, м;

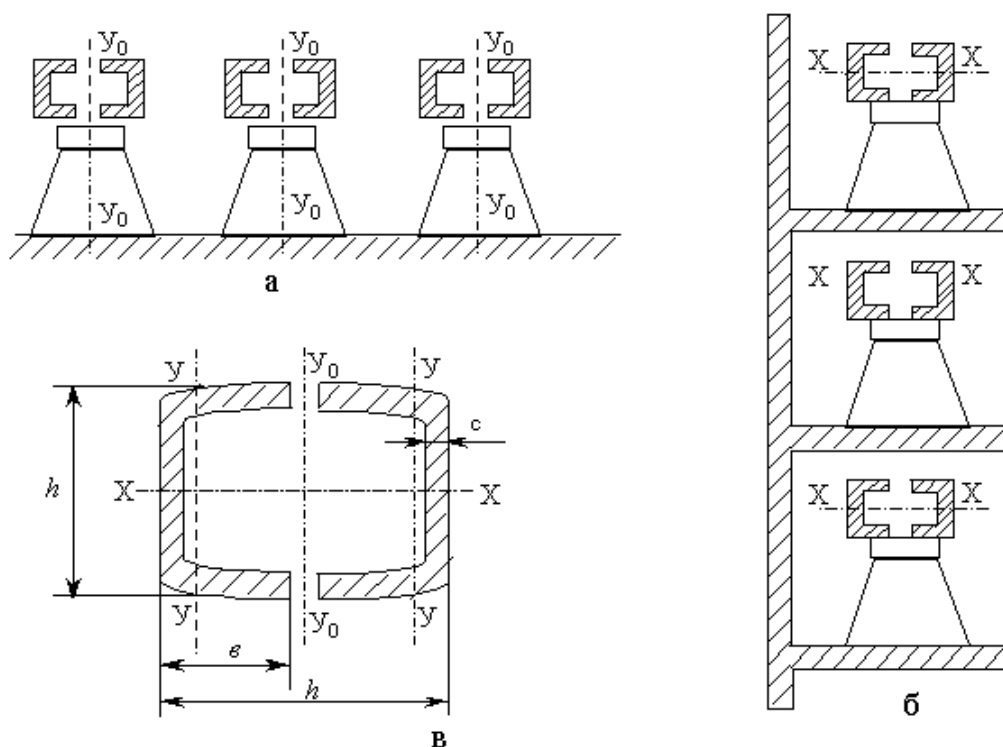
$m_n$  - масса шины пакета на единицу длины, кг/м.

Если шины распределительного устройства выполняются из шин коробчатого сечения, то механическое напряжение в материале шин от взаимодействия фаз определяется по (4.7) с учетом расположения шин.

При расположении шин в горизонтальной плоскости, рисунок 4.5, а, и соединении швеллеров между собой жестко,  $W = W_{y_0-y_0}$ . При отсутствии жесткого соединения  $W = 2 \cdot W_{y-y}$ .

При расположении шин в вертикальной плоскости, рисунок 4.5,б,  $W = 2 \cdot W_{x-x}$ .

Значения  $W_{y-y}$ ,  $W_{y_0-y_0}$  и  $W_{x-x}$  берутся из таблицы 7.6 [9].



а — горизонтальное расположение; б — вертикальное расположение; в — сечение коробчатой шины

Рисунок 4.5 - Эскиз расположения шин коробчатого сечения

Механическое напряжение  $\sigma_n$  в материале шин от

взаимодействия между швеллерами одной фазы определяется по выражению (4.13).

Шины коробчатого сечения механически прочны, если выполняется условие (4.12).

Если условие (4.12) не соблюдается, то необходимо уменьшить  $\sigma_\phi$  или  $\sigma_n$ , уменьшив при этом, соответственно,  $l$ , или  $l_n$ .

Величина пролёта  $l$  определяется конструкцией распределительного устройства, а величину  $l_n$  можно изменять, увеличивая число прокладок в пролете, если швеллеры не соединены жестко по всей длине.

В том случае если сборные шины распределительных устройств располагаются по вершинам треугольника, рисунок 4.6, максимальное механическое напряжение в материале шин  $\sigma_{\max}$  определяется по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{F_{\max} \cdot l}{\lambda \cdot W} \cdot \eta \cdot \zeta_\sigma, \quad (4.15)$$

где  $W$  - меньший из двух моментов сопротивлений поперечного сечения шины  $W_y$  или  $W_x$ , м<sup>3</sup>;

$F_{\max}$  - электродинамические силы, определяемые по (4.7) или (4.8);

$\zeta_\sigma$  - коэффициент, значение которого для шинных конструкций расположенных по вершинам треугольников приведено в [2] и в таблице 4.7.

Жесткие шины распределительных устройств закрепятся на опорных изоляторах, которые выбираются из условий

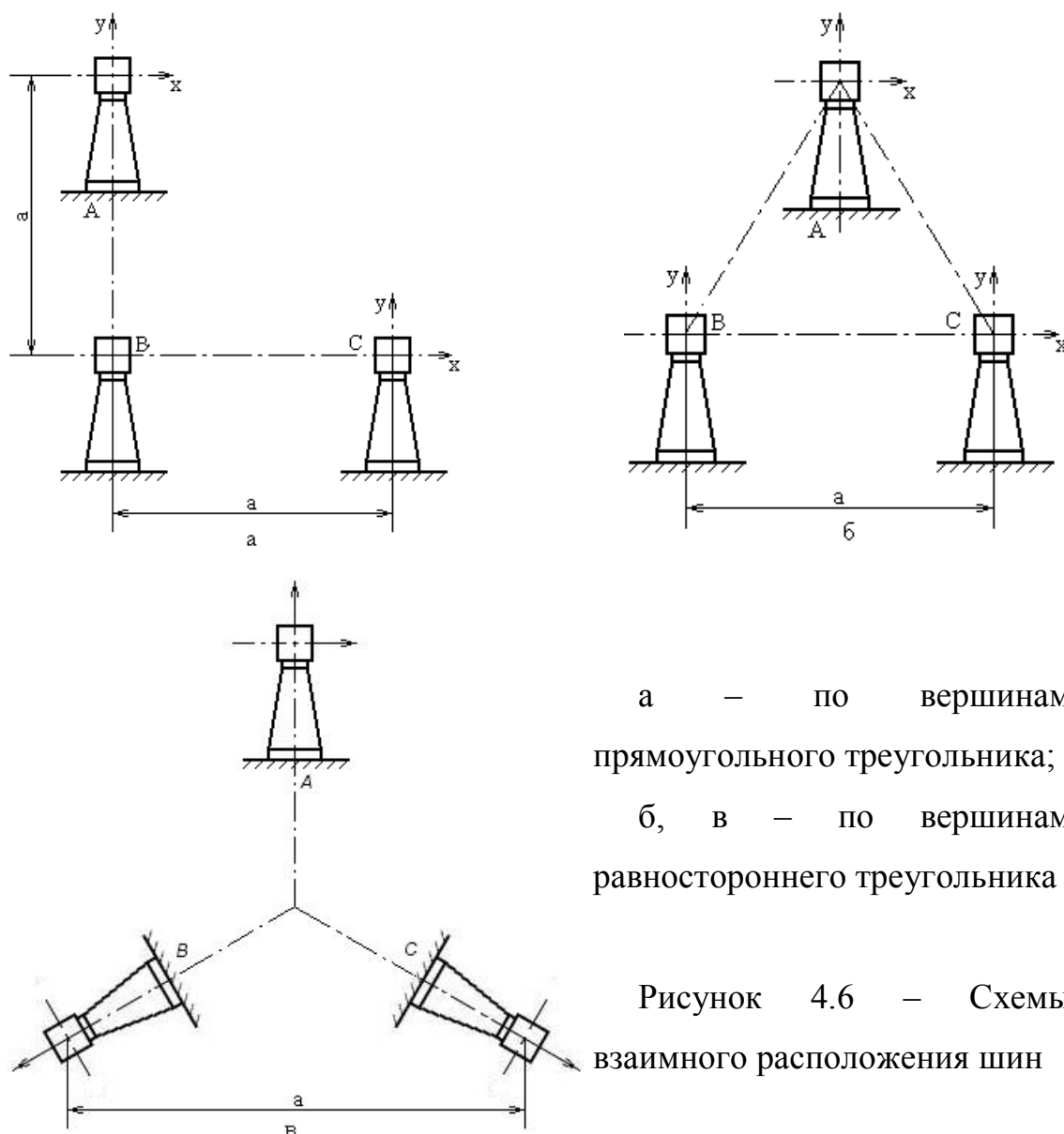
$$U_{уст} \leq U_{ном}; \quad F_{расч} \leq F_{доп}, \quad (4.16)$$

где  $U_{уст}$  – номинальное напряжение установки;

$U_{ном}$  – номинальное напряжение изолятора;

$F_{расч}$  – сила, действующая на изолятор;

$F_{дон}$  – допустимая нагрузка на головку изолятора.



При расположении сборных шин в горизонтальной или вертикальной плоскости расчетная нагрузка, действующая на изоляторы, обладающие высокой жесткостью, определяется по выражению [2]:

$$F_{расч} = \beta \cdot F_{макс} \cdot \eta, \quad (4.17)$$

где  $\beta$  - коэффициент, зависящий от условия крепления шин, а также числа пролетов конструкции с неразрезанными шинами и определяется по таблице 4.4;

Таблица 4.7 –Значения коэффициентов  $\zeta_{\sigma}$  и  $\zeta_F$  шинных конструкций, расположенных по вершинам треугольника

Расположение шин	Коэффициент $\zeta_F$	Коэффициент $\zeta_{\sigma}$	
		Шины круглого и кольцевого сечения	Шины квадратного сечения
По вершинам прямоугольного треугольника (рисунок 4.6,а)	0,95	0,95	1,16
По вершинам равностороннего треугольника (рисунок 4.6,б)	1,00	1,00	1,39
По вершинам равностороннего треугольника (рисунок 4.6,в)	1,00	1,00	1,21

$F_{макс}$  - максимальная сила, возникающая в многопролетной шине при трехфазном или двухфазном КЗ, Н;

$\eta$  - коэффициент динамической нагрузки, определяемый по

кривым рисунка 4.2.

Максимальная нагрузка, действующая на проходные изоляторы при КЗ, определяется по формуле

$$F_{расч} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} \cdot l_{np} \cdot (i_y^{(3)})^2 \cdot k_\phi \cdot k_{расч} \cdot \eta, \quad (4.18)$$

где  $l_{np}$  - расстояние от торца проходного изолятора до ближайшего опорного изолятора фазы, м.

Максимальная нагрузка, действующая на опорные и проходные изоляторы, при расположении шин по вершинам треугольника в соответствии с [2] определяется по формуле

$$F_{расч} = F_{макс} \cdot \eta \cdot \zeta_F, \quad (4.19)$$

где  $F_{макс}$  - максимальная сила, действующая на изоляторы при трехфазном или двухфазном КЗ, которая определяется по формулам (4.8);

$\zeta_F$  - коэффициент, значение которого приведено в таблице 4.7, для наиболее распространенных типов шинных конструкций.

Допустимая нагрузка, действующая на опорный изолятор,  $F_{доп}$  определяется по формуле

$$F_{доп} = 0,6 \cdot F_{разр} \cdot \frac{H_{из}}{H_{из} + 0,5 \cdot h}, \quad (4.20)$$

где  $F_{разр}$  - минимальная разрушающая сила на изгиб изолятора, задаваемая заводом-изготовителем, Н;

$H_{из}$  - высота изолятора, рисунок 4.7, мм;

$h$  - высота шины, мм.

Для соединения выводов мощных турбогенераторов с

повышающими трансформаторами на блочных электростанциях согласно [11] обязательно применение экранированных токопроводов. Рекомендуется применение экранированных токопроводов и на станциях с поперечными связями. На ТЭЦ, экранированные токопроводы, используются в пределах машинного зала, т.е. для соединения выводов турбогенераторов с шинами генераторного распределительного устройства (ГРУ), и на открытой части, если повышающий трансформатор расположен не более чем в 15 метрах от машинного зала.

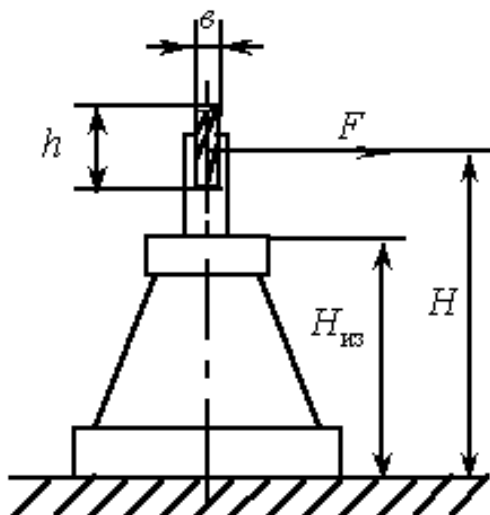


Рисунок 4.7 – К определению допустимых нагрузок на изоляторы

Экранированные токопроводы выбираются по номинальному напряжению и номинальному току генератора и проверяются на электродинамическую стойкость. Условия выбора и проверки экранированных токопроводов имеют вид:

$$U_{уст} \leq U_{ном}; \quad I_{раб, макс} \leq I_{ном}; \quad i_y \leq i_{дин}.$$

Характеристики пофазно экранированных токопроводов генераторного напряжения приведены в таблице 4.8.

Для соединения рабочих источников собственных нужд со шкафами комплектных распределительных устройств (КРУ), а также для цепей резервных источников собственных нужд 6 кВ

предназначены комплектные токопроводы напряжением 6 - 10 кВ [5]. Эти токопроводы выпускаются как с разделенными, так и неразделенными фазами.

Токопроводы с разделенными фазами применяются для ввода от рабочих источников собственных нужд до вводов КРУ собственных

Таблица 4.8 - Технические данные пофазно экранированных токопроводов генераторного напряжения.

Параметры турбогенератора	ТЭКН-П-24 -30000-560	ТЕКН-П-24 -24000-560	ТЕКН-Е-20- 20000-560	ТЕКН-Е-20- 12500-400
Тип турбогенератора	ТВВ-1000	ТВВ-800	ТВВ-500 ТГВ-500	ТВВ-320-2 ТГВ-300
Номинальное напряжение, кВ:				
Турбогенератора	24	24	20	20
токопровода	24	24	20	20
Номинальный ток, А:				
Турбогенератора	26700	21400	17000	10200
токопровода	30000	24000	20000	12500
Электродинамическая стойкость, кА	560	560	560	400

Параметры турбогенератора	ТЭКН-П-24-30000-560	ТЕКН-П-24-24000-560	ТЕКН-Е-20-20000-560	ТЕКН-Е-20-12500-400
Тип применяемого трансформатора напряжения	ЗНОЛ.06-24	ЗОМ-1/24; ЗНОМ-24; ЗНОЛ.06.24	ЗОМ-1/20; ЗНОМ-20 ЗНОЛ.06-24	ЗОМ-1/20; ЗНОМ-20
Тип встраиваемого трансформатора тока	ТШВ-24-30000/5	ТШВ-24-30000/5	ТШВ-24-24000/5	ТШВ-20-12000/5
Тип опорного изолятора	ОФР-24-750 кр	ОФР-24-750 кр	ОФР-24-750 кр	ОФР-20-500
Шаг между изоляторами, мм	3000	3000	3000	3000
Токоведущая шина $d \times S$ , мм	650×15	650×15	650×15	420×15
Экран $D \times \delta$ , мм	1160×7	1160×7	1160×7	870×5
Междуфазное расстояние, мм	1400-1500	1400-1500	1400-1500	1200
Предельная длина секции, м	6,5	6,5	6,5	6,5

Параметры турбогенератора	ТЭКН-Е20-10000-300	ТЭН-Е-20-11200-400	ГРТЕ-20-10000-300	ГРТЕ-10-8550-250
Тип турбогенератора	ТВВ-200-2; ТГВ-200; ТВВ-220-2	ТВВ-320-2; ТГВ-300	ТВВ-160-2; ТВВ-200-2; ТГВ-200;	ТВФ-63; ТВФ-120-2
Номинальное напряжение, кВ:				
турбогенератора	15,75	20	15,75; 18	6,3; 10,5
токопровода	20	20	20	10
Номинальный ток, А				
турбогенератора	8625; 9490	10200	8625; 9490; 6040	7210; 4330; 6875
токопровода	1000	11200	10000	5140; 8550
Электродинамическая стойкость, кА	300	400	300	250
Тип применяемого трансформатора напряжения	ЗОМ-1/15; ЗНОМ-15	ЗОМ-1/20 ЗНОМ-20	ЗОМ1/15 (18) ЗНОМ-15 (18)	ЗОМ-1/6 (10) ЗНОМ-6 (10)
Тип встраиваемого трансформатора тока	ТШ-20-10000/5; ТШЛ-20Б-10-10000/5/5	ТШ-20-12000/5	ТШ-20-10000/5; ТШЛ-20Б-1-10000/5/5	ТШ-20-10000/5; ТШВ-15Б-8000/5/5

Параметры турбогенератора	ТЭЖН-Е20-10000-300	ТЭН-Е-20-11200-400	ГРТЕ-20-10000-300	ГРТЕ-10-8550-250
Тип опорного изолятора	ОФР-20-500	ОФР-20-750	ОФР-20-375с	ОФР-20-375с
Шаг между изоляторами, мм	3000	5000-8000	2500-3000	2500-3000
Токоведущая шина $d \times S$ , мм	280×15	420 × 10	280 × 15; 280 × 12; 280 × 8	280 × 12; 280 × 8
Экран $D \times \delta$ , мм	670×4	890 × 5	750 × 64	750 × 4
Междуфазное расстояние, мм	1000	1280	1000; 1200	1000
Предельная длина секции, м	6,5	12	8	8

нужд, а токопроводы с неразделенными фазами применяются для цепей резервного питания.

В таблице 4.9 приведены основные технические данные комплектных токопроводов напряжением 6 - 10 кВ [9].

## 4.2 Примеры выбора шин закрытых распределительных устройств

**Пример 4.1** Выбрать сборные шины ГРУ-10, 5 кВ, токоведущие части от сборных шин до выводов генераторов и изоляторы к ним,

если известно  $T_{\text{max}} = 6500 \text{ ч}$ , среднемесячная температура наиболее жаркого месяца  $+30^\circ\text{C}$ ,  $P_{\text{с,ном}} = 63 \text{ МВт}$ ,  $\cos \varphi_{\text{с,ном}} = 0,8$ ,  $I_{\text{н,0,с}} = 30 \text{ кА}$ ,  $I_{\text{н,0,Σ}} = 70 \text{ кА}$ ,  $i_{\text{у,с}} = 78 \text{ кА}$ ,  $i_{\text{у,Σ}} = 165 \text{ кА}$ . К шинам ГРУ-10,5 кВ подключено три генератора.

Таблица 4.9 - Технические данные комплектных токопроводов напряжением 6 - 10 кВ

Параметры	ТЗК-6-1600-51	ТЗКР-6-1600-51	ТЗК-6-2000-81	ТЗКР-6-2000-81	ТЗК-10-1600-51
Номинальное напряжение, кВ	6	6	6	6	10
Номинальный ток, А	1600	1600	2000	2000	1600
Электродинамическая стойкость, кА	51	51	81	81	51
Сечение токоведущих шин из алюминия	Двутавр, площадь сечения 14600 мм <sup>2</sup>				
Расположение шин	По треугольнику				
исполнение токопровода					
с разделенными фазами	-	+	-	+	-
с неразделенными фазами	+	-	+	-	+
Предельная длина секции	Не более 12 м				

Параметры	ТЗК-10- 2000-125	ТЗК10- 3200- 125	ТЗК-6- 1600-81	ТЗКР-6- 1600-81	ТЗМЭ П-10 3150- 128
Номинальное напряжение, кВ	10	10	6	6	10
Номинальный ток, А	2000	3200	1600	1600	3150
Электродинамическая стойкость, кА	125	125	81	81	128
Сечение токоведущих шин из алюминия, мм	150×65× 7	150×80× 15	125×55 ×6,5	125×55× 6,5	Диа- метр 120 толщи- на 10
Расположение шин	По треугольнику				Гори- зонталь ное
исполнение токопровода					
с разделенными фазами	-	-	-	+	С пофаз- ными экра- нами
с нераздельными фазами	+	+	+	-	
Предельная длина секции, м	5,7		Не более 5		

Сборные шины и ошиновка, согласно ПУЭ, в пределах распределительного устройства выбираются по допустимому току.

Ток нормального режима согласно (1.1)

$$I_{\text{раб,ном}} = \frac{P_{\text{г,ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{г,ном}}} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,8} = 4330,1 \text{ A}.$$

Ток форсированного режима согласно (1.2)

$$I_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{г,ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot 0,95 \cdot \cos \varphi_{\text{г,ном}}} = \frac{63 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 0,95 \cdot 0,8} = 4558 \text{ A}.$$

Принимаем алюминиевые коробчатые шины марки АДЗ1Т,  $2 \times (125 \times 55 \times 6,5) \text{ мм}$  с  $S = 2740 \text{ мм}^2$  и  $I_{\text{доп,ном}} = 4640 \text{ A}$ . Шины расположены в горизонтальной плоскости с длиной пролета  $l = 2 \text{ м}$ , расстоянием между местами сварки швеллеров  $l_n = 1 \text{ м}$  и расстоянием между фазами  $a = 0,8 \text{ м}$ .

Так как температура окружающей среды отличается от нормированной температуры, то необходимо определить допустимый ток для шины по выражению (4.2)

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{доп,ном}} \cdot \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{дл,доп}} - \vartheta_0}{\vartheta_{\text{дл,доп}} - \vartheta_{0,\text{норм}}}} = 4640 \cdot \sqrt{\frac{70 - 30}{70 - 25}} = 4374,6 \text{ A}.$$

Так как  $I_{\text{макс}} = 4558 \text{ A} > I_{\text{доп}} = 4374,6 \text{ A}$ , то выбранные шины по условию нагрева в форсированном режиме работы не проходят, поэтому выбираем коробчатые шины размером  $2 \times (150 \times 65 \times 7) \text{ мм}$  с поперечным сечением  $S = 3570 \text{ мм}^2$  и  $I_{\text{доп,ном}} = 5650 \text{ A}$ .

$$I_{\text{доп}} = 5650 \cdot \sqrt{\frac{70 - 30}{70 - 25}} = 5326,99 \text{ A}.$$

Так как  $I_{\text{доп}} = 5326,99 \text{ A} > I_{\text{макс}} = 4558 \text{ A}$ , то шины проходят по условию нагрева в форсированном режиме.

Проверим выбранные шины на термическую стойкость. Для

этого по формуле (4.5) определим температуру шин до КЗ:

$$\vartheta_n = \vartheta_0 + (\vartheta_{\text{дл,доп}} - \vartheta_{0,\text{норм}}) \cdot \left( \frac{I_{\text{макс}}}{I_{\text{доп,ном}}} \right)^2 = 30 + (70 - 25) \cdot \left( \frac{4558}{5650} \right)^2 = 59,3^\circ \text{C}.$$

По кривой 7, рисунка 4.1, а, для начальной температуры  $\vartheta_n = 59,3^\circ \text{C}$  находим  $A_{\vartheta_n} = 0,4 \cdot 10^4 \text{ A}^2 \cdot \text{с} / \text{мм}^4$ .

По формуле (4.4) определяем значение вспомогательного коэффициента  $A_{\vartheta_k}$

$$A_{\vartheta_k} = A_{\vartheta_n} + \frac{B_k}{S^2},$$

где  $B_k$  - термический (тепловой) импульс тока КЗ в месте установки шин, который при времени отключения тока КЗ  $t_{\text{отк}} = 4 \text{ с} \geq 3 \cdot T_{a,z} = 3 \cdot 0,2 = 0,6 \text{ с}$  определяется по формуле (1.19);

$t_{\text{отк}}$  - время прохождения тока КЗ, которое в соответствии с ПУЭ в цепях генераторов мощностью 63 МВт и более принимается равным 4 с;

$T_{a,z}$  - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ от генераторов, которая для турбогенераторов мощностью 63 МВт принимается равной в пределах (0,16-0,25) с.

Определим термический импульс тока КЗ в месте установки шин

$$\begin{aligned} B_k = & \left( I_{n,0,z}^2 + 2 \cdot I_{n,0,c} \cdot I_{n,0,z} \cdot Q_{*k,z} + I_{n,0,z}^2 \cdot B_{*k,z} \right) \cdot t_{\text{отк}} + I_{n,0,c}^2 \cdot T_{a,c} + I_{n,0,z}^2 \cdot T_{a,z} + \\ & + \frac{4 \cdot I_{n,0,c} \cdot I_{n,0,z} \cdot T_{a,c} \cdot T_{a,z}}{T_{a,c} + T_{a,z}} = (40^2 + 2 \cdot 40 \cdot 30 \cdot 0,89 + 30^2 \cdot 0,82) \cdot 4 + 40^2 \cdot 0,075 + \\ & + 30^2 \cdot 0,2 + \frac{4 \cdot 40 \cdot 30 \cdot 0,075 \cdot 0,2}{0,075 + 0,2} = 18457,82 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}, \end{aligned}$$

где  $B_{*k,z}, Q_{*k,z}$  - определяются по кривым рисунка 1.1, при отношении

$$I_{*n,0,z} = \frac{I_{n,0,z}}{I_{\text{ном},z,\Sigma}} = \frac{30}{3 \cdot 4,33} = 2,31 \quad \text{и} \quad t_{\text{отк}} = 4 \text{ с}. \quad \text{В связи с тем, что кривые}$$

$B_{*K,2} = f(t_{отк})$  и  $Q_{*K,2} = f(t_{отк})$  приведены для моментов времени отключения тока КЗ от нуля до 0,5с, поэтому определяем их значения для момента времени  $t_{отк} = 0,5с$ .  $B_{*K,2} = 0,82$ ,  $Q_{*K,2} = 0,89$ .

$T_{a,c} = 0,05 \div 0,1с$  - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ от системы, связанной со сборными шинами 6-10кВ через трансформаторы связи мощностью 32-80 МВА.

$$A_{g_k} = 0,4 \cdot 10^4 + \frac{18457,82 \cdot 10^6}{3570^2} = 0,545 \cdot 10^4 A^2 \cdot с / мм^4.$$

По кривой 7, рисунка 4.1, для значения  $A_{g_k} = 0,545 \cdot 10^4 A^2 \cdot с / мм^4$  определяем конечную температуру шин  $g_k = 85^\circ C$ , что значительно меньше допустимой температуры для алюминиевых шин  $g_{дон} = 200^\circ C$ .

Для проверки выбранных шин на механическую прочность, определим по формулам (4.9) и (4.14) частоты собственных колебаний шины  $f_1$  и одной полосы пакета шин  $f_{1n}$ :

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}},$$

где  $r_1 = 4,73$  - соответствует расчетной схеме 3 таблица 4.4;

$l = 2 м$  - согласно заданию;

$E = 7 \cdot 10^{10} Па$  - модуль упругости алюминиевого сплава АД31Т, таблица 4.6;

$J = J_{y_0-y_0} = 1260 \cdot 10^{-8} м^4$  - момент инерции двух сращенных шин, таблица 7.6 [9];

$m = \delta \cdot S$  - масса шины на единицу длины, кг/м;

$\delta = 2710 кг / м^3$  - плотность материала шины, таблица 4.6;

$S = 3570 мм^2$  - поперечное сечение двух сращенных шин пакета, таблица 7.6 [9].

$$f_1 = \frac{4,73^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 2^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 1260 \cdot 10^{-8}}{2710 \cdot 3570 \cdot 10^{-6}}} = 268,92 \text{ Гц} .$$

$$f_{1n} = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l_n^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_n}{m_n}} ,$$

где  $l_n = 1 \text{ м}$  - расстояние между местами сварки швеллеров;

$m_n = \delta \cdot S_n$  - масса одной шины (полосы) пакета на единицу длины, кг/м;

$S_n = 1785 \text{ мм}^2$  - поперечное сечение одной шины, таблица 7.6 [9];

$J_n = J_{y-y} = 68,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4$  - момент инерции одной шины, таблица 7.6 [9].

$$f_{1n} = \frac{4,73^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 68 \cdot 10^{-8}}{2710 \cdot 1785 \cdot 10^{-6}}} = 353,4 \text{ Гц} .$$

Для отношений  $f_1 / f_c = 268,92 / 50 = 5,4$  и  $f_{1n} / f_c = 353,4 / 50 = 7,07$  по кривым рисунка 4.2 имеем  $\eta = 1$ ,  $\eta_n = 1$ .

Механическое напряжение в материале шинной конструкции от взаимодействия токов разных фаз  $\sigma_\phi$ , определяется по формуле (4.7)

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{макс}} \cdot l}{\lambda \cdot W} \cdot \eta ,$$

где  $F_{\text{макс}}$  - максимальная сила, действующая на расчетную фазу при трехфазном или двухфазном КЗ, Н;

$l$  - длина пролета, м;

$W = W_{y_0-y_0}$  - момент сопротивления двух сращенных шин, таблица 7.6 [9]. Для принятого сечения шин  $W_{y_0-y_0} = 167 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ;

$\eta$  - коэффициент динамической нагрузки сращенных шин;

$\lambda$  - коэффициент, зависящий от условия закрепления шин и числа пролетов, определяемый по [2] или по таблице 4.4.

Определим максимальную силу, действующую на расчетную фазу при трехфазном КЗ по формуле (4.8)

$$F_{\text{макс}}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \frac{(i_y^{(3)})^2}{a} \cdot k_{\phi} \cdot k_{\text{расч}},$$

где  $a$  - расстояние между соседними фазами, м;

$i_y^{(3)}$  - ударный ток трехфазного КЗ, А;

$l$  - длина пролета, м;

$k_{\phi}$  - коэффициент формы шины, который для шин корытного сечения при  $h \geq 0,1 \text{ м}$  принимается равным 1;

$k_{\text{расч}}$  - коэффициент, зависящий от взаимного расположения шин определяемый по [2] или таблице 4.5.

$$F_{\text{макс}}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot \frac{2 \cdot 165^2 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 1}{0,8} = 11788,77 \text{ Н}.$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{11788,77 \cdot 2 \cdot 1}{12 \cdot 167 \cdot 10^{-6}} = 11,77 \text{ МПа}.$$

Механическое напряжение в материале шинной конструкции от взаимодействия между швеллерами одной фазы  $\sigma_n$ , определяем по формуле (4.13)

$$\sigma_n = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot l_n^2 \cdot k_{\phi}}{\lambda \cdot a_n \cdot W_n} \cdot \left( \frac{i_y}{n} \right)^2 \cdot \eta_n,$$

где  $l_n$  - расстояние между прокладками, м;

$a_n$  - расстояние между осями шин пакета, которое обычно равно высоте шины корытного сечения, м;

$i_y$  - ударный ток трехфазного КЗ, А;

$W_n = W_{y-y}$  - момент сопротивления полосы пакета,  $\text{м}^3$ . Для принятого сечения шин  $W_{y-y} = 14,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ ;

$n$  - число полос в пакете фазы;

$\eta_n$  - коэффициент динамической нагрузки, который зависит от основной частоты собственных колебаний шин пакета  $f_{1n}$  и определяется по кривым рисунка 4.2.

$$\sigma_n = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 1^2 \cdot 1 \cdot 1}{12 \cdot 0,2 \cdot 14,7 \cdot 10^{-6}} \cdot \left( \frac{165 \cdot 10^3}{2} \right)^2 = 38,58 \text{ МПа}.$$

Суммарное механическое напряжение в шинной конструкции

$$\sigma_{\text{макс}} = \sigma_{\phi} + \sigma_n = 11,77 + 38,58 = 50,35 \text{ МПа}.$$

Выбранные шины удовлетворяют условию электродинамической стойкости, так как  $\sigma_{\text{макс}} = 50,35 \text{ МПа} < \sigma_{\text{доп}} = 89 \text{ МПа}.$

Для крепления шин в ГРУ принимаем опорные изоляторы типа ИО-10-3,75УЗ, таблица 5.7 [9]. Высота изолятора  $H_{\text{из}} = 120 \text{ мм}.$

Максимальная сила, действующая на изолятор при трехфазном КЗ, определяется по формуле (4.17)

$$F_{\text{расч}} = \beta \cdot F_{\text{макс}} \cdot \eta,$$

где  $\beta$  - коэффициент, зависящий от условия крепления шин, а также числа пролетов конструкции с неразрезанными шинами и определяется по таблице 4.4;

$F_{\text{макс}}$  - максимальная сила, возникающая в многопролетной шине при трехфазном или двухфазном КЗ, Н;

$\eta$  - коэффициент динамической нагрузки, определяемый по кривым рисунка 4.2.

$$F_{\text{расч}} = 1 \cdot 11788,77 \cdot 1 = 11788,77 \text{ Н}.$$

По таблице 5.7 [9] разрушающая нагрузка для выбранного изолятора составляет  $F_{\text{разр}} = 3750 \text{ Н}.$

Допустимая нагрузка, действующая на опорный изолятор,  $F_{\text{доп}}$

определяется по формуле (4.20)

$$F_{дон} = 0,6 \cdot F_{разр} \cdot \frac{H_{из}}{H_{из} + 0,5 \cdot h},$$

где  $F_{разр}$  - минимальная разрушающая сила на изгиб изолятора, задаваемая заводом-изготовителем, Н;

$H_{из}$  - высота изолятора, рисунок 4.7, мм;

$h$  - высота шины, мм.

$$F_{дон} = 0,6 \cdot 3750 \cdot \frac{0,12}{0,12 + 0,5 \cdot 0,15} = 1384,6 \text{ Н}.$$

Расчетная максимальная нагрузка на изоляторы

$$F_{расч} = 11788,77 \text{ Н} > F_{дон} = 1384,6 \text{ Н},$$

поэтому изолятор типа ИО-10-3,75У3 не удовлетворяет условию электродинамической стойкости.

Выбираем изолятор типа ИО – 10 - 30,00 У3 с  $F_{разр} = 30000 \text{ Н}$  и  $H_{из} = 154 \text{ мм}$ .

Для данного изолятора допустимая нагрузка составляет

$$F_{дон} = 0,6 \cdot 30000 \cdot \frac{0,154}{0,154 + 0,5 \cdot 0,150} = 12104,8 \text{ Н}.$$

Таким образом, изолятор типа ИО – 10 - 30,00 У3 проходит по условию электродинамической стойкости так как  $F_{расч} = 11788,77 \text{ Н} < F_{дон} = 12104,8 \text{ Н}$ .

В качестве проходного изолятора принимаем изолятор типа ИП - 10/5000 – 4250У2 с параметрами  $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ ,  $I_{ном} = 5000 \text{ А}$ ,  $F_{разр} = 42500 \text{ Н}$ .

Проверим проходной изолятор по формуле (4.18) на механическую прочность

$$F_{расч} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} \cdot l_{np} \cdot (i_y^{(3)})^2 \cdot k_{\phi} \cdot k_{расч} \cdot \eta ,$$

где  $l_{np}$  - расстояние от торца проходного изолятора до ближайшего опорного изолятора фазы, м.

$$F_{расч} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot (165 \cdot 10^3)^2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{0,8} = 5894,4 Н .$$

Так как  $F_{расч} = 5894,4 Н < F_{дон} = 0,6 \cdot 42500 = 25500 Н$  , то выбранный проходной изолятор проходит по механической прочности.

Ошиновка от сборных шин до разъединителя, от разъединителя до выключателя генератора и от выключателя до стены ГРУ выполняется жесткими шинами. Принимаем алюминиевые шины коробчатого сечения, размером  $2 \times (150 \times 65 \times 7) \text{ мм}$  с  $S = 3570 \text{ мм}^2$  и с  $I_{дон, ном} = 5650 \text{ А}$  , т.е. такие же, как и в ГРУ.

Ошиновка в цепи генератора термически стойка, так как

$$S_{мин} = \frac{\sqrt{B_{\kappa}}}{C} = \frac{\sqrt{18457,82 \cdot 10^6}}{82} = 1656,8 \text{ мм}^2 < S = 3570 \text{ мм}^2 .$$

Принимаем, что швеллеры шин соединены жестко в местах крепления шин на опорных изоляторах и в центре пролета, т. е.  $l_n = 1 \text{ м}$  . Так как на шины ошиновки действует механическое напряжение  $\sigma_{макс} = 50,35 \text{ МПа} < \sigma_{дон} = 89 \text{ МПа}$  , то выбранные шины механически прочны.

Для крепления шин ошиновки принимаем опорные и проходные изоляторы такого же типа, как и для шин ГРУ.

Между выводами генератора и фасадной стеной главного корпуса устанавливаем в соответствии с таблицей 4.8 комплектный экранированный токопровод типа ГРТЕ-10-8550-250.

Проверяем токопровод:

$$I_{\text{макс}} = 4558 \text{ A} < I_{\text{ном}} = 8550 \text{ A}; \quad i_{y,\Sigma} = 165 \text{ кА} < i_{\text{дин}} = 250 \text{ кА}.$$

**Пример 4.2** Выбрать шины собственных нужд 6,3 кВ, которые получают питание от трансформатора собственных нужд ТРДНС-32000/35. Расчетные токи КЗ:  $I_{n,0} = 18 \text{ кА}$ ,  $i_y = 48 \text{ кА}$ ,  $B_k = 64,8 \cdot 10^6 \text{ A}^2 \cdot \text{с}$ , температура окружающего воздуха  $\vartheta_0 = 25^\circ \text{C}$ . Длина пролета  $l = 2 \text{ м}$ .

Определяем ток нормального режима

$$I_{\text{раб,ном}} = \frac{S_{\text{ном,т}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{32000}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 6,3} = 1466,3 \text{ A}.$$

В соответствии с ПУЭ выбираем шины по допустимому току. Принимаем согласно, таблицы 7.3 [9] двухполосные алюминиевые шины марки АД31Т1 размером  $2 \times (80 \times 6) \text{ мм}$  с  $I_{\text{доп,ном}} = 1630 \text{ A}$ . Шины крепим плашмя. При таком креплении шин, согласно [3], допустимый ток составляет  $I_{\text{доп}} = 0,92 \cdot I_{\text{доп,ном}} = 0,92 \cdot 1630 = 1499,6 \text{ A}$ . Выбранные шины проходят по допустимому току, так как  $I_{\text{доп}} = 1499,6 \text{ A} > I_{\text{раб,ном}} = 1466,3 \text{ A}$ .

Проверим шины на термическую стойкость:

$$S_{\text{мин}} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = \frac{\sqrt{64,8 \cdot 10^6}}{91} = 88,5 \text{ мм}^2,$$

что меньше принятого сечения  $S = 960 \text{ мм}^2$ .

Для проверки шин на механическую прочность определим момент инерции и момент сопротивления поперечного сечения пакета шин и одной полосы (шины) в пакете.

$$J = \frac{b \cdot h^3}{6} = \frac{0,6 \cdot 8^3}{6} = 51,2 \text{ см}^4 = 51,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{3} = \frac{0,6 \cdot 8^2}{3} = 12,8 \text{ см}^3 = 12,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3;$$

$$J_n = \frac{\epsilon \cdot h^3}{12} = \frac{8 \cdot 0,6^3}{12} = 0,144 \text{ см}^4 = 0,144 \cdot 10^{-8} \text{ м}^4;$$

$$W_n = \frac{h \cdot \epsilon^2}{6} = \frac{8 \cdot 0,6^2}{6} = 0,48 \text{ см}^3 = 0,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Определим частоты собственных колебаний пакета шин  $f_1$  и одной шины  $f_{1n}$  по формулам (4.9) и (4.14)

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}} = \frac{4,73^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 2^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 51,2 \cdot 10^{-8}}{2,602}} = 104,53 \text{ Гц},$$

где  $m = \delta \cdot S = 2710 \cdot 960 \cdot 10^{-6} = 2,602 \text{ кг} / \text{м}$ .

$$f_{1,n} = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l_n^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J_n}{m_n}} = \frac{4,73^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 1^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 0,144 \cdot 10^{-8}}{1,301}} = 31,36 \text{ Гц},$$

где  $m_n = \delta \cdot S_n = 2710 \cdot 480 \cdot 10^{-6} = 1,301 \text{ кг} / \text{м}$ .

Для полученных значений  $f_1 / f_c = 104,53 / 50 = 2,09$  и  $f_{1n} / f_c = 31,36 / 50 = 0,627$  по кривым рисунка 4.2 определим коэффициенты динамической нагрузки  $\eta$  и  $\eta_n$ .  $\eta = 2,7$ , а  $\eta_n = 1,1$  при коэффициенте  $k_y = 1,4$ .

Максимальные напряжения в материале шин пакета, которые обусловлены взаимодействием токов разных фаз и токов шин одной фазы при  $l_n = 1 \text{ м}$ , в соответствии с формулами (4.7) и (4.13) равны

$$\sigma_\phi = \frac{F_{\text{макс}}^{(3)} \cdot l}{\lambda \cdot W} \cdot \eta = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot l^2 \cdot (i_y^{(3)})^2 \cdot k_\phi \cdot k_{\text{расн}}}{a \cdot \lambda \cdot W} \cdot \eta = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 2^2 \cdot 48^2 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,7}{0,8 \cdot 12 \cdot 12,8 \cdot 10^{-6}} = 35,08 \text{ МПа},$$

где  $k_\phi = 1$ , так как  $a = 0,8 \text{ м} > 2 \cdot (\epsilon + h) = 2 \cdot (0,006 + 0,08) = 0,172 \text{ м}$ .

$$\sigma_n = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot l_n \cdot k_\phi}{\lambda \cdot a_n \cdot W_n} \cdot \left( \frac{i_y}{n} \right)^2 \cdot \eta_n = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 1^2 \cdot 0,24}{12 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,48 \cdot 10^{-6}} \cdot \left( \frac{48 \cdot 10^3}{2} \right)^2 \cdot 1,1 = 440 \text{ МПа},$$

где  $k_\phi = 0,24$  - коэффициент, который определен по рисунку 4.3 при

отношениях  $\epsilon/h = 6/80 = 0,075$  и  $\frac{a_n - \epsilon}{\epsilon + h} = \frac{12 - 6}{6 + 80} \approx 0,07$ .

Поскольку  $\sigma_n = 440 \text{ МПа} > \sigma_{n, \text{дон}} = \sigma_{\text{дон}} - \sigma_{\phi} = 137 - 35,08 = 101,92 \text{ МПа}$ , то необходимо уменьшить расстояние между прокладками. Наибольшее расстояние между прокладками

$$l_{n, \text{макс}} = l_n \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{n, \text{дон}}}{\sigma_n}} = 1 \cdot \sqrt{\frac{101,92}{440}} = 0,482 \text{ м}.$$

Принимаем расстояние между прокладками  $l_n = 0,4 \text{ м}$ . В этом случае

$$f_1 = \frac{4,73^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,4^2} \cdot \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 0,144 \cdot 10^{-8}}{1,301}} \approx 196 \text{ Гц},$$

а  $\eta_n = 1,07$  при  $f_{1n} / f_c = 196 / 50 = 3,92$ .

$$\sigma_n = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,4^2 \cdot 0,24}{12 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,48 \cdot 10^{-6}} \cdot \left( \frac{48 \cdot 10^3}{2} \right)^2 = 64 \text{ МПа}.$$

Суммарное напряжение в материале шин

$$\sigma_{\text{макс}} = \sigma_{\phi} + \sigma_n = 35,08 + 64 = 99,08 \text{ МПа}.$$

Выбранные шины удовлетворяют условию электродинамической стойкости, так как

$$\sigma_{\text{макс}} = 99,08 \text{ МПа} < \sigma_{\text{дон}} = 137 \text{ МПа}.$$

Для крепления шин собственных нужд 6,3 кВ принимаем опорные изоляторы типа ИО-6-3,75 УЗ высотой  $H_{из} = 100 \text{ мм}$  и  $F_{\text{разр}} = 3750 \text{ Н}$ .

Расчетная нагрузка, действующая на опорный изолятор, определяется по формуле (4.17)

$$F_{\text{расч}} = \beta \cdot F_{\text{макс}} \cdot \eta = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{a} \cdot l \cdot (i_y^{(3)})^2 \cdot k_{\phi} \cdot k_{\text{расч}} \cdot \beta \cdot \eta = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot (48 \cdot 10^3)^2}{0,8} \times \\ \times 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2,7 = 2693,71 \text{ Н}.$$

Допустимая нагрузка при изгибе выбранного изолятора

согласно формуле (4.20) равна

$$F_{доп} = 0,6 \cdot F_{разр} \cdot \frac{H_{из}}{H_{из} + h/2} = 0,6 \cdot 3750 \cdot \frac{100}{100 + 18/2} = 2064,22 \text{ Н}.$$

$$F_{доп} = 2064,22 \text{ Н} < F_{расч} = 2693,71 \text{ Н},$$

т.е. расчетная нагрузка превышает допустимую нагрузку, поэтому изолятор типа ИО-6-3,75 УЗ не удовлетворяет условию электродинамической стойкости. Выбираем изолятор типа ИО-10-7,50 УЗ высота изолятора  $H_{из} = 120 \text{ мм}$ , а разрушающая нагрузка  $F_{разр} = 7500 \text{ Н}$ .

Для выбранного изолятора допустимая нагрузка равна

$$F_{доп} = 0,6 \cdot 7500 \cdot \frac{120}{120 + 18/2} = 4186,05 \text{ Н}.$$

При этом,  $F_{расч} = 2693,71 \text{ Н} < F_{доп} = 4186,05 \text{ Н}$  т.е. выбранный изолятор удовлетворяет условию электродинамической стойкости.

### **4.3 Выбор шин и токопроводов открытых распределительных устройств.**

#### **4.3.1 Общие сведения**

В открытых распределительных устройствах (ОРУ) напряжением 35 кВ и выше широко применяются гибкие шины и токопроводы, выполненные сталеалюминиевыми проводами. Основные параметры и характеристики сталеалюминиевых проводов приведены в таблице 7.35 [9]. Гибкие подвесные токопроводы выполняются из пучка голых алюминиевых проводов, закрепленных по окружности в кольцах-обоймах, подвешиваемых на двух несущих сталеалюминиевых проводах. Сечение отдельных проводов в пучке рекомендуется выбирать возможно большим, 500 мм<sup>2</sup> и более, так как

это уменьшает число проводов и стоимость токопровода.

Условия выбора и проверки гибких шин и токопроводов приведены в таблице 4.10.

Наряду с гибкими шинами в ОРУ в последнее время широко используют конструкции с жесткими шинами. Применение жестких шин позволяет создать более компактные и экономичные компоновки ОРУ. В качестве жестких шин применяются круглые трубчатые шины из алюминиевых сплавов, параметры которых приведены в таблице 4.11.

Условия выбора и проверки жестких шин и изоляторов ОРУ приведены в таблице 4.12 [12].

Таблица 4.10 - Условия выбора и проверки гибких шин и токопроводов.

Параметры	Условия проверки
Экономическое сечение (для токопроводов)	$S_{расч,э} = I_{расч,ном} / J_э$
Длительный допустимый ток	$I_{расч} \leq I_{доп}$
Термическая стойкость	$g_k \leq g_{доп}$ или $S_{мин} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} \leq S$
Электродинамическая стойкость	$F_{макс} \leq F_{доп}$ $a - 2 \cdot (s + r_p) \geq a_{доп,мин}$
Проверка на коронирование	$1,07 \cdot E \leq 0,9 \cdot E_0$

### 4.3.2 Выбор жестких шин открытых распределительных устройств

Выбор жестких шин ОРУ по условию нагрева в рабочем режиме производится по выражению (4.1). Длительно допустимые значения токов для трубчатых шин из алюминиевого сплава 1915Т, при температуре воздуха 25<sup>0</sup>С и нормальном атмосферном давлении, приведены в таблице 4.11.

Если допустимый ток продолжительного режима жестких шин ОРУ неизвестен, то он может быть определен по формуле

$$I_{дон} = \sqrt{\frac{Q_{\kappa} + Q_{\lambda} - Q_c}{r_g}}, \quad (4.21)$$

где  $Q_{\kappa} = 713 \cdot D^{0,75}$  – тепловой поток, обусловленный конвекцией, Вт;

$Q_{\lambda} = 1061 \cdot \varepsilon \cdot D$  – тепловой поток, обусловленный излучением, Вт;

$Q_c = A_c \cdot D \cdot q_c$  – тепловой поток, поглощаемый шиной при солнечной радиации, Вт;

$D$  – наружный диаметр шины, м;

$r_g = \frac{\rho_1}{S} [1 + \alpha_{\rho} (g - g_1)]$  – активное сопротивление одного метра шины

при температуре  $g$ , Ом;

$\varepsilon \approx 0,1$  – степень черноты алюминия и его сплавов;

$A_c = (0,25 \div 0,3)$  – коэффициент поглощения солнечной радиации шинами из алюминия и его сплавов;

$q_c = (800 \div 900) \text{ Вт} / \text{м}^2$  – интенсивность радиации;

$\rho_1$  – удельное сопротивление шины при температуре  $g_1$ , Ом;

$S$  – сечение шины, м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\rho} = (0,0036 \div 0,0043)$  – температурный коэффициент удельного сопротивления алюминия и его сплавов, 1/<sup>0</sup>С.

Таблица 4.11 - Параметры трубчатых шин из алюминиевых сплавов

Марка сплава	Параметры сплава							
	$\rho, 10^{-6} \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ при 20°C	$E, \text{ГПа}$	$\sigma_T, \text{МПа}$	$\sigma_{\sigma}, \text{МПа}$	$C, \frac{A \cdot c^{0,5}}{\text{мм}^2}$	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ при 100°C	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ при 25°C	$\delta, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
АДО	0,029	70	29	59	90	924	218	2710
АДОМ	0,029	70	29	59	92	964	218	2710
АД1Н	0,030	70	98	98-108	90	964	218	2710
АД31Т	0,034	70	59	127	82	924	192	2710
АД31Т1	0,031	70	147	196	85	924	192	2710
АД33Т	0,043	70	108	177	74	920	142	2700
АД33Т1	0,040	70	226	265	77	920	142	2700
АВТ1	0,038	70	226	304	73	797	176	2700
1915Т	0.0485- 0,0517	70	216	353	66	880	154	2770

Выбранные шины считаются стойкими, если выполняется условие (4.3). Допустимая температура нагрева  $\vartheta_{к, доп}$ , для шин из алюминиевых сплавов, принимается такой же, как для шин из технического алюминия, таблица 4.1. Конечная температура нагрева трубчатых шин из алюминиевых сплавов  $\vartheta_k$  определяется по кривым, изображенным на рисунке 4.1. Значение вспомогательного

коэффициента  $A_{g_k}$  вычисляется по формуле (4.4), где  $A_{g_n}$  определяется по кривым, изображенным на рисунке 4.1 для температуры шины вычисленной по формуле (4.5).

Таблица 4.12 - Условия выбора и проверки жестких шин и изоляторов ОРУ

Параметры	Условия выбора и проверки
Номинальное напряжение	$U_{уст} \leq U_{ном}$
Длительный допустимый ток	$I_{макс} = I_{форс} \leq I_{доп}$ или $g \leq g_{доп}$
Термическая стойкость	$g_k \leq g_{k,доп}$ или $S \geq S_T = \frac{\sqrt{B_k}}{C}$
Электродинамическая стойкость	$\sigma_{макс} \leq \sigma_{доп}$ $F_{расч} \leq F_{доп}$
Проверка на коронирование	$E_{макс} \leq 0,9 \cdot E_0$

Минимальное сечение шины, отвечающее требованиям термической стойкости, определяется по формуле (4.6).

Шинные конструкции отвечают условиям электродинамической стойкости, если выполняется условие (4.10). Допустимое механическое напряжение для трубчатых шин из алюминиевых сплавов принимается равным 70% предела прочности  $\sigma_s$ , указанного для соответствующего сплава в таблице 4.11.

Максимальные механические напряжения в шине определяются по формуле

$$\sigma_{макс} = \frac{F_{макс} \cdot l}{\lambda \cdot W} \cdot \eta = \frac{\alpha \cdot l^2 \cdot k_{\phi} \cdot k_{расч}}{\lambda \cdot D \cdot W} \cdot i_y^2 \cdot \eta, \quad (4.22)$$

Таблица 4.13 - Значения длительно допустимых токов шин из  
алюминиевого сплава 1915Т

Диаметр шины, мм		Длительно допустимый ток, А								
		ЗРУ		ОРУ						
		Ок- ра- шен ные	Нео- кра- шен ные	При штиле ( $V = 0$ ) с учетом солнечной радиации		Неокрашенные шины с учетом $Q_c$ при скорости ветра $V$ , м/с			При штиле ( $V = 0$ ) и $Q_c = 0$	
$D$	$d$			Ок- ра- шен ные	Не- окра шен ные	1	2	5	Окра- шен- ные	Неок- рашен- ные
70	64	1090	838	1163	925	1073	1346	1787	1230	1014
80	74	1238	946	1316	932	1292	1654	2242	1394	1142
90	80	1786	1342	1876	1314	1538	1997	2738	1988	1622
100	90	955	1477	2072	1436	1665	2170	2970	2198	1785
100	91	1863	1406	1972	1367	1585	2066	2835	2092	1699
100	94	1531	1156	1669	1124	1303	1698	2331	1720	1397
120	100	3227	2415	3469	2314	2645	3467	4779	3616	2914
120	110	2328	1742	2453	1669	1905	2499	3447	2609	2102
140	120	3746	2381	3936	2637	3623	3912	5412	4191	3356
150	130	4916	2965	4206	2797	3128	4132	5726	4481	3578
150	140	2886	2134	3028	2014	2252	2952	4122	3226	2576
180	170	3440	2512	3586	2336	2566	3415	4755	3826	3031
180	174	2672	1957	2981	1820	1999	2660	3706	2981	2362

Диаметр шины, мм		Длительно допустимый ток, А								
		ЗРУ		ОРУ						
		Ок- ра- шен ные	Нео- кра- шен ные	При штиле ( $V = 0$ ) с учетом солнечной радиации	Неокрашенные шины с учетом $Q_c$ при скорости ветра $V$ , м/с			При штиле ( $V = 0$ ) и $Q_c = 0$		
210	190	5571	4027	5772	3695	3995	5354	7486	6171	4856
220	200	5806	4206	6461	3843	4135	5555	7779	6461	5072
250	230	6577	4731	4680	4271	4533	6130	8619	7306	5702
300	270	9516	6009	9828	6776	6250	8541	12080	10548	8163

где  $\alpha = \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \text{ Н} / \text{А}^2$  для трёхфазного КЗ;

$\alpha = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н} / \text{А}^2$  для двухфазного КЗ;

$D$  – расстояние между фазами, м;

$l$  – длина пролёта шинной конструкции, м;

$\eta$  – динамический коэффициент, определяемый по кривым рисунка 4.2;

$\lambda$  – параметр, который берётся из таблицы 4.4;

$W$  – момент сопротивления поперечного сечения трубчатой шины,  $\text{м}^3$ , который определяется по формуле, приведённой в таблице 4.3.

Для определения динамического коэффициента  $\eta$  необходимо рассчитать частоту собственных колебаний шинной конструкции по формуле (4.9), где параметр  $r_1$  является функцией безразмерных величин  $C_{on} \cdot l^3 / (E \cdot J)$  и  $M / (m \cdot l)$ , где  $C_{on}$  – жесткость опоры, которая

практически равна жесткости изолятора  $C_{из}$ , Н/м [2],  $M$  - приведенная масса, кг.

Жесткость шинной опоры  $C_{он}$ , согласно [12] можно рассчитать по формуле:

$$C_{он} = \frac{C_{из,1} \cdot H_{из,1}^3}{(H_{из,1} + H_{из,2})^3 \cdot [\gamma + (1 - \gamma) \cdot z^3]}, \quad (4.23)$$

где  $C_{из,1}$  - жесткость верхнего изолятора шинной опоры, Н/м;

$H_{из,1}, H_{из,2}$  - высота соответственно верхнего и нижнего ярусов шинной опоры, м;

$$\gamma = \frac{C_{из,1} \cdot H_{из,1}^3}{C_{из,2} \cdot H_{из,2}^3}; \quad z = \frac{H_{из,1}}{H_{из,1} + H_{из,2}},$$

$C_{из,2}$  - жесткость нижнего изолятора шинной опоры, Н/м.

Приведенную массу, согласно [2, 12] следует определять по формуле

$$M = \frac{C_{он}}{(2 \cdot \pi \cdot f_{он})^2}, \quad (4.24)$$

где  $f_{он}$  - частота собственных колебаний опоры, Гц, которая принимается равной частоте колебаний изолятора  $f_{из}$  таблица 4.14, или определяется, согласно [12] по формуле

$$f_{он} = \frac{r_{он}^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{C_{он}}{3 \cdot M_{ст}}}, \quad (4.25)$$

где  $r_{он}$  - параметр частоты собственных колебаний опоры, зависящий от коэффициента  $\gamma = M_{г}/M_{ст}$  и определяемый по кривой, приведённой на рисунке 4.8;

$M_{ст}$  - масса стержня, кг, которая для изоляторов и изоляционных опор на жёстком основании принимается равной массе изолятора  $M_{из}$ .

Если изолятор установлен на высокой упругой колонне, то масса стержня  $M_{ст}$  принимается равной массе колонны  $M_{кол}$ ;

$M_г$  – сосредоточенная масса на вершине опоры, кг, которая для изоляторов и изоляционных опор на жестком основании принимается равной нулю. В том случае, если изолятор установлен на высокой колонне, сосредоточенная масса на вершине опоры  $M_г$  принимается равной массе изолятора.

Жесткость составной опоры, состоящей из  $n$  одинаковых изоляторов, определяется в соответствии с [12] по формуле

$$C_{оп} = C_{из} / n^3, \quad (4.26)$$

где  $C_{из}$  - жесткость одного изолятора, Н/м;

$n$  - количество элементов опоры.

Таблица 4.14 – Жесткость и частота собственных колебаний опорных изоляторов

Тип изолятора опоры	$C_{из}$ , кН/м	$f_{из}$ , Гц	Тип изолятора опоры	$C_{из}$ , кН/м	$f_{из}$ , Гц
ОНШ-35-2000	7100	-	КО-110-1250	1250	-
3хОНШ-35-2000	290	15	ОНС-110-2000	2210	32
ИОС-110-600	1100	28			

Кривые для определения  $r_1$  шин с жестким закреплением на опорных изоляторах и шин с шарнирным закреплением на опорных изоляторах приведены в [2] и на рисунке 4.9

Максимальная нагрузка,  $F_{макс}$  действующая на опорный изолятор шинной конструкции рассчитывается по формуле (4.17).

Допустимые нагрузки на одиночные изоляторы, согласно ПУЭ, составляют 60% минимальной разрушающей силы

$$F_{дон} = 0,6 \cdot F_{разр}, \quad (4.27)$$

а спаренных изоляторов - 50% от суммарного разрушающего усилия изоляторов опоры:

$$F_{дон} = 0,5 \cdot F_{разр, \Sigma}, \quad (4.28)$$

где  $F_{разр, \Sigma}$  - суммарное разрушающее усилие спаренных изоляторов.

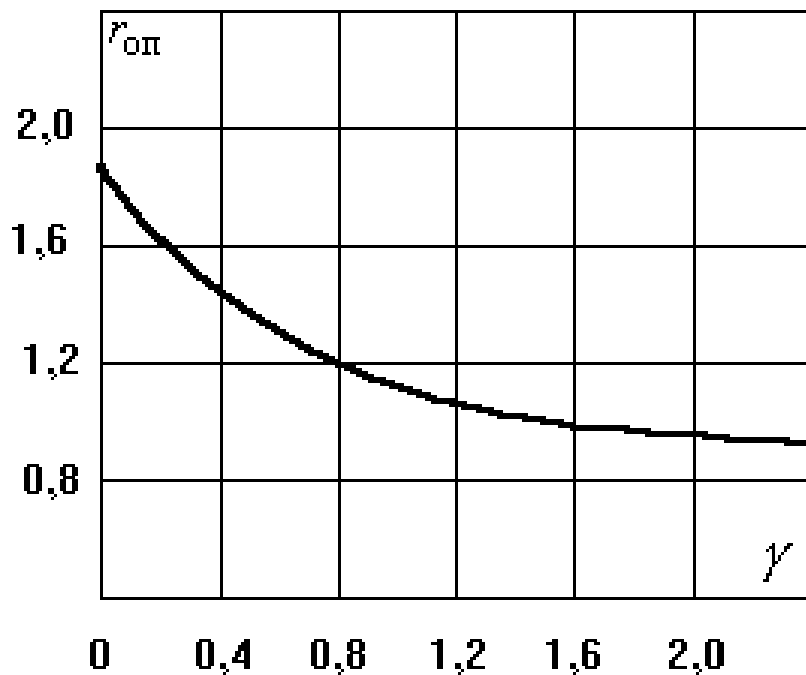
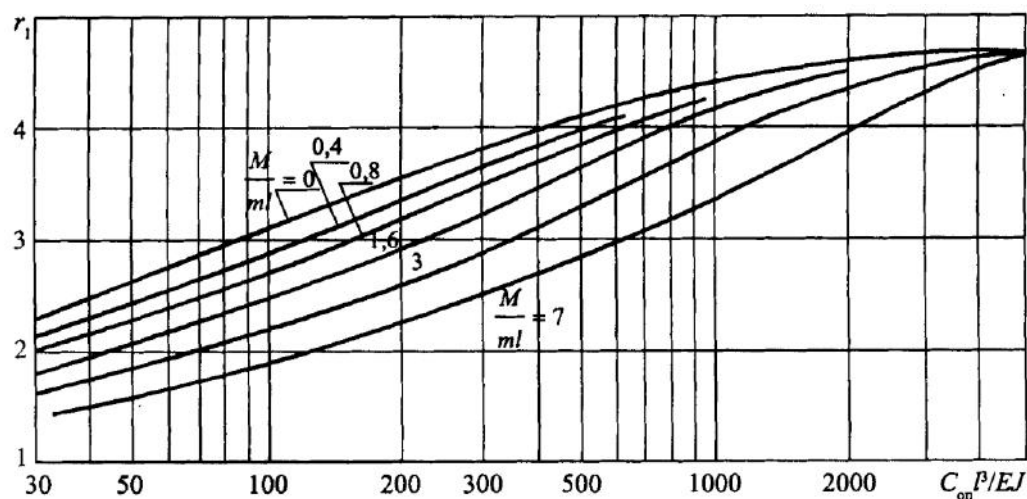


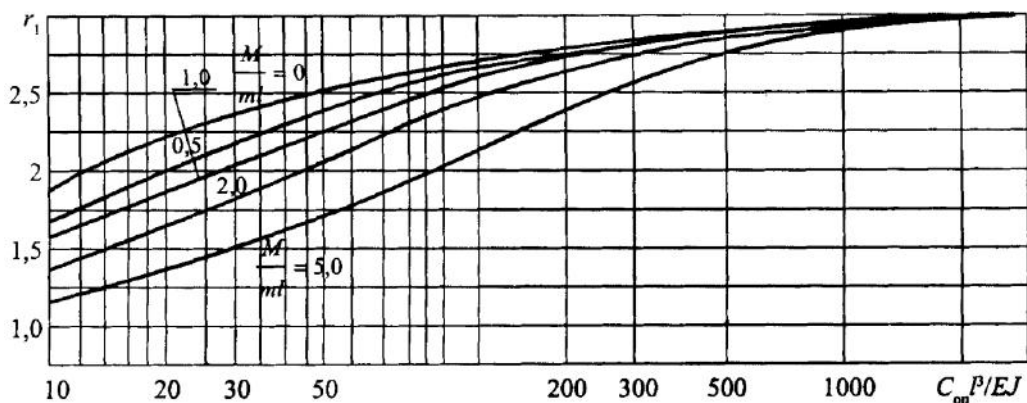
Рисунок 4.8 – Зависимость параметра частоты опоры от коэффициента  $\gamma$

Минимальные разрушающие нагрузки опорных изоляторов приведены в таблице 4.15.

Разрушающие и допустимые изгибающие нагрузки многоярусных изоляционных опор равны соответственно разрушающей и допустимой нагрузкам наименее прочного яруса опоры [12].



а



б

а – кривые для определения параметра частоты  $r_1$  собственных колебаний шинной конструкции при ее жестком закреплении на опорах; б – кривые для определения параметра частоты  $r_1$  собственных колебаний шинной конструкции при ее шарнирном закреплении на опорах

Рисунок 4.9 – Кривые для определения параметра частоты  $r_1$  собственных колебаний шинной конструкции

Разрушающие нагрузки ярусов определяются по формуле

$$F_{разр} = F_{разр,из,i} \cdot \frac{h_i}{H_i}, \quad (4.29)$$

где  $F_{разр,из,i}$  - разрушающая нагрузка изолятора  $i$ -го яруса;

$h_i$  - расстояние от опасного сечения изолятора яруса до вершины этого изолятора (рисунок 4.10);

$H_i$  - расстояние от опасного сечения изолятора яруса до центра тяжести поперечного сечения шины (рисунок 4.10).

Опасные сечения фарфоровых тел изоляторов опоры располагаются у нижних фланцев. Параметры опорных изоляторов приведены в таблице 4.15, а параметры шинных опор в таблице 4.16.

Таблица 4.15 - Параметры опорных изоляторов

Тип изолятора	$U_{ном}, кВ$	$F_{разр,мин}, Н$	Масса $m, кг$	Размеры, мм	
				$H_{из}$	$h_{фл}$
ОНШ-35-2000	35	20000	41,5	400	-
ОНСУ-40/1000	40	10000	39,0	500	67
ИОС-110-400	110	4000	61,0	1050	85
КО-110-1500	110	15000	106,2	1100	107
КО-110-2000	110	20000	106,2	1100	107
КО-110-1250	110	12500	83,2	1100	107
ИОС-110-600	110	6000	71,0	1100	94
ОНС-110-1600	110	16000	94,3	1100	107
ОНС-110-2000	110	20000	94,3	1100	107
ИШО-500-1000	500	10000	-	4954	-

Проверка трубчатых шин по условиям коронирования заключается в определении диаметров одиночных шин или составных проводников шинной конструкции и расстояний между ними, при которых наибольшая напряжённость электрического поля у

поверхности шин  $E_{\text{макс}}$  была бы меньше начальной критической напряжённости электрического поля  $E_0$  [12]. Таким образом, корона на шинах не возникает, если выполняется условие

$$E_{\text{макс}} \leq 0,9 \cdot E_0. \quad (4.30)$$

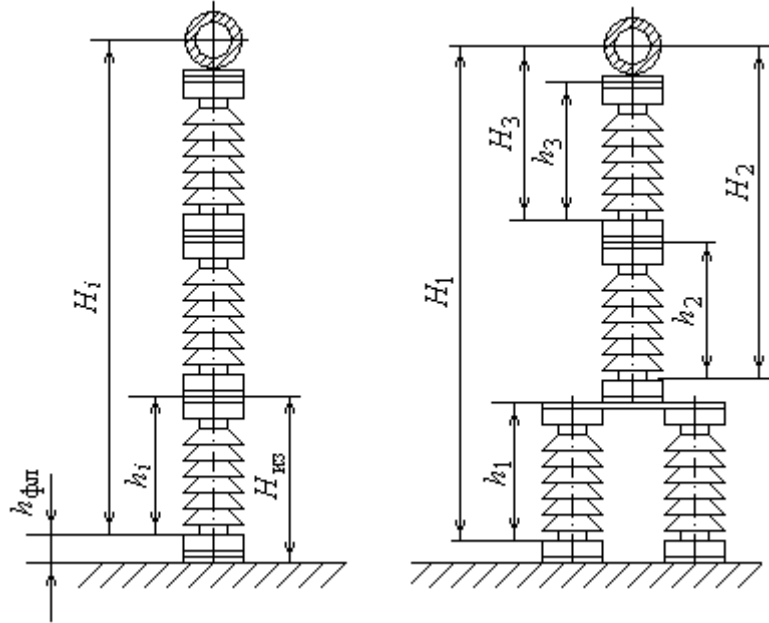


Рисунок 4.10 – Изоляционные опоры ОРУ

Начальная критическая напряжённость электрического поля  $E_0$  на поверхности гладкого цилиндрического проводника определяется по формуле:

$$E_0 = 24,5 \cdot \delta \cdot \left[ 1 + \frac{0,65}{(\delta \cdot r_0)^{0,38}} \right], \quad (4.31)$$

где  $r_0$  – радиус проводника, см;

$$\delta = \frac{0,00289 p_{\text{в}}}{273 + \vartheta_{\text{в}}} \quad - \quad \text{относительная плотность воздуха,}$$

соответствующая давлению  $p_{\text{в}}$  и температуре  $\vartheta_{\text{в}}$  окружающего воздуха. Физические свойства воздуха приведены в таблице 4.17.

Таблица 4.16 – Параметры шинных опор

Тип шинной опоры	Изоляторы		$U_{ном}$ , кВ	Масса $M_{из}$ , кг	$F_{разр.расч}, H$ , приложенная	
	тип	Коли- чество			к вер- шине опоры	к оси ши- ны
3×ОНШ- 35-2000	ОНШ-35-2000	3	110	124,5	3840	3470
4×ОНШ- 35-2000	ОНШ-35-2000	4	150	166,0	2730	2540
5×ОНШ- 35-2000	ОНШ-35-2000	5	220	207,5	2120	2000
ШО-110- У1	ИОС- 110/600У1	1	110	75,0	6000	5430
ШО- 110У-У1	ОНСУ- 40/1000У1	1	110	125,0	8310	7760
	КО- 110/1250У1	1				
ШО-150- У1	ОНСУ- 40/1000У1	1	150	125,0	8310	7760
	КО-110/1250 У1	1				
ШО- 150У-У1	ИОС- 110/600У1	1	150	152,0	5930	5430
	КО- 110/1250У1	1				

Тип шинной опоры	Изоляторы		$U_{ном}$ , кВ	Масса $M_{из}$ , кг	$F_{разр.расч}, H$ , приложенная	
	тип	Коли- чество			к вер- шине опоры	к оси ши- ны
ШО-220- У1	ИОС- 110/600У1	1	220	152,0	5930	5430
	КО- 110/1250У1	1				
ШО- 220У-У1	ИОС- 110/600У1	1	220	267,0	5930	5430
	КО- 110/1250У1	1				
	ОНС- 110/2000У1	1				
ШО- 330М-У1	ИОС- 110/600У1	1	330	309,0	5930	5430
	КО- 110/1250У1	1				
	ОНС- 110/2000У1	1				
ШО- 500М-У1	ИОС- 110/600У1	12	500	1150,0	-	-
ШО-750- У1	ИОС- 110/600У1	18	750	1600,0	-	-

Таблица 4.17 – Физические свойства сухого воздуха при  
 $p_г = 1,013 \cdot 10^5$  Па

Температура $\vartheta_г, ^\circ C$	Плотность $\rho_г, \text{кг} / \text{м}^3$	Коэффициент теплопроводности $\lambda_г \cdot 10^2, \text{Вт} / \text{м} \cdot ^\circ C$	Коэффициент вязкости $\nu_г \cdot 10^6, \text{м}^2 / \text{с}$
-50	1,584	2,04	9,23
-40	1,515	2,12	10,04
-30	1,453	2,20	10,80
-20	1,395	2,28	11,61
-10	1,342	2,36	12,43
0	1,293	2,44	13,28
10	1,247	2,15	14,16
20	1,205	2,59	15,06
30	1,165	2,67	16,00
40	1,128	2,76	16,96
50	1,093	2,83	17,95

Максимальная напряжённость электрического поля для средней фазы одиночных шин при горизонтальном их расположении определяется по формуле:

$$E_{\text{макс}} = k \cdot \frac{0,816 \cdot U}{r_0 \cdot \ln \frac{D_{\text{ср}}}{r_0}}, \quad (4.32)$$

где  $U$  – линейное напряжение, равное действующему значению среднего эксплуатационного напряжения, кВ;

$D_{\text{ср}} = 1,26 \cdot D$  – среднее геометрическое расстояние между

проводниками фаз при горизонтальном их расположении, см;

$k$  – коэффициент, учитывающий повышенные значения рабочей ёмкости и напряжённости поля средней шины относительно значений для крайних фаз, значение, которого лежит в пределах 1,03÷1,05.

Для расщеплённых проводников, рисунок 4.11, максимальная напряжённость электрического поля определяется по формуле:

$$E_{\max} = k \cdot k_y \cdot \frac{0,816 \cdot U}{n \cdot r_0 \cdot \ln \frac{D_{cp}}{r_0}}, \quad (4.33)$$

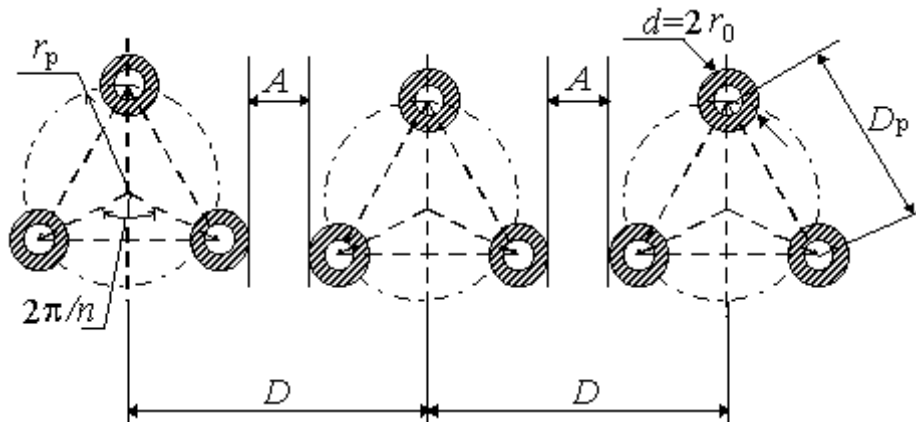


Рисунок 4.11 - Шинная конструкция с расщепленными трубчатыми шинами

где  $n$  – число проводников в фазе;

$r_0$  – эквивалентный радиус расщеплённой шины, см;

$k_y$  – коэффициент усиления электрического поля на поверхности составляющего проводника из-за влияния других проводников фазы;

$k$  – коэффициент, зависящий от средней рабочей ёмкости трёхфазной конструкции и для расщеплённых проводников равен 1,07.

При расположении проводников расщеплённой фазы по вершинам равностороннего треугольника, рисунок 4.11,

эквивалентный радиус  $r_э$  вычисляется по формуле:

$$r_э = \sqrt[n]{n \cdot r_0 \cdot r_p^{n-1}}, \quad (4.34)$$

где  $r_p = \frac{D_p}{\left(2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}\right)}$ ;

$D_p$  – расстояние между осями проводников расщеплённой фазы.

Коэффициент усиления поля, при расположении проводников расщеплённой фазы по вершинам равностороннего треугольника, определяется по формуле:

$$k_y = 1 + (n-1) \frac{r_0}{r_p}. \quad (4.35)$$

Для расщеплённой шины, состоящей из двух цилиндрических проводников, коэффициент усиления поля определяется по формуле:

$$k_y = 2 + \frac{2r_0}{D_p + r_0} - \frac{2r_0}{r_0 + S_1} - \frac{2r_0}{D_p + r_0 - S_1} + \frac{1}{r_0 + S_2} + \frac{1}{D_p + r_0 - S_2}, \quad (4.36)$$

где  $S_1 = \frac{r_0^2}{D_p}$ ;  $S_2 = \frac{r_0^2}{D_p - S_1}$ .

Расстояния в свету между шинами  $A$ , рисунок 4.11, в расчетах принимаются равными минимально допустимым расстояниям в соответствии с требованиями ПУЭ, значения которых приведены в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Расстояния в свету между шинами

Напряжение $U$ , кВ	35	110	150	220	330	500
Расстояние $A$ , мм	440	1000	1400	2000	2800	4200

### 4.3.3 Примеры выбора и проверки жестких шин открытых распределительных устройств

**Пример 4.3** Выбрать жесткие шины ОРУ-220кВ. К шинам 220 кВ подключено три блока мощностью по 300 МВт и автотрансформатор связи типа 3×АОДЦТН-167000/500/220. Допустимый коэффициент перегрузки автотрансформатора 1,25.  $T_a = 0,2 \text{ с}$ ,  $t_{отк} = 0,5 \text{ с}$ ,  $I_{n,0} = 30 \text{ кА}$ , температура воздуха в ОРУ  $\vartheta_e = 30^\circ \text{С}$ .

Для выбора сборных шин определим токи нормального и форсированного режимов блочного трансформатора и автотрансформатора связи.

Для блочного трансформатора

$$I_{ном} = \frac{S_{ном,з}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{353 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 926,4 \text{ А};$$

$$I_{макс} = \frac{S_{ном,з}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot 0,95} = \frac{353 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,95} = 975,2 \text{ А}.$$

Для автотрансформатора связи

$$I_{ном} = \frac{S_{ном,т}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{3 \cdot 167000}{\sqrt{3} \cdot 220} = 1314,8 \text{ А};$$

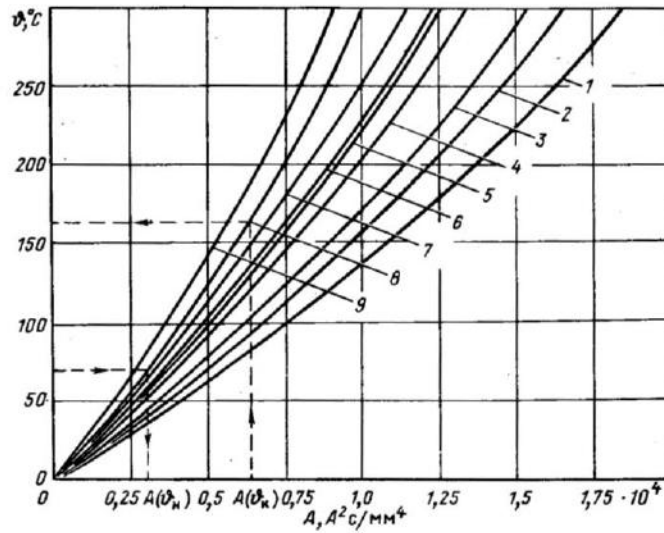
$$I_{макс} = \frac{1,25 \cdot S_{ном,т}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1,25 \cdot 167000 \cdot 3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 1643,5 \text{ А}.$$

Сборные шины выбираем по току наиболее мощного присоединения, т. е.  $I_{макс} = 1643,5 \text{ А}$ .

По таблице 4.13 принимаем цилиндрические шины из алюминиевого сплава 1915Т внутренним диаметром  $d = 110 \text{ мм}$ , наружным диаметром  $D = 120 \text{ мм}$  и длительно допустимым током при штиле с учетом солнечной радиации  $I_{дон} = 1669 \text{ А}$ . Условие (4.1)

выполняется, так как  $I_{\text{макс}} = 1643,5 \text{ А} < I_{\text{дон}} = 1669 \text{ А}$ .

Проверим выбранные трубчатые шины на термическую стойкость, приняв начальную температуру шины  $\vartheta_n = 70^\circ \text{С}$ . По кривой 8, рисунок 4.12, для температуры  $\vartheta_n = 70^\circ \text{С}$  находим  $A_{\vartheta_n} = 0,275 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{мм}^4$ .



Материал шин: 1-АДО, АДОМ, АД1М, АД1Н; 2-АД31Т1;  
3-АД31Т; 4-АД33Т1; 5-АД33Т; 6-АВТ1; 7-АВТ; 8-1915Т; 9-АМ

Рисунок 4.12- Кривые для определения конечной температуры нагрева шин при КЗ

Для определения конечной температуры трубчатой шины определим по формуле (4.4) значение вспомогательного коэффициента  $A_{\vartheta_k}$

$$A_{\vartheta_k} = A_{\vartheta_n} + \frac{B_k}{S^2} = A_{\vartheta_n} + \frac{I_{n,0}^2 \cdot (T_a + t_{\text{отк}})}{S^2},$$

$$\text{где } S = \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4} = \frac{3,14 \cdot (120^2 - 110^2)}{4} = 1805,5 \text{ мм}^2.$$

$$A_{\vartheta_k} = 0,275 \cdot 10^4 + \frac{30^2 \cdot 10^6 \cdot (0,2 + 0,5)}{1805,5^2} = 0,294 \cdot 10^4 \text{ А}^2 \cdot \text{с} / \text{мм}^4.$$

По кривой 8, рисунок 4.12, для значения  $A_{g_k} = 0,294 \cdot 10^4 A^2 \cdot c / мм^4$  определяем конечную температуру  $g_k = 75^0 C$ . Так как  $g_k = 75^0 C < g_{k,доп} = 200^0 C$ , то шины термически стойкие.

Минимальное сечение шины из сплава 1915Т по условию термической стойкости согласно (4.6)

$$S_{мин} = \frac{\sqrt{B_k}}{C} = \frac{\sqrt{I_{n,0}^2 \cdot (T_a + t_{отк})}}{C},$$

где  $C = 66 A \cdot c^{0,5} мм^2$  - для алюминиевого сплава 1915Т согласно таблице 4.2.

$$S_{мин} = \frac{\sqrt{30^2 \cdot 10^6 \cdot (0,2 + 0,5)}}{66} = 380 мм^2.$$

Так как  $S_{мин} = 380 мм^2 < S = 1805,5 мм^2$ , то шины термически стойкие.

Проверим выбранные трубчатые шины по условиям электродинамической стойкости. Принимаем длину пролёта шинной конструкции  $l = 6 м$ , а расстояние между фазами  $D = 2 м$ . В качестве изоляционной опоры принимаем шинную опору типа ШО-220-У1, которая согласно таблицы 4.10, состоит из двух опорно-стержневых изоляторов: в основании изолятор типа КО-110/1250 У1, а на вершине изолятор типа ИОС-110/600 У1.

Момент инерции трубчатой шины согласно таблице 4.3 определяется по формуле

$$J = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{64} = \frac{3,14 \cdot (120^4 - 110^4) \cdot 10^{-12}}{64} = 299,04 \cdot 10^{-8} м^4.$$

Момент сопротивления трубчатой шины в соответствии с таблицей 4.3 определяется по формуле

$$W = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot D} = \frac{3,14 \cdot (120^4 - 110^4) \cdot 10^{-12}}{32 \cdot 120 \cdot 10^{-3}} = 49,84 \cdot 10^{-6} м^3.$$

Для определения максимального механического напряжения в шине, необходимо сначала по формуле (4.9) рассчитать первую частоту собственных колебаний шинной конструкции

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2 \cdot \pi \cdot l^2} \sqrt{\frac{E \cdot J}{m}}.$$

Для определения параметра  $r_1 = f\left(\frac{C_{on} \cdot l^3}{E \cdot J}, \frac{M}{m \cdot l}\right)$  по кривым, приведенным на рисунке 4.9, определим по формуле (4.24) приведенную массу опоры  $M$

$$M = \frac{C_{on}}{(2 \cdot \pi \cdot f_{on})^2},$$

где  $f_{on}$  - частота собственных колебаний опоры определяется по формуле (4.25)

$$f_{on} = \frac{r_{on}^2}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{C_{on}}{3 \cdot M_{cm}}},$$

$r_{on} = f(\gamma) = f(M_e / M_{cm})$  - параметр частоты  $f_{on}$ , определяемый по кривым, приведенным на рисунке 4.8.

$C_{on}$  - жесткость опоры, определяемая по формуле (4.23)

$$C_{on} = \frac{C_{uz,1} \cdot H_{uz,1}^3}{(H_{uz,1} + H_{uz,2})^3 \cdot [\gamma + (1 - \gamma) \cdot z^3]},$$

где  $C_{uz,1} = 1100 \text{ кН / м}$ ,  $H_{uz,1} = 1100 \text{ мм}$  - для верхнего изолятора типа ИСО-110-600У1 согласно таблицам 4.13 и 4.14;

$C_{uz,2} = 1250 \text{ кН / м}$ ,  $H_{uz,2} = 1100 \text{ мм}$  - для нижнего изолятора типа КО-110-1250У1.

$$\gamma = \frac{C_{uz,1} \cdot H_{uz,1}^3}{C_{uz,2} \cdot H_{uz,2}^3} = \frac{1100 \cdot 1100^3}{1250 \cdot 1100^3} = 0,88; \quad z = \frac{H_{uz,1}}{H_{uz,1} + H_{uz,2}} = \frac{1100}{1100 + 1100} = 0,5,$$

$$C_{on} = \frac{1100 \cdot 1100^3}{(1100 + 1100)^3 \cdot [0,88 + (1 - 0,88)0,5^3]} = 153,63 \text{ кН/м}.$$

Определим параметр шинной конструкции

$$\frac{C_{on} \cdot l^3}{E \cdot J} = \frac{153630 \cdot 6^3}{70 \cdot 10^9 \cdot 299,04 \cdot 10^{-8}} = 52,84.$$

Принимаем изоляционную опору, закреплённую на жёстком основании. Поэтому масса стержня  $M_{cm}$  принимается равной массе изоляционной опоры  $M_{из}$ , которая согласно таблице 4.16 равна 152 кг, а сосредоточенная масса на вершине опоры  $M_6$  равна нулю.

Таким образом, для значения  $\gamma = \frac{M_6}{M_{cm}} = 0$  по кривой рисунка 4.8

находим  $r_{on} = 1,875$ .

$$f_{on} = \frac{1,875^2}{2 \cdot 3,14} \cdot \sqrt{\frac{153630}{3 \cdot 152}} = 10,28 \text{ Гц};$$

$$M_{on} = \frac{153630}{(2 \cdot 3,14 \cdot 10,28)^2} = 36,86 \text{ кг}$$

Определим параметр шинной конструкции

$$\frac{M_{on}}{m \cdot l} = \frac{36,86}{5 \cdot 6} = 1,23,$$

где  $m = \delta \cdot S = 2770 \cdot 1805,5 \cdot 10^{-6} = 5 \text{ кг} / \text{м}$ .

По кривым рисунка 4.9, а для рассчитанных значений

$$\frac{C_{on} \cdot l^3}{E \cdot J} = 441 \text{ и } \frac{M_{on}}{m \cdot l} = 1,23 \text{ определяем } r_1 = 3,7.$$

Первая частота собственных колебаний шинной конструкции равна

$$f_1 = \frac{3,7^2}{2 \cdot 3,14 \cdot 6^2} \sqrt{\frac{70 \cdot 10^9 \cdot 299,04 \cdot 10^{-8}}{5}} = 2,48 \text{ Гц}.$$

По кривой 1 рисунка 4.2 для  $\frac{f_1}{f_c} = \frac{2,48}{50} = 0,0496 \approx 0,05$

определяем значение динамического коэффициента при трёхфазном КЗ, который равен  $\eta = 0,41$ .

Максимальное механическое напряжение в материале шине определим по формуле (4.22)

$$\sigma_{\max} = \frac{\alpha \cdot l^2 \cdot k_{\phi} \cdot k_{\text{расч}}}{\lambda \cdot D \cdot W} \cdot i_{\text{уд}}^2 \cdot \eta,$$

где  $\lambda = 10$  – для шинной конструкции с тремя и более пролетами, таблица 4.4;

$$i_{\text{уд}} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n,0} = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot 30 = 74,25 \text{ кА}.$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 6^2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 74250^2 \cdot 0,41}{10 \cdot 2 \cdot 49,84 \cdot 10^{-6}} = 14,14 \text{ МПа},$$

что значительно меньше допустимого напряжения  $\sigma_{\text{дон}} = 247 \text{ МПа}$ .

Определим расчетную нагрузку  $F_{\text{расч}}$ , действующую на опорный изолятор шинной конструкции, по формуле (4.17)

$$F_{\text{расч}} = \beta \cdot F_{\max} \cdot \eta = \frac{\beta \cdot \alpha \cdot l \cdot k_{\phi} \cdot k_{\text{расч}}}{D} \cdot i_{\text{уд}}^2 \cdot \eta,$$

где  $\beta = 1,13$  – для шинной конструкции с тремя и более пролетами, таблица 4.4.

$$F_{\text{расч}} = \frac{1,13 \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-7} \cdot 6 \cdot 74250^2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0,41}{2} = 1327,2 \text{ Н}.$$

Допустимая нагрузка на принятую шинную опору ШО-220-У1 согласно (4.28) составляет

$$F_{\text{дон}} = 0,5 \cdot F_{\text{разр},\Sigma} = 0,5 \cdot 5930 = 2965 \text{ Н},$$

где  $F_{\text{расч},\Sigma} = 5930 \text{ Н}$ , согласно таблице 4.16.

Так как  $F_{\text{дон}} = 2965 \text{ Н} > F_{\text{расч}} = 1327,2 \text{ Н}$ , то выбранная опора проходит по механической прочности.

Проверим выбранные шины по условиям коронирования. Начальная критическая напряжённость электрического поля  $E_0$  на

поверхности цилиндрического проводника в соответствии с формулой (4.31) равна

$$E_0 = 24,5 \cdot \delta \cdot \left[ 1 + \frac{0,65}{(\delta \cdot r_0)^{0,38}} \right],$$

$$\text{где } \delta = \frac{0,00289 \cdot p_{\text{с}}}{273 + \vartheta_{\text{с}}} = \frac{0,00289 \cdot 1,013 \cdot 10^5}{273 + 30} = 0,966; \quad r_0 = \frac{D}{2} = \frac{120}{2} = 60 \text{ мм} = 6 \text{ см}.$$

$$E_0 = 24,5 \cdot 0,966 \cdot \left[ 1 + \frac{0,65}{(0,966 \cdot 6)^{0,38}} \right] = 31,56 \text{ кВ / см}.$$

Максимальная напряжённость электрического поля для средней фазы одиночных шин при горизонтальном их расположении, согласно формуле (4.34), равна

$$E_{\text{макс}} = k \cdot \frac{0,816 \cdot U}{r_0 \cdot \ln \frac{D_{\text{ср}}}{r_0}} = \frac{1,05 \cdot 0,816 \cdot 230}{6 \cdot \ln \frac{1,26 \cdot 200}{6}} = 8,79 \text{ кВ / см}.$$

Таким образом,  $E_{\text{макс}} = 8,79 \text{ кВ / см} < 0,9 \cdot E_0 = 0,9 \cdot 31,56 = 28,4 \text{ кВ / см}$  и выбранные шины проходят по условию коронирования.

#### 4.3.4 Выбор гибких шин и токопроводов открытых распределительных устройств

Сборные шины выбираются по допустимому току наиболее мощного присоединения, а токопроводы – по экономической плотности тока, таблица 4.19. При выборе токопроводов в качестве расчётного тока, согласно ПУЭ, принимается ток нормального режима работы. Выбранное по экономической плотности сечение токопровода округляется до стандартного ближайшего значения.

Выбранное сечение сборных шин и токопроводов проверяется на термическое действие токов КЗ по выражению (4.6). Согласно

ПУЭ, 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.

Расщеплённые провода воздушных линий при проверке на нагрев в условиях КЗ рассматриваются как один провод суммарного сечения [3].

Проверка шин и токопроводов на электродинамическую стойкость производится по току двухфазного КЗ, т. к. наибольшее сближение фаз наблюдается при этом виде КЗ.

Таблица 4.19 – Экономическая плотность тока

Проводники	Экономическая плотность тока, А/мм <sup>2</sup> , при числе часов использования максимума нагрузки в год		
	более 1000 до 3000	более 3000 до 5000	более 5000
Неизолированные провода и шины:			
медные	2,5	2,1	1,8
алюминиевые	1,3	1,1	1,0
Кабели с бумажной и провода с резиновой и поливинилхлоридной изоляцией с жилами:			
медными	3,0	2,5	2,0

Проводники	Экономическая плотность тока, А/мм <sup>2</sup> , при числе часов использования максимума нагрузки в год		
	более 1000 до 3000	более 3000 до 5000	более 5000
алюминиевыми	1,6	1,4	1,2
Кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией с жилами:			
медными	3,5	3,1	2,7
алюминиевыми	1,9	1,7	1,6

Электродинамическая стойкость, при двухфазном КЗ, гибких проводников разных фаз сборных шин и токопроводов обеспечивается, если выполняются условия [2]:

$$F_{\max} \leq F_{\text{доп}}; \quad D - 2 \cdot (s + r_p) \geq a_{\text{доп, мин}}, \quad (4.37)$$

где  $F_{\max}$  - максимальное тяжение в проводе при КЗ, Н;

$F_{\text{доп}}$  - допустимое тяжение в проводе, которое в курсовом и дипломном проектировании может приниматься равным  $1 \cdot 10^5$  Н;

$D$  - расстояние между проводниками фаз, таблица 4.20, м;

$s$  - расчетное смещение проводников при КЗ, м;

$a_{\text{доп, мин}}$  - наименьшее допустимое расстояние между проводниками фаз при наибольшем рабочем напряжении, таблица 4.21, м;

$r_p$  - радиус расщепления фазы, таблица 4.22, м.

Проверку гибких проводников на электродинамическую стойкость (расчет смещения проводников) необходимо производить,

если параметр  $p$  равен:

$$p = \frac{\lambda \cdot (I_{n,0}^{(2)})^2 \cdot t_{отк}}{D \cdot q} \geq 0,4 \kappa A^2 \cdot c / H, \quad (4.38)$$

где  $I_{n,0}^{(2)}$  - начальное действующее значение периодической составляющей тока двухфазного КЗ, кА;

$t_{отк}$  - расчетная продолжительность КЗ, с;

$D$  - расстояние между фазами, м;

$q = q_n + q_e$  - погонный вес провода, с учетом влияния гирлянд, Н/м. Параметры подвесных изоляторов применяемых для крепления гибких шин в распределительных устройствах станций и подстанций приведены в таблице 4.23;

$\lambda$  - коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей электродинамической силы, который определяется по кривой приведенной в [2] или на рисунке 4.13;

$T_a$  - постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, с.

Методика определения смещения  $s$  проводников расположенных в горизонтальной плоскости на одном уровне зависит от продолжительности КЗ.

В том случае если выполняется условие

$$t_{отк} \leq t_{прод} = \sqrt{\frac{0,9 \cdot M_{np} \cdot g}{\omega_o^2 \cdot F_{расч}^{(2)}}}, c \quad (4.39)$$

горизонтальное смещение проводников  $s$  определяется по формуле

$$s = 0,772 \cdot \lambda \cdot \frac{(I_{n,0}^{(2)})^2 \cdot t_{отк} \cdot \sqrt{f_n}}{D \cdot q}, \quad (4.40)$$

Таблица 4.20 – Расстояние между фазами гибких шин и токопроводов ОРУ

Напряжение $U$ , кВ	35	110	220	330	500	750
Расстояние $D$ , м	1,5	3,0	4,0	4,5	6,0	10,0

Таблица 4.21 – Наименьшие допустимые расстояния между проводниками фаз  $a_{\text{доп, мин}}$

Напряжение $U$ , кВ	10-24	110	150	220	330	500	750
$a_{\text{доп, мин}}$ , м	0,2	0,45	0,6	0,95	1,4	2,0	3,1

Таблица 4.22 - Значения  $k$  и  $r_p$

Число проводов в фазе	2	3	4
Коэффициент $k$	$1 + 2 \cdot \frac{r_0}{a^*}$	$1 + 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{r_0}{a}$	$1 + 3 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{r_0}{a}$
Радиус расщепленной фазы $r_p$ , см	$\sqrt{r_0 \cdot a}$	$\sqrt[3]{r_0 \cdot a^2}$	$\sqrt[4]{\sqrt{2} \cdot r_0 \cdot a^3}$

\*  $a$  - расстояние между проводами в расщеплённой фазе, которое принимается равным при напряжении 220 кВ - 20 - 30 см и при напряжении 330 кВ и выше - 40 см.

где  $M_{np} = \gamma \cdot M$  - приведенная масса с учетом массы провода, суммарной массы двух натяжных изоляторов и массы отводов в пролете, кг;

$M$  - масса провода в пролете, кг;

$\gamma$  - коэффициент приведения массы, значение, которого приведены в [2] и в таблице 4.24;

$g$  - ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\omega_o$  - угловая частота колебаний проводников, 1/с;

$F_{расч}^{(2)}$  - расчетная электродинамическая нагрузка, действующая на проводник при двухфазном КЗ, Н.

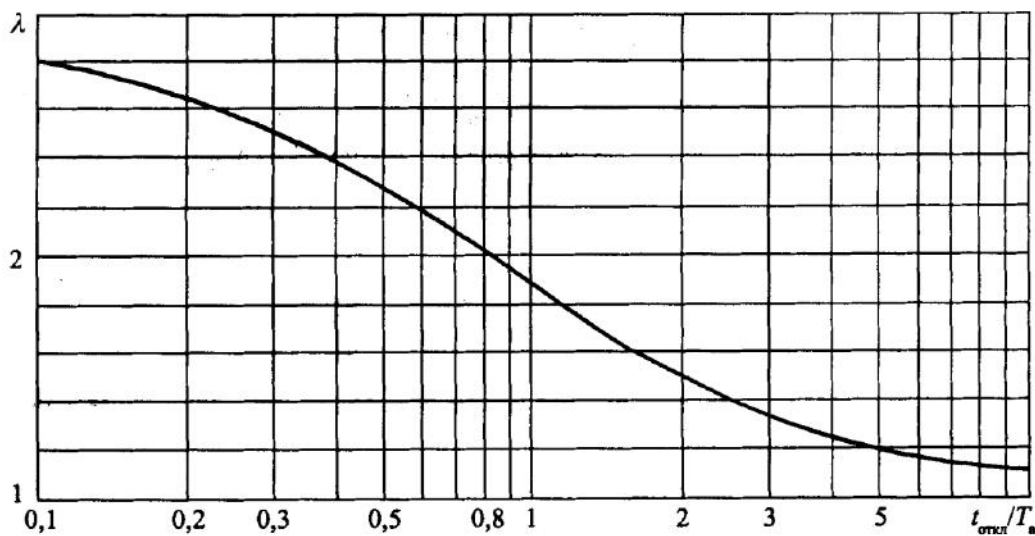


Рисунок 4.13 Кривая для определения коэффициента  $\lambda$

Угловая частота колебаний  $\omega_o$  и расчетная электродинамическая нагрузка  $F_{расч}$  на проводник при двухфазном КЗ, определяются по формулам [2]

$$\omega_o = \sqrt{\frac{3 \cdot g}{2 \cdot f_{np}}} = \sqrt{\frac{g}{L}}, \quad (4.41)$$

Таблица 4.23 – Параметры и количество подвесных изоляторов в гирляндах для крепления гибких шин в распределительных устройствах

Тип изолятора	Количество изоляторов, $N$ , при номинальном напряжении РУ, кВ										Высота изолятора $H_{из}$ , м	$F_{разр}$ , кН	Масса $m_{из}$ изолятора, кг
	10	20	35	110	150	220	330	500	750	1150			
ПФ6-Б	1	3	5	8	10	15	21	30	-	-	0,140	60	6,00
ПФ70-В	1	3	4	8	10	15	21	30	44	-	0,146	70	5,10
ПС70-Д	1	4	5	8	11	16	22	32	48	-	0,127	70	3,49
ПС6-Б	1	4	5	8	11	16	22	32	48	-	0,130	60	4,10
ПСД70-ДМ	1	4	4	6	9	13	19	27	-	-	0,127	70	4,80
ПС120-Б	-	-	-	-	-	15	21	30	43	73	0,146	120	4,43
ПС120-А	-	-	-	-	-	15	21	30	43	73	0,146	120	5,41
ПСВ120-А	-					13	17	24	35	58	0,146	120	7,02

Таблица 4.24- Значения коэффициента приведения массы  $\gamma$

$f_z / f_n$	Значения коэффициента $\gamma$ при значениях $M_z / M$ , равных									
	0,010	0,020	0,050	0,100	0,200	0,500	1,000	2,000	3,000	5,000
0,010	1,000	1,000	1,000	1,000	1,001	1,002	1,003	1,005	1,006	1,007
0,020	1,000	1,000	1,000	1,001	1,002	1,004	1,007	1,010	1,012	1,014
0,050	1,000	1,000	1,001	1,002	1,004	1,010	1,016	1,024	1,029	1,035
0,100	1,000	1,001	1,002	1,004	1,008	1,019	1,031	1,048	1,058	1,069
0,200	1,001	1,002	1,004	1,008	1,015	1,034	1,059	1,090	1,110	1,140
0,500	1,002	1,003	1,008	1,016	1,031	1,071	1,130	1,200	1,250	1,310
1,000	1,002	1,005	1,012	1,024	1,048	1,110	1,200	1,330	1,430	1,560
2,000	1,003	1,007	1,017	1,033	1,065	1,150	1,290	1,500	1,670	1,910
3,000	1,004	1,007	1,019	1,037	1,073	1,180	1,330	1,600	1,820	2,150
5,000	1,004	1,008	1,021	1,041	1,082	1,200	1,390	1,710	2,000	2,470

$$F_{расч}^{(2)} = F_o^{(2)} \cdot \lambda = 0,2 \cdot \frac{l \cdot (I_{n,0}^{(2)})^2 \cdot \lambda}{D}, \quad (4.42)$$

где  $f_{np}$  - приведенный провес провода по середине пролета с учетом гирлянд изоляторов, м;

$$L = 2 \cdot f_{np} / 3, \text{ м};$$

$l$  - длина пролета, м.

Приведенный провес провода  $f_{np}$  по середине пролета с учетом гирлянд изоляторов определяется по формуле

$$f_{np} = f_n + l_z \cdot \cos \beta, \quad (4.43)$$

где  $f_n$  - провес провода по середине пролета, м;

$l_z = N \cdot H_{из}$  - длина гирлянды изоляторов, м;

$N$  - количество изоляторов в гирлянде, таблица 4.23;

$H_{из}$  - высота одного изолятора, м, таблица 4.23;

$\beta$  - угол отклонения гирлянды от вертикали до КЗ.

В том случае если

$$4 \cdot T_a < t_{отк} \leq \frac{1,2 \cdot \pi}{\omega_o}, \quad (4.44)$$

горизонтальное смещение проводников  $s$  определяется согласно [2] по одной из ниже приведенных формул в зависимости от соотношения  $\Delta W_\kappa / M_{np} \cdot g \cdot L$

$$\text{при } \frac{\Delta W_\kappa}{M_{np} \cdot g \cdot L} < 1 \quad s = f_{np} \cdot \sin \alpha, \quad (4.45)$$

$$\text{при } \frac{\Delta W_\kappa}{M_{np} \cdot g \cdot L} \geq 1 \quad s = f_{np}, \quad (4.46)$$

где  $\alpha$  - расчетный угол отклонения проводника от равновесного положения при двухфазном КЗ, рад., который определяется по формуле

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta W_{\kappa}}{M_{np} \cdot g \cdot L}\right), \quad (4.47)$$

где  $\Delta W_{\kappa}$  - энергия, накопленная в проводнике за расчетное время существования двухфазного КЗ, Дж, которая определяется по кривым, приведенным в [2] или на рисунках 4.14 и 4.15, в зависимости от величины безразмерной продолжительности двухфазного КЗ  $\tau_{\kappa 3}$ .

Безразмерная продолжительность двухфазного КЗ  $\tau_{\kappa 3}$  определяется по формуле

$$\tau_{\kappa 3} = \frac{t_{омк} \cdot \omega_o}{2 \cdot \pi}. \quad (4.48)$$

Если при двухфазном КЗ выполняется условие

$$t_{омк} \succ \frac{1,2 \cdot \pi}{\omega_o}, \quad (4.49)$$

то горизонтальное смещение проводников рассчитываются по формулам (4.45) или (4.46). При этом энергию, накопленную проводником,  $\Delta W_{\kappa}$ , в соответствии с [2] определяют по одной из следующих формул, в зависимости от значения  $\Delta W_{\kappa}^{(2)}$ , определяемого по формуле

$$\Delta W_{\kappa}^{(2)} = F_o^{(2)} \cdot D \cdot \ln \frac{D + 2 \cdot L}{D}. \quad (4.50)$$

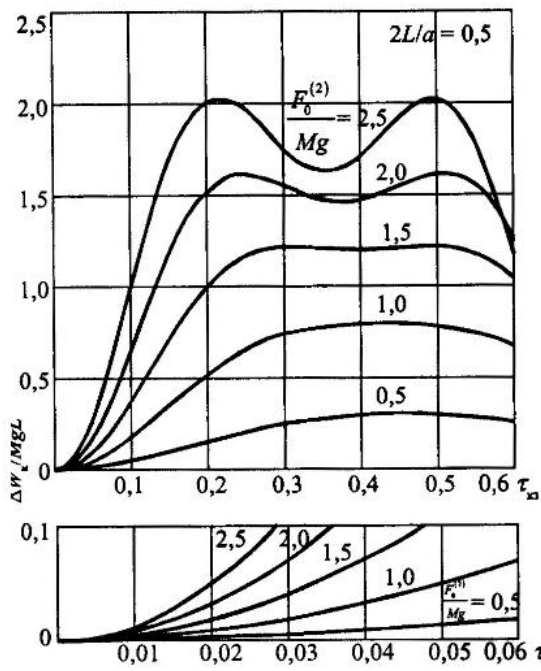
$$\text{Если } \Delta W_{\kappa}^{(2)} \succ 2 \cdot M_{np} \cdot g \cdot L, \text{ то } \Delta W_{\kappa} = 0,5 \cdot \Delta W_{\kappa}^{(2)}, \quad (4.51, a)$$

$$\text{если } \Delta W_{\kappa}^{(2)} \leq 2 \cdot M_{np} \cdot g \cdot L, \text{ то } \Delta W_{\kappa} = M_{np} \cdot g \cdot h, \quad (4.51, б)$$

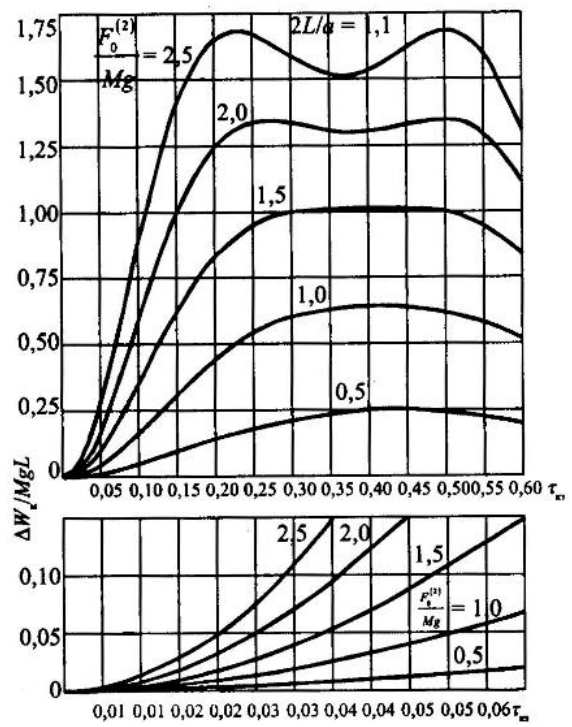
где  $h$  - максимальная высота подъема центра масс проводника во время КЗ, м, рисунок 4.16.

Максимально возможное значение тяжения в проводнике  $F_{макл}$ , согласно [2] определяется по формуле

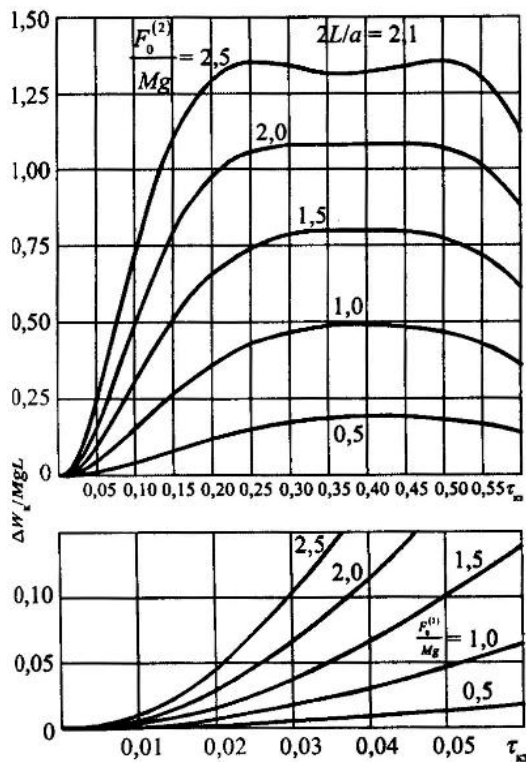
$$F_{макл} \approx \sqrt{2(E \cdot S) \cdot \frac{\Delta W_{\kappa}}{l} + (F_0)^2}, \quad (4.52)$$



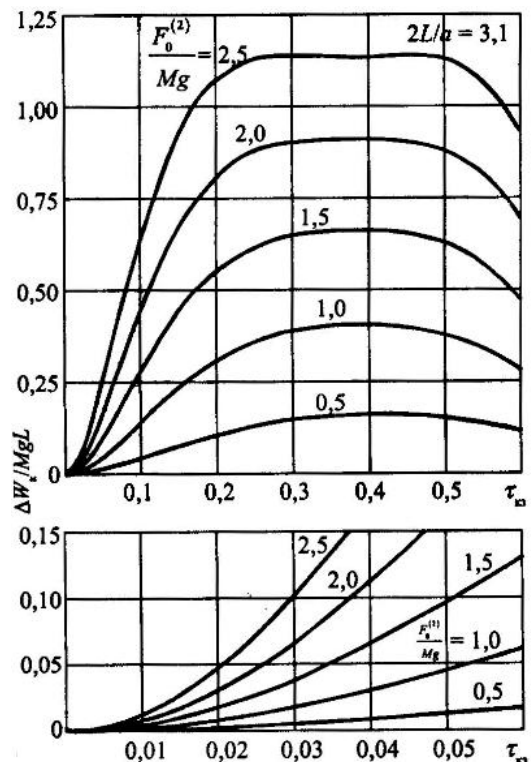
а



б



в



г

Рисунок 4.14-Характеристики  $\Delta W_k / M_{np} \cdot g \cdot L$  при двухфазном КЗ

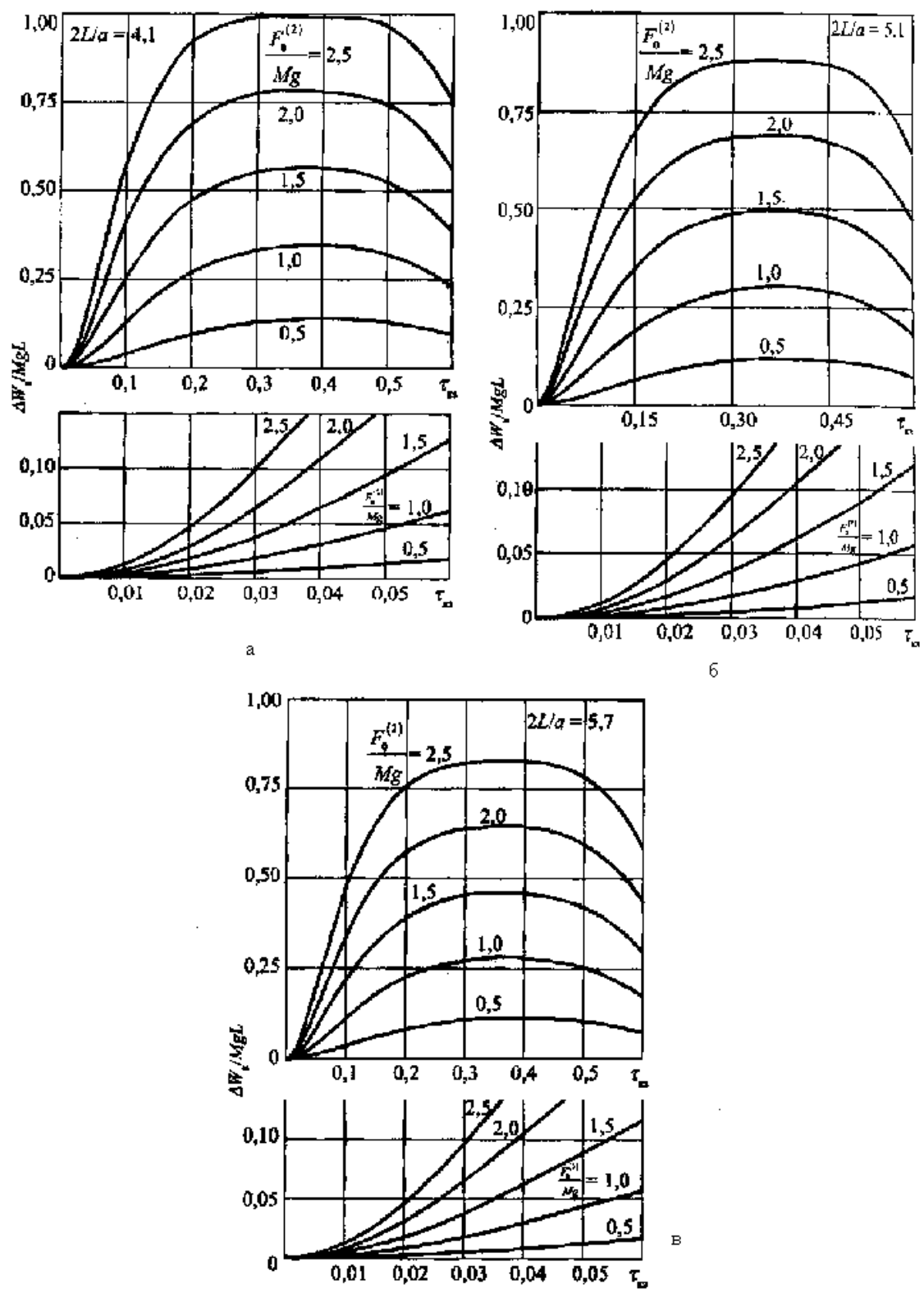


Рисунок 4.15-Характеристики  $\Delta W_k / M_{np} \cdot g \cdot L$  при двухфазном КЗ

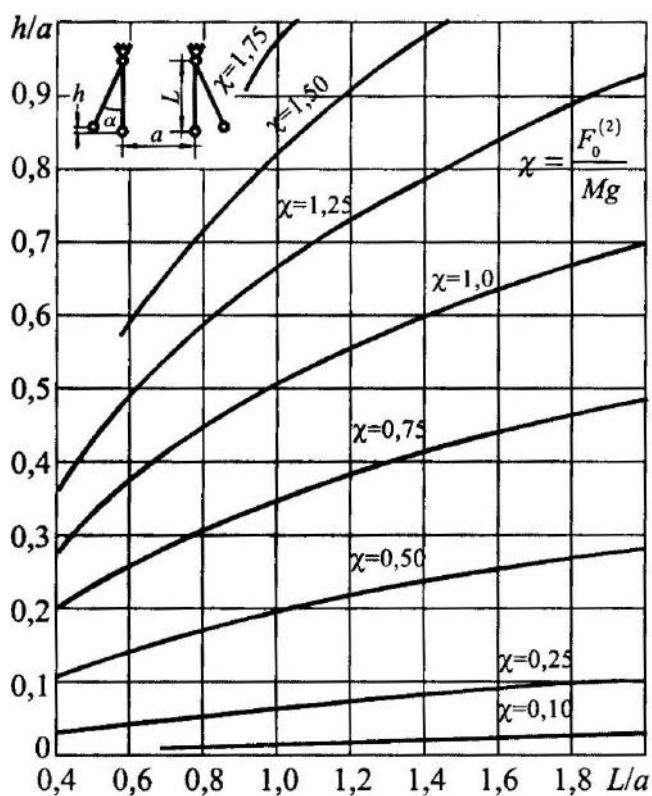


Рисунок 4.16-Кривые для определения  $h/D$  при двухфазном КЗ

где  $E$  -модуль упругости проводника, Н/м<sup>2</sup>. Модуль упругости скрученных проводов следует уменьшать в два-три раза по сравнению с модулем упругости отдельных проволок [2];

$S$  - площадь поперечного сечения провода, м<sup>2</sup>;

$l$  - длина пролета, м;

$\Delta W_k$  - энергия, накопленная проводником за расчетное время КЗ, Дж. Если выполняется условие (4.39), то согласно [2] допускается значение  $\Delta W_k$  определять по формуле

$$\Delta W_k \approx \frac{(F_{расч}^{(2)} \cdot t_{отк})^2 \cdot \lambda}{2 \cdot M_{пр}}, \quad (4.53)$$

$F_0$  - тяжение в проводнике до КЗ, Н, значение которого

определяется по формуле

$$F_0 = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f_{np}}. \quad (4.54)$$

Нижний предел максимального тяжения в проводнике  $F_{\text{макс2}}$  согласно [2] определяется по формуле

$$F_{\text{макс2}} = F_0 \cdot \text{макс} \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{F_{\text{расч}}^{(2)}}{M_{np} \cdot g} \right)^2}; 1 + 2 \cdot \frac{\Delta W_{\kappa}}{M_{np} \cdot g \cdot L} \right\}. \quad (4.55)$$

Шины и токопроводы с расщеплёнными фазами, согласно ПУЭ, должны проверяться по электродинамическому взаимодействию проводников одной фазы. При КЗ проводники одной фазы под действием тяжений стремятся приблизиться к центру. Для уменьшения усилий между проводами фазы устанавливают дистанционные распорки. Расстояние между дистанционными распорками рассчитывается по формуле:

$$l_p = k \cdot \sigma_{\text{макс}} \cdot 10^3 \sqrt{\frac{(k-1) \cdot \sigma_{\text{макс}} \cdot 24 \cdot \beta}{(\gamma_{\kappa} + k \cdot \gamma_1) \cdot (\gamma_{\kappa} - k \cdot \gamma_1)}}, \quad (4.56)$$

где  $k = 1,8$  - коэффициент допустимого увеличения механического напряжения в проводе при КЗ;

$\sigma_{\text{макс}}$  - максимальное напряжение в проводе, МПа;

$\beta = 159 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 / \text{Н}$  - коэффициент упругого удлинения алюминиевого провода;

$\gamma_1$  - удельная нагрузка от собственной массы провода, МПа/м;

$\gamma_{\kappa}$  - удельная нагрузка от сил взаимодействия при КЗ, МПа/м.

Максимальное напряжение в проводе определяется по формуле

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{макс}}}{n \cdot S}, \quad (4.57)$$

где  $n$  - число проводов в фазе;

$S$  - сечение провода, мм<sup>2</sup>;

$F_{\text{макс}}$  - тяжение в проводе, определяемое по формулам (4.52) или (4.55), Н.

Удельная нагрузка на каждый провод от собственного веса

$$\gamma_1 = \frac{9,8 \cdot m}{S}, \quad (4.58)$$

где  $m$  - масса одного метра алюминиевого провода, кг.

Удельная нагрузка на каждый провод от взаимодействия при КЗ

$$\gamma_{\kappa} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot (n-1) \cdot (I_{n,0}^{(3)})^2}{n^2 \cdot S \cdot d}, \quad (4.59)$$

где  $d$  - диаметр токопровода, м.

Выбранные шины и токопровод не будут коронировать, если наибольшая напряженность электрического поля у поверхности любого провода не более  $0,9 \cdot E_0$ . Таким образом, условие проверки на корону можно записать в виде:

$$1,07 \cdot E \leq 0,9 \cdot E_0, \quad (4.60)$$

где  $E_0$  - начальная критическая напряженность электрического поля, кВ/см, которая определяется по формуле

$$E_0 = 30,3 \cdot m \cdot \left( 1 + \frac{0,299}{\sqrt{r_0}} \right), \quad (4.61)$$

$m$  - коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности провода, который для многопроволочных проводов принимается равным 0,82;

$r_0$  - радиус провода, см;

$E$  - напряжённость электрического поля около поверхности нерасщеплённого провода, кВ/см, которая определяется по формуле

$$E = \frac{0,354 \cdot U}{r_0 \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r_0}}, \quad (4.62)$$

$U$  - линейное напряжение, кВ;

$D_{cp} = 1,26 \cdot D$  - среднее геометрическое расстояние между проводами фаз, при их горизонтальном расположении, см.

Напряжённость электрического поля вокруг расщеплённых проводов определяется по выражению:

$$E = \frac{k \cdot 0,354 \cdot U}{n \cdot r_0 \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r_p}}, \quad (4.63)$$

где  $k$  - коэффициент, учитывающий число проводов  $n$  в фазе;

$r_p$  - радиус расщепленных проводов в фазе.

Значения  $k$  и  $r_p$  определяется по формулам, приведённым в таблице 4.22.

#### 4.3.5 Примеры выбора и проверки гибких шин и токопроводов открытых распределительных устройств

**Пример 4.4** Выбрать сборные шины 220 кВ и токоведущие части от сборных шин до выводов трансформатора в цепи генератора ТГВ-200. Трансформатор типа ТДЦ-250000/220/15,75.  $T_{max} = 6500 ч$ ,  $I_{n,0}^{(3)} = 14 кА$ , время отключения КЗ  $t_{отк} = 0,25 с$ , длина пролета  $l = 30 м$ , провес провода посередине пролета  $f_n = 2,5 м$ .

Сечение сборных шин выбирается по току наиболее мощного присоединения, в данном случае блока генератор-трансформатор:

$$I_{ном} = \frac{S_{ном,г}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{235,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} = 617,5 А,$$

$$I_{\text{макс}} = \frac{S_{\text{ном,з}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot 0,95} = \frac{235,3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,95} = 650 \text{ А}.$$

По таблице 7.35 [9] принимаем провод марки АС-300/66,  $S = 300 \text{ мм}^2$ ,  $d = 24,5 \text{ мм}$ ,  $r_0 = 1,225 \text{ см}$ ,  $I_{\text{доп}} = 680 \text{ А}$ , масса одного метра провода  $m = 1,313 \text{ кг / м}$ .

Условие (4.1) выполняется, так как  $I_{\text{макс}} = 650 \text{ А} < I_{\text{доп}} = 680 \text{ А}$ .

Проверим выбранные гибкие шины на электродинамическую стойкость. Для чего по формуле (4.38) определим значение параметра  $p$

$$p = \frac{\lambda \cdot (I_{n,0}^{(2)})^2 \cdot t_{\text{отк}}}{D \cdot q} \geq 0,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с / Н},$$

где  $\lambda$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей электродинамической силы. В соответствии с [2] при отношении  $t_{\text{отк}} / T_a = 0,25 / 0,035 = 7,14 > 4$  принимаем  $\lambda = 1$ ;

$D$  - расстояние между фазами, м, значение которого принимается в соответствии с таблицей 4.20;

$q = q_n + q_z$  - погонный вес провода, с учетом влияния гирлянд, Н/м;

$q_n$  - погонный вес провода, Н/м, который для провода марки АС-300/66 равен

$$q_n = g \cdot m = 9,81 \cdot 1,313 = 12,88 \text{ Н / м};$$

$q_z$  - погонный вес одной подвесной гирлянды изоляторов, Н/м, который, согласно таблице 4.23, для гирлянд составленных из подвесных изоляторов типа ПС70-Д равен

$$q_z = \frac{g \cdot N \cdot m_{\text{из}}}{l} = \frac{9,81 \cdot 16 \cdot 3,49}{30} = 18,26 \text{ Н / м}.$$

Таким образом, погонный вес провода с учетом влияния гирлянд равен

$$q = q_n + q_z = 12,88 + 18,26 = 31,14 \text{ Н/м}.$$

$$p = \frac{1 \cdot (0,87 \cdot 14)^2 \cdot 0,25}{4 \cdot 31,14} = 0,298 \text{ кА}^2 \cdot \text{с/Н} < 0,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с/Н}.$$

Расчет смещений проводников гибких шин можно не выполнять. Однако для пояснения методики расчета смещений проводников выполним данный расчет.

Для определения методики расчета смещений гибких проводников при КЗ, определим выполнение условия (4.39). Для чего по таблице 4.24 определим значение коэффициента приведения массы

$$\gamma \quad \text{при} \quad f_z / f_n = \frac{l_z \cdot \cos \beta}{f_n} = \frac{N \cdot H_{uz} \cdot \cos \beta}{f_n} = \frac{16 \cdot 0,127 \cdot \cos 0^\circ}{2,5} = 0,813 \quad \text{и}$$

$$\frac{M_z}{M} = \frac{N \cdot m_{uz}}{m \cdot l} = \frac{16 \cdot 3,49}{1,313 \cdot 30} = 1,42. \text{ Из таблицы 4.24 имеем } \gamma = 1,265.$$

Определим по формуле (4.41) значение  $\omega_0$ , а по формуле (4.42) расчетную электродинамическую нагрузку  $F_{расч}^{(2)}$ , действующую на гибкие провода шин при двухфазном КЗ

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{9,81}{3,021}} = 1,8 \text{ 1/с},$$

$$\begin{aligned} L &= \frac{2 \cdot f_{np}}{3} = \frac{2 \cdot (f_n + l_z \cdot \cos \beta)}{3} = \frac{2 \cdot (f_n + N \cdot H_{uz} \cdot \cos \beta)}{3} = \\ \text{где} \quad &= \frac{2 \cdot (2,5 + 16 \cdot 0,127 \cdot \cos 0^\circ)}{3} = 3,021 \text{ м}, \end{aligned}$$

$$F_{расч}^{(2)} = 0,2 \cdot \frac{l}{D} \cdot (I_{n,0}^{(2)})^2 \cdot \lambda = 0,2 \cdot \frac{30}{4} \cdot (0,87 \cdot 14)^2 \cdot 1 = 220,4 \text{ Н}.$$

$$t_{отк} \leq t_{прод} = \sqrt{\frac{0,9 \cdot M_{пр} \cdot g}{\omega_0^2 \cdot F_{расч}^{(2)}}} = \sqrt{\frac{0,9 \cdot M \cdot \gamma \cdot g}{\omega_0^2 \cdot F_{расч}^{(2)}}} = \sqrt{\frac{0,9 \cdot 1,313 \cdot 30 \cdot 1,265 \cdot 9,81}{1,8^2 \cdot 220,4}} = 0,785 \text{ с}.$$

Поскольку  $t_{отк} = 0,25 \text{ с} < t_{прод} = 0,785 \text{ с}$ , то расчет смещения проводников  $s$  ведем по формуле (4.40), а энергию, накопленную проводником  $\Delta W_{\kappa}$  по формуле (4.53).

Горизонтальное смещение гибких проводников  $s$  составляет

$$s = 0,772 \cdot \lambda \cdot \frac{(I_{n,0}^{(2)})^2 \cdot \sqrt{f_{пр}}}{D \cdot q} = \frac{0,772 \cdot 1 \cdot (0,87 \cdot 14)^2 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{4,532}}{4 \cdot 31,14} = 0,489 \text{ м}.$$

Наименьшее допустимое расстояние между фазами при  $U = 220 \text{ кВ}$  согласно таблице 4.21  $a_{доп, мин} = 0,95 \text{ м}$ .

Проверим выполнение условия (4.36)

$$D - 2 \cdot (s + r_p) = 4 - 2 \cdot (0,489 + 0) = 3,022 \text{ м} > a_{доп, мин} = 0,95 \text{ м}.$$

Энергия, накопленная проводником  $\Delta W_{\kappa}$  равна

$$\Delta W_{\kappa} = \frac{(F_{расч}^{(2)} \cdot t_{отк})^2 \cdot \lambda}{2 \cdot M_{пр}} = \frac{(220,4 \cdot 0,25)^2 \cdot 1}{2 \cdot 49,83} = 30,46 \text{ Дж},$$

где  $M_{пр} = m \cdot l \cdot \gamma = 1,313 \cdot 30 \cdot 1,265 = 49,83 \text{ кг}$  - приведенная масса провода в пролете с учетом влияния гирлянд изоляторов и ответвлений с гибкой ошиновкой.

Для расчета тяжений в проводниках гибких шин в момент КЗ принимаем жесткость поперечного сечения проводника

$$(E \cdot S) = E \cdot S / 2,5 = \frac{7 \cdot 10^{10} \cdot 300 \cdot 10^{-6}}{2,5} = 8,4 \cdot 10^6 \text{ Н}.$$

Определим тяжение в проводнике до КЗ по формуле (4.54)

$$F_0 = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f_{np}} = \frac{31,14 \cdot 30^2}{8 \cdot 4,532} = 773 \text{ Н},$$

где  $f_{np} = f_n + l_z \cdot \cos \beta = f_n + N \cdot H_{из} \cdot \cos \beta = 2,5 + 16 \cdot 0,127 \cdot \cos 0^\circ = 4,532 \text{ м}$ .

Максимально возможное тяжение в проводах  $F_{\text{макс1}}$  определяем по формуле (4.52), а максимально возможное тяжение  $F_{\text{макс2}}$  после отключения тока КЗ по формуле (4.55) так как  $t_{\text{отк}} = 0,25 \text{ с} < t_{\text{прод}} = 0,785 \text{ с}$ .

$$F_{\text{макс1}} = \sqrt{2 \cdot (E \cdot S) \cdot \frac{\Delta W_{\kappa}}{l} + F_0^2} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,4 \cdot 10^6 \cdot 30,46}{30} + 773^2} = 4201,8 \text{ Н}.$$

$$\begin{aligned} F_{\text{макс2}} &= F_0 \cdot \text{макс} \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{F_{\text{расч}}^{(2)}}{M_{np} \cdot g} \right)^2}; 1 + 2 \cdot \frac{\Delta W_{\kappa}}{M_{np} \cdot g \cdot L} \right\} = \\ &= 773 \cdot \text{макс} \left\{ \sqrt{1 + \left( \frac{220,4}{49,83 \cdot 9,81} \right)^2}; 1 + 2 \cdot \frac{30,46}{49,83 \cdot 9,81 \cdot 3,021} \right\} = 847,9 \text{ Н}. \end{aligned}$$

Согласно ПУЭ, шины и токопроводы с расщеплёнными фазами, должны проверяться по электродинамическому взаимодействию проводников одной фазы. Для уменьшения усилий между проводами фазы устанавливают дистанционные распорки, расстояние между которыми рассчитывают по формуле (4.56):

$$\begin{aligned} l_p &= k \cdot \sigma_{\text{макс}} \cdot 10^3 \sqrt{\frac{(k-1) \cdot \sigma_{\text{макс}} \cdot 24 \cdot \beta}{(\gamma_{\kappa} + k \cdot \gamma_1) \cdot (\gamma_{\kappa} - k \cdot \gamma_1)}} = 1,8 \cdot 14,006 \cdot 10^3 \times \\ &\times \sqrt{\frac{(1,8-1) \cdot 14,006 \cdot 24 \cdot 159 \cdot 10^{-13}}{(0,327 + 1,8 \cdot 0,026) \cdot (0,327 - 1,8 \cdot 0,026)}} = 5,09 \text{ м}, \end{aligned}$$

где  $k = 1,8$  - коэффициент допустимого увеличения механического напряжения в проводе при КЗ;

$\sigma_{\text{макс}}$  - максимальное напряжение в проводе, МПа;

$\beta = 159 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2 / \text{Н}$  - коэффициент упругого удлинения  
алюминиевого провода;

$\gamma_1$  - удельная нагрузка от собственной массы провода, МПа/м;

$\gamma_\kappa$  - удельная нагрузка от сил взаимодействия при КЗ, МПа/м.

Максимальное напряжение в проводе согласно формуле (4.57)  
равно

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{макс1}}}{n \cdot S} = \frac{4201,8}{2 \cdot 150} = 14,006 \text{ МПа}.$$

Удельная нагрузка на каждый провод от собственного веса

$$\gamma_1 = \frac{9,81 \cdot m}{S} = \frac{9,81 \cdot 0,406}{150} = 0,026 \text{ МПа} / \text{м},$$

где  $m = 0,406 \text{ кг}$  - масса одного метра алюминиевого провода, согласно  
таблице 7.35 [9].

Удельная нагрузка на каждый провод от взаимодействия при КЗ

$$\gamma_\kappa = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot (n-1) \cdot (I_{n,0}^{(3)})^2}{n^2 \cdot S \cdot d} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot (2-1) \cdot 14^2}{2^2 \cdot 150 \cdot 0,2} = 0,327 \text{ МПа} / \text{м}$$

где  $d = 0,2 \text{ м}$  - диаметр токопровода.

Таким образом, между проводниками одной фазы необходимо  
устанавливать внутрифазные распорки на расстоянии не более 5,09 м  
друг от друга.

Проверим выбранные шины по условию коронирования, для  
этого определим начальную критическую напряжённость  
электрического поля по формуле (4.61)

$$E_0 = 30,3 \cdot m \cdot \left( 1 + \frac{0,299}{\sqrt{r_0}} \right) = 30,3 \cdot 0,82 \cdot \left( 1 + \frac{0,299}{\sqrt{1,225}} \right) = 31,56 \text{ кВ} / \text{см}.$$

Определим напряжённость электрического поля вокруг провода  
сборных шин по формуле (4.62)

$$E = \frac{0,354 \cdot U}{r_0 \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r_0}} = \frac{0,354 \cdot 242}{1,225 \cdot \lg \frac{500}{1,225}} = 26,78 \text{ кВ / см} .$$

Проверим выполнение условия (4.60)

$$1,07 \cdot E = 1,07 \cdot 26,78 = 28,65 \text{ кВ / см} > 0,9 \cdot E_0 = 0,9 \cdot 31,56 = 28,4 \text{ кВ / см} ,$$

таким образом, провод марки АС-300/66 по условиям короны не проходит.

Принимаем два провода в фазе марки АС-150 /34,  $S = 300 \text{ мм}^2$ ,  $d = 17,5 \text{ мм}$ ,  $r_0 = 0,875 \text{ см}$ ,  $I_{don} = 2 \cdot 450 = 900 \text{ А}$ , масса одного метра провода  $m = 1,35 \text{ кг}$ , а погонный вес провода  $q_n = 13,24 \text{ Н / м}$ .

Определим начальную критическую напряжённость электрического поля вокруг провода АС-150/34:

$$E_0 = 30,3 \cdot 0,82 \cdot \left( 1 + \frac{0,299}{\sqrt{0,875}} \right) = 32,78 \text{ кВ / см} .$$

Определим напряжённость электрического поля вокруг расщеплённых проводов по формуле (4.63)

$$E = \frac{k \cdot 0,354 \cdot U}{n \cdot r_0 \cdot \lg \frac{D_{cp}}{r_p}} = \frac{1,0875 \cdot 0,354 \cdot 242}{2 \cdot 0,875 \cdot \lg \frac{500}{4,18}} = 25,62 \text{ кВ / см} ,$$

где  $k$  и  $r_p$  согласно формулам, приведенным в таблице 4.22 равны

$$k = 1 + 2 \cdot \frac{r_0}{a} = 1 + 2 \cdot \frac{0,875}{20} = 1,0875 ;$$

$$r_p = \sqrt{r_0 \cdot a} = \sqrt{0,875 \cdot 20} = 4,18 \text{ см} .$$

$$1,07 \cdot E = 1,07 \cdot 25,62 = 27,41 \text{ кВ / см} < 0,9 \cdot E_0 = 0,9 \cdot 32,78 = 29,5 \text{ кВ / см} ,$$

таким образом, два провода марки АС-150/34 по условию короны проходят.

Определим по формуле (4.38) параметр  $p$  для вновь принятых двух проводов в фазе марки АС-150/34

$$p = \frac{1 \cdot (0,87 \cdot 14)^2 \cdot 0,25}{4 \cdot 31,5} = 0,29 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} / \text{Н} < 0,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} / \text{Н} .$$

Таким образом, расчет смещения проводов не выполняем.

Токопровод от выводов 220 кВ блочного трансформатора до сборных шин выбираем по экономической плотности тока для  $T_{\text{макс}}=6500$  час в соответствии с таблицей 4.18  $J_{\text{э}} = 1,0 \text{ А} / \text{мм}^2$ .

$$S_{\text{э}} = \frac{I_{\text{ном}}}{J_{\text{э}}} = \frac{617,5}{1,0} = 617,5 \text{ мм}^2 .$$

Принимаем два провода в фазе марки АС-330/30, сечением  $S = 2 \cdot 330 = 660 \text{ мм}^2$ ,  $d = 24,8 \text{ мм}$ ,  $r_0 = 1,24 \text{ см}$ ,  $I_{\text{дон}} = 2 \cdot 730 = 1460 \text{ А}$ .

Проверим выбранный токопровод по допустимому току

$$I_{\text{макс}} = 650 \text{ А} < I_{\text{дон}} = 1460 \text{ А} .$$

Проверим токопровод по условию коронирования. Определим начальную критическую напряженность электрического поля

$$E_0 = 30,3 \cdot m \cdot \left( 1 + \frac{0,299}{\sqrt{r_0}} \right) = 30,3 \cdot 0,82 \cdot \left( 1 + \frac{0,299}{\sqrt{1,24}} \right) = 30,84 \text{ кВ/см} .$$

Определим напряженность электрического поля вокруг расщеплённых проводов токопровода

$$E = \frac{k \cdot 0,354 \cdot U}{n \cdot r_0 \cdot \lg \frac{D_{\text{ср}}}{r_p}} = \frac{1,124 \cdot 0,354 \cdot 242}{2 \cdot 1,24 \cdot \lg \frac{500}{4,98}} = 19,40 \text{ кВ/см} ,$$

$$\text{где } k = 1 + 2 \cdot \frac{r_0}{a} = 1 + 2 \cdot \frac{1,24}{20} = 1,124 ,$$

$$r_p = \sqrt{r_0 \cdot a} = \sqrt{1,24 \cdot 20} = 4,98 \text{ см} .$$

$$1,07 \cdot E = 1,07 \cdot 19,40 = 20,76 \text{ кВ/см} < 0,9 \cdot E_0 = 0,9 \cdot 30,84 = 27,76 \text{ кВ/см}$$

и поэтому принятый токопровод проходит по условиям короны.

**Пример 4.5** Выбрать число и марку проводов в гибком токопроводе предназначенном для соединения трансформатора ТДЦ-125000/110/10 с распределительным устройством 10 кВ ТЭЦ. Допустимая перегрузка трансформатора 20%,  $T_{\text{макс}} = 5000 \text{ ч}$ ,  $I_{n,0}^{(3)} = 60 \text{ кА}$ , продолжительность КЗ  $t_{\text{отк}} = 4 \text{ с}$ .

Выбираем сечение гибкого токопровода по экономической плотности тока, которая при числе часов  $T_{\text{макс}} = 5000 \text{ ч}$ , согласно таблице 4.18, составляет  $J_{\text{э}} = 1,0 \text{ А/мм}^2$ .

$$I_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{125000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 6873,2 \text{ А},$$

$$I_{\text{макс}} = 1,2 \cdot I_{\text{ном}} = 1,2 \cdot 6873,2 = 8247,84 \text{ А},$$

$$S_{\text{э}} = \frac{I_{\text{ном}}}{J_{\text{э}}} = \frac{6873,2}{1,0} = 6873,2 \text{ мм}^2.$$

Принимаем два несущих провода марки АС-500/64 с  $I_{\text{доп}} = 2 \cdot 945 = 1890 \text{ А}$ , тогда сечение алюминиевых проводов должно быть

$$S_{\text{А}} = S_{\text{э}} - S_{\text{АС}} = 6873,2 - 2 \cdot 500 = 5873,2 \text{ мм}^2.$$

Число алюминиевых проводов марки А-500 равно

$$n = \frac{S_{\text{А}}}{500} = \frac{5873,2}{500} = 11,74.$$

Принимаем к установке гибкий токопровод  $2 \times \text{АС-500/64} + 12 \times \text{А-500}$  диаметром  $d = 200 \text{ мм}$ , с расстоянием между соседними фазами  $D = 4 \text{ м}$ .

Проверим выбранный токопровод по допустимому току

$$I_{\text{доп}} = 2 \cdot 945 + 12 \cdot 980 = 13650 \text{ А} > I_{\text{макс}} = 8247,84 \text{ А}.$$

Определим по формуле (4.38) параметр  $p$

$$p = \frac{\lambda \cdot (I_{n,0}^{(2)})^2 \cdot t_{отк}}{D \cdot q},$$

где  $\lambda$  - безразмерный коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей электродинамической силы. Согласно [2] при  $t_{отк}/T_a = 4/0,1 \succ 4$  можно принимать  $\lambda = 1$ ;

$D$  - расстояние между фазами токопровода, м;

$q$  - погонный вес провода с учетом влияния подвесных гирлянд, Н/м.

Определим погонный вес провода с учетом влияния подвесной гирлянды из изолятора типа ПФ6-Б, параметры которого приведены в таблице 4.23.

$$\begin{aligned} q &= q_n + q_z = g \cdot \left[ (2 \cdot m_{AC} + 12 \cdot m_A + m_K) + \frac{m_{из} \cdot N}{l} \right] = \\ &= 9,81 \cdot \left[ (2 \cdot 1,852 + 12 \cdot 1,378 + 2) + \frac{6 \cdot 1}{20} \right] = 221,12 \text{ Н / м}, \end{aligned}$$

где  $l$  - длина пролета, принятая равной 20 м.

$$p = \frac{1 \cdot (0,87 \cdot 60)^2 \cdot 4}{4 \cdot 221,12} = 12,32 \text{ кА}^2 \cdot \text{с / Н} \succ 0,4 \text{ кА}^2 \cdot \text{с / Н}.$$

В соответствии с условием (4.38) необходимо проводить расчет смещений.

Определим по формуле (4.41) значение  $\omega_0$ , а по формуле (4.42) расчетную электродинамическую нагрузку  $F_{расч}^{(2)}$ , действующую на токопровод при двухфазном КЗ

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{L}} = \sqrt{\frac{9,81}{1,43}} = 2,62 \text{ 1/с},$$

$$L = \frac{2 \cdot f_{np}}{3} = \frac{2 \cdot (f_n + l_z \cdot \cos \beta)}{3} = \frac{2 \cdot (f_n + N \cdot H_{из} \cdot \cos \beta)}{3} =$$

где

$$= \frac{2 \cdot (2,0 + 1 \cdot 0,14 \cdot \cos 0^\circ)}{3} = 1,43 \text{ м}$$

$$f_{np} = f_n + l_z \cdot \cos \beta = f_n + N \cdot H_{из} \cdot \cos \beta = 2,0 + 1 \cdot 0,14 \cdot \cos 0^\circ = 2,14 \text{ м}.$$

$$F_{расч}^{(2)} = 0,2 \cdot \frac{l}{D} \cdot (I_{n,0}^{(2)})^2 \cdot \lambda = 0,2 \cdot \frac{20}{4} \cdot (0,87 \cdot 60)^2 \cdot 1 = 2724,84 \text{ Н}.$$

Определим, по какому из выражений (4.40), (4.45) или (4.46) необходимо рассчитывать горизонтальное смещение проводников фаз токопровода при КЗ. Для этого проверим, какое из условий (4.39), (4.44) или (4.49) выполняется.

Проверим выполнение условия (4.39)

$$t_{прод} = \sqrt{\frac{0,9 \cdot q \cdot l}{\omega_0^2 \cdot F_{расч}^{(2)}}} = \sqrt{\frac{0,9 \cdot 221,12 \cdot 20}{2,62^2 \cdot 2724,84}} = 0,461 \text{ с} < t_{отк} = 4 \text{ с}.$$

Таким образом, условие (4.39) не выполняется.

Определим выполнение остальных условий, для чего рассчитаем отношения  $1,2 \cdot \pi / \omega_0$  и  $\Delta W_\kappa / q \cdot l \cdot L$

$$\frac{1,2 \cdot \pi}{\omega_0} = \frac{1,2 \cdot 3,14}{2,62} = 1,438 \text{ с}.$$

Для определения  $\Delta W_\kappa / q \cdot l \cdot L$  рассчитаем безразмерную продолжительность КЗ  $\tau_{кз}$  по формуле (4.48)

$$\tau_{кз} = \frac{t_{отк} \cdot \omega_0}{2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 2,62}{2 \cdot 3,14} = 1,67.$$

Так как  $\tau_{кз} = 1,67 > 0,6$ , то для определения энергии  $\Delta W_\kappa$ , накопленной токопроводом за расчетное время КЗ, рассчитаем по формуле (4.50) значение  $\Delta W_\kappa^{(2)}$

$$\Delta W_\kappa^{(2)} = F_0^{(2)} \cdot D \cdot \ln \frac{D + 2 \cdot L}{D} = 2724,84 \cdot 4 \cdot \ln \frac{4 + 2 \cdot 1,43}{4} = 5879,26 \text{ Дж}.$$

По кривым, приведенным на рисунке 4.16 по значениям  $F_0^{(2)} / q \cdot l = 2724,84 / 221,12 \cdot 20 = 0,616$  и  $L/D = 1,43/4 = 0,358$ , имеем  $h/D = 0,15$  или  $h = 0,15 \cdot D = 0,15 \cdot 4 = 0,6 \text{ м}$ .

Поскольку  $2 \cdot M_{np} \cdot g \cdot L = 2 \cdot q \cdot l \cdot L = 2 \cdot 221,12 \cdot 20 \cdot 1,43 = 12648,06 \text{ Дж}$  и  $\Delta W_\kappa^{(2)} = 5879,26 \text{ Дж} < 2 \cdot q \cdot l \cdot L = 12648,06 \text{ Дж}$ , то  $\Delta W_\kappa$  рассчитываем по формуле (4.51,б)

$$\Delta W_\kappa = M_{np} \cdot g \cdot h = q \cdot l \cdot h = 221,12 \cdot 20 \cdot 0,6 = 2653,44 \text{ Дж},$$

откуда  $\Delta W_\kappa / q \cdot l \cdot L = 2653,44 / 221,12 \cdot 20 \cdot 1,43 = 0,42$ .

По формуле (4.47) определим расчетный угол отклонения токопровода от равновесного положения

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\Delta W_\kappa}{q \cdot l \cdot L}\right) = \arccos(1 - 0,42) = 55^\circ.$$

Смещение токопровода  $s$  посередине пролета определяем по формуле (4.45)

$$s = f_{np} \cdot \sin \alpha = 2,14 \cdot \sin 55^\circ = 1,75 \text{ м}.$$

Проверим выполнение условия (4.37)

$$D - 2 \cdot (s + r_p) = 4 - 2 \cdot (1,75 + 0,10) = 0,3 \text{ м} > a_{\text{дон, мин}} = 0,2 \text{ м}.$$

Таким образом, после отключения КЗ схлестывания проводников фаз токопровода не произойдет.

Проверим гибкий токопровод по электродинамическому взаимодействию проводников одной фазы. Удельная нагрузка на каждый провод от взаимодействия при КЗ согласно (4.59) равна:

$$\gamma_\kappa = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot (n-1) \cdot (I_{n,0}^{(3)})^2}{n^2 \cdot S \cdot d} = \frac{2 \cdot 10^{-7} \cdot (14-1) \cdot 60^2 \cdot 10^6}{14^2 \cdot 500 \cdot 0,2} = 0,478 \text{ МПа/м}.$$

Удельная нагрузка на каждый алюминиевый провод марки А-500 от собственного веса согласно (4.58) равна:

$$\gamma_1 = \frac{9,81 \cdot m_A}{S} = \frac{9,81 \cdot 1,378}{500} = 0,027 \text{ МПа/м}.$$

Для расчета максимального напряжения в токопроводе  $\sigma_{\text{макс}}$  определим максимально возможное тяжение по формуле (4.52)

$$\begin{aligned} F_{\text{макс}} &= \sqrt{2 \cdot (E \cdot S) \cdot \frac{\Delta W_{\kappa}}{l} + F_0^2} = \sqrt{2 \cdot (E \cdot S) \cdot \frac{\Delta W_{\kappa}}{l} + \left( \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f_{\text{нр}}} \right)^2} = \\ &= \sqrt{2 \cdot (2,8 \cdot 14 \cdot 500 \cdot 10^4) \cdot \frac{2653,44}{20} + \left( \frac{221,12 \cdot 20^2}{8 \cdot 2,14} \right)^2} = 228109,8 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Определим по формуле (4.54) максимальное напряжение в проводе

$$\sigma_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{макс}}}{n \cdot S} = \frac{228109,8}{14 \cdot 500} = 32,59 \text{ МПа}.$$

Определим по формуле (4.56) допустимое расстояние между распорками внутри фазы токопровода:

$$\begin{aligned} l_p &= k \cdot \sigma_{\text{макс}} \cdot 10^3 \sqrt{\frac{(k-1) \cdot \sigma_{\text{макс}} \cdot 24 \cdot \beta}{(\gamma_{\kappa} + k \gamma_1) \cdot (\gamma_{\kappa} - k \gamma_1)}} = \\ &= 1,8 \cdot 32,59 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{(1,8-1) \cdot 32,59 \cdot 24 \cdot 159 \cdot 10^{-13}}{(0,478 + 1,8 \cdot 0,027)(0,478 - 1,8 \cdot 0,027)}} = 12,3 \text{ м}. \end{aligned}$$

Таким образом, в токопроводе необходима установка внутрифазных распорок на расстоянии не более 12,3 м. друг от друга.

## 5 ВЫБОР КАБЕЛЕЙ

### 5.1 Общие сведения

Силовые кабели широко применяются на электрических станциях и подстанциях для питания местной нагрузки от шин ГРУ 6-10 кВ. Механизмы собственных нужд электростанций также получают питание по кабелям напряжением 6 и 0,4 кВ.

В зависимости от класса напряжения, условий и способов прокладки выбираются кабели разных марок, различающиеся материалом и конструкцией жил, изоляцией и защитными покровами. Чтобы обеспечить пожарную безопасность в производственных помещениях электростанций рекомендуется применять кабели, у которых изоляция, оболочка и покрытия выполнены из не воспламеняющихся материалов. В таблице 5.1 приведены различные марки кабелей, рекомендуемые для прокладки в земле и воздухе [13, 14].

Таблица 5.1– Кабели, рекомендуемые для прокладки в земле и воздухе

Область применения	Тип и марки кабелей	
	с бумажной пропитанной изоляцией	с пластмассовой и резиновой изоляцией
В земле (траншеях) с низкой коррозионной активностью:  без блуждающих токов	ААШв, ААШп, ААБл, АСБ, ААл, ААПл, АСПл	АВВГ, АпсВГ

Область применения	Тип и марки кабелей	
	с бумажной пропитанной изоляцией	с пластмассовой и резиновой изоляцией
с наличием блуждающих токов	ААШв, ААШп, ААБл, АСБ, ААП2л, АСПл	-
В земле (траншеях) со средней коррозионной активностью: без блуждающих токов	ААШв, ААШп, ААБл, ААБ2л, АСБ, АСБл, ААл, ААПл, АСП	АПвВГ, АПВГ, АВВБ, АПВБ, АПсВБ, АППБ, АПвВБ, АПАШв, АПБбШв, АПвБбШв, АПАШп, АВБбШп, АПсБбШв, АВАШв,
с наличием блуждающих токов	ААШп, ААШв, ААБ2л, ААБв, АСБл, АСБ2л, ААП2л, АСПл	АВРБ, АНРБ, АВАБл, АПАБл
В земле (траншеях) с высокой коррозионной активностью: без блуждающих токов	ААШп, ААШв, ААБ2л, АСП2л, ААП2лШв, ААБ2лШв, ААБв, ААБ2лШп, АСБл, АСБ2л	АПвВГ, АПВГ, АВВБ, АПВБ, АПсВБ, АППБ, АПвВБ, АПАШв, АПБбШв, АПвБбШв, АПАШп, АВБбШп, АПсБбШв, АВАШв,
с наличием блуждающих токов	ААШп, ААБв, АСБ2л, АСП2л, АСБ2лШп, ААП2лШв	АВРБ, АНРБ, АВАБл, АПАБл

Область применения	Тип и марки кабелей	
	с бумажной пропитанной изоляцией	с пластмассовой и резиновой изоляцией
Прокладка в туннелях, каналах, кабельных полужэтажах, производственных помещениях: сухих	ААГ, ААШв, ААБлГ	АВВГ, АВРГ, АНРГ, АПвВГ, АПВГ, АПсВГ, АВРБГ, АВБбШв, АПсВБГ, АНРБГ
сырых	ААШв, ААБв, ААБлГ	АВВГ, АВРГ, АПсВГ, АНРГ, АСРГ, АВБбШв, АВРБГ, АСРБГ
сырых со средней коррозионной активностью	ААШв, АСШв, ААБвГ, ААБ2лШв, ААБлГ, АСБ2лГ, АСБ2лШв, АСБлГ	
Прокладка в пожароопасных помещениях	ААГ, ААШв, ААБвГ, ААБлГ, АСБлГ	АВВГ, АВРГ, АПсВГ, АНРГ, АСРГ, АВБбШв, АВРБГ, АСРБГ
Прокладка в блоках	СГ, АСГ	АВВГ, АПсВГ, АПвГ, АПВГ

Кабели выбираются:

по напряжению установки

$$U_{уст} \leq U_{ном}, \quad (5.1)$$

по экономической плотности тока

$$q_{\circ} = \frac{I_{\text{раб,норм}}}{J_{\circ}}, \quad (5.2)$$

где  $J_{\circ}$  – экономическая плотность тока таблица 4.18;

по допустимому току, таблица 5.2

$$I_{\text{макс}} \leq I_{\text{доп,ном}}, \quad (5.3)$$

по конструкции, согласно таблице 5.1.

Таблица 5.2 - Допустимые длительные токи и расчетные характеристики кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной пропитанной маслоканифольной и нестекающей массами изоляцией в свинцовой и алюминиевой оболочке.

Сечение токопро- водящей жилы, мм <sup>2</sup>	Активное сопротив- ление $r_0, \text{Ом/км}$	$U_{\text{ном}} = 6\text{кВ}$			$U_{\text{ном}} = 10\text{кВ}$		
		$I_{\text{доп,ном}}, \text{А}$		$x_0, \text{Ом/км}$	$I_{\text{доп,ном}}, \text{А}$		$x_0, \text{Ом/км}$
		в зем- ле	в воз- духе		в зем- ле	в воз- духе	
10	3,100	60	42	0,110	-	-	-
16	1,940	80	50	0,102	75	46	0,113
25	1,240	105	70	0,091	90	65	0,099
35	0,890	125	85	0,087	115	80	0,095
50	0,620	155	110	0,083	140	105	0,090
70	0,443	190	135	0,080	165	130	0,086
95	0,326	225	165	0,078	205	155	0,083
120	0,258	260	190	0,076	240	185	0,081
150	0,206	300	225	0,074	275	210	0,079
185	0,167	340	250	0,073	310	235	0,077
240	0,129	390	290	0,071	355	270	0,075

Выбранные по нормальному режиму кабели проверяют на термическую стойкость по условию (1.12) или (4.3).

При этом кабели небольшой длины проверяются по току  $K_3$  в начале кабеля; одиночные кабели со ступенчатым сечением по длине проверяются по току  $K_3$  в начале каждого участка. Два и более параллельно включенных кабелей проверяются по токам  $K_3$  непосредственно за пучком, т.е. с учетом разветвления тока  $K_3$  [ 3] .

## 5.2 Выбор кабелей по допустимому току

Таблицы длительно допустимых токов для кабелей стандартных сечений составлены для случаев прокладки одиночного кабеля в земле, при температуре почвы  $+15^{\circ}\text{C}$ , и для одиночного кабеля , проложено на открытом воздухе ,при температуре воздуха  $+25^{\circ}\text{C}$  [3,9].

В том случае, когда условия прокладки и охлаждения кабелей отличаются от принятых, вводятся поправочные коэффициенты на число рядом проложенных в земле кабелей  $k_1$  , таблица 5.3 и на температуру окружающей среды  $k_2$  , таблица 5.4.

Таблица 5.3 - Поправочный коэффициент  $k_1$  на количество работающих кабелей, лежащих рядом в земле.

Расстояние между кабелями в свету, мм	Коэффициент при количестве кабелей					
	1	2	3	4	5	6
100	1,00	0,90	0,85	0,80	0,78	0,75
200	1,00	0,92	0,87	0,84	0,82	0,81
300	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	0,85

Таблица 5.4 - Поправочные коэффициенты на токи кабелей и шин в зависимости от температуры земли и воздуха.

Условная температура среды, °C	Нормированная температура жил, °C	Поправочные коэффициенты на токи при расчетной температуре среды, °C											
		-5 и ниже	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
15	80	1,14	1,11	1,08	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,88	0,78	0,73	0,68
25	80	1,24	1,20	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74
25	70	1,29	1,24	1,20	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67
15	65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55
25	65	1,32	1,27	1,22	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61
15	60	1,20	1,15	1,12	1,06	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67	0,57	0,47
25	60	1,36	1,31	1,25	1,20	1,13	1,07	1,00	0,93	0,85	0,76	0,66	0,54
15	55	1,22	1,17	1,12	1,07	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,61	0,50	0,36
25	55	1,41	1,35	1,29	1,23	1,15	1,08	1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41
15	50	1,25	1,20	1,14	1,07	1,00	0,93	0,84	0,76	0,66	0,54	0,37	
25	50	1,48	1,41	1,34	1,26	1,18	1,09	1,00	0,89	0,78	0,63	0,45	

Таким образом, условие выбора кабеля по допустимому току имеет вид

$$I'_{доп} = n \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot I_{доп,ном} \geq I_{макс}, \quad (5.4)$$

где  $n$  - количество параллельно работающих кабелей;

$I_{доп,ном}$  - допустимый ток одного кабеля.

Если потребители питаются по нескольким параллельным кабелям, то выбор кабелей необходимо производить по утяжеленному режиму, когда один из кабелей отключен, т.е.

$$I''_{доп} = k_{a,n} \cdot (n-1) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot I_{доп,ном} \geq I_{макс}, \quad (5.5)$$

где  $k_{a,n} = f(k_{n,n}, t_{макс})$  - коэффициент аварийной перегрузки кабеля, который для кабелей с бумажной изоляцией берётся из таблицы 5.5.

Таблица 5.5 - Допустимые перегрузки кабелей с бумажной изоляцией напряжением до 10 кВ в аварийных режимах.

Коэффициент предварительной нагрузки, $k_{n,n} = I_{норм} / I_{доп}$	Вид прокладки кабеля	Допустимая перегрузка по отношению к номинальной при длительности максимума $t_{макс}$ , ч		
		1	3	6
0,6	В земле	1,35	1,30	1,15
	В воздухе	1,25	1,15	1,10
	В трубах в земле	1,20	1,10	1,00
0,8	В земле	1,20	1,15	1,10
	В воздухе	1,15	1,10	1,05
	В трубах в земле	1,10	1,05	1,00

Если применяются кабели с полиэтиленовой изоляцией, то на время ликвидации послеаварийного режима допускается их перегрузка до 10%. Для кабелей с поливинилхлоридной изоляцией допускается перегрузка до 15% от номинальной. При этом указанная перегрузка кабелей допускается на время максимумов нагрузки продолжительностью не более 6ч в сутки в течение 5 суток, если нагрузка в остальные периоды времени не превышает номинальной [3].

### 5.3 Примеры выбора и проверки кабелей

**Пример 5.1** Выбрать кабель для питания электродвигателя собственных нужд ВАО 630М6 с  $P_{ном} = 630 \text{ кВт}$ ,  $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$ ,  $I_{ном} = 70 \text{ А}$ ,  $\cos \varphi = 0,87$ . Кабель прокладывается внутри сырого канала с температурой окружающего воздуха  $\vartheta_o = 30^\circ \text{С}$ .  $T_{макс} = 4200 \text{ ч}$ . Начальное значение периодической составляющей тока КЗ от внешней сети  $I_{н,0,с} = 13,5 \text{ кА}$ , а от эквивалентного электродвигателя  $I_{н,0,д} = 8,6 \text{ кА}$ . В цепи кабеля установлен выключатель ВМП-10-320 с  $I_{отк,ном} = 20 \text{ кА}$ . Полное время отключения КЗ  $t_{отк} = 0,22 \text{ с}$ .

Для питания электродвигателя, согласно таблице 5.1, принимаем трехжильный кабель марки ААШв,  $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$ .

Экономическое сечение кабеля равно

$$q_3 = \frac{I_{ном}}{J_3} = \frac{70}{1,4} = 50 \text{ мм}^2,$$

где  $J_3 = 1,4 \text{ А/мм}^2$  для кабелей с бумажной изоляцией и алюминиевыми жилами,  $T_{макс} = 4200 \text{ ч}$ , согласно таблице 4.18.

Окончательно принимаем трехжильный кабель ААШв 3х50 мм<sup>2</sup>

с  $I_{доп,ном} = 110 \text{ A}$ , в соответствии с таблицей 5.2.

Определим допустимый ток кабеля с учетом поправочного коэффициента  $k_2$  на температуру окружающего воздуха.

Согласно таблице 5.4, для температуры окружающей среды  $\vartheta_o = 30^\circ \text{C}$  и нормированной температуре жил  $65^\circ \text{C}$ , коэффициент  $k_2 = 0,94$ .

$$I_{доп} = k_2 \cdot I_{доп,ном} = 0,94 \cdot 110 = 103,4 \text{ A} > 70 \text{ A}.$$

Для проверки кабеля на термическую стойкость определим квадратичный импульс тока КЗ  $B_K$ . Согласно [2], при  $t_{отк} \geq 3 \cdot T_{a,\partial}$ , квадратичный импульс тока КЗ определяется по выражению

$$B_K = \left( I_{n,0,c}^2 + 2 \cdot I_{n,0,c} \cdot I_{n,0,\partial} \cdot Q_{*K,\partial} + I_{n,0,\partial}^2 \cdot B_{*K,\partial} \right) \cdot t_{отк} + I_{n,0,c}^2 \cdot T_{a,c} + I_{n,0,\partial}^2 \cdot T_{a,\partial} + \\ + \frac{4 \cdot I_{n,0,c} \cdot I_{n,0,\partial} \cdot T_{a,c} \cdot T_{a,\partial}}{T_{a,c} + T_{a,\partial}},$$

где  $T_{a,\partial} = 0,04 \text{ c}$  - постоянная времени апериодической составляющей тока эквивалентного электродвигателя, которая принимается в соответствии с [1];

$T_{a,c} = 0,05 \text{ c}$  - постоянная времени апериодической составляющей тока внешней сети, которая принимается в соответствии с таблицей 1.1;

$B_{*K,\partial}$  - относительный тепловой импульс тока КЗ от периодической составляющей тока эквивалентного электродвигателя определяемый по кривой рисунка 1.3,а;

$Q_{*K,\partial}$  - относительный токовый импульс от эквивалентного электродвигателя, который определяется по кривым рисунка 1.3,б.

Для момента времени отключения КЗ  $t_{отк} = 0,22 \text{ c}$  по кривым рисунка 1.3 имеем  $B_{*K,\partial} = 0,11$ ;  $Q_{*K,\partial} = 0,21$ . Тогда квадратичный импульс

тока КЗ равен

$$B_{\kappa} = (13,5^2 + 2 \cdot 13,5 \cdot 8,6 \cdot 0,21 + 8,6^2 \cdot 0,11) \cdot 0,22 + 13,5^2 \cdot 0,05 + 8,6^2 \cdot 0,04 + \\ + \frac{4 \cdot 13,5 \cdot 8,6 \cdot 0,05 \cdot 0,04}{0,05 + 0,04} = 75 \kappa A^2 \cdot c.$$

Минимальное сечение кабеля по термической стойкости согласно (4.6)

$$q_{\min} = \frac{\sqrt{B_{\kappa}}}{C} = \frac{\sqrt{75 \cdot 10^6}}{90} = 96,23 \text{ мм}^2,$$

где  $C = 90 A \cdot c^{0,5} / \text{мм}^2$  по таблице 4.2 для кабелей с алюминиевыми жилами напряжением до 10 кВ.

Так как  $q_{\min} = 96,23 \text{ мм}^2 > q_0 = 50 \text{ мм}^2$ , то принимаем к установке кабель сечением  $120 \text{ мм}^2$ .

**Пример 5.2** Выбрать кабель для питания потребителя с максимальной нагрузкой  $P_{\max} = 3500 \text{ кВт}$  при напряжении  $U_{\text{ном}} = 6 \text{ кВ}$  и  $\cos \varphi = 0,85$ . В нормальном режиме работы питание потребителя осуществляется по двум кабелям, длиной 100 м каждый, резервирующими друг друга и проложенными в земле в одной траншее. Температура почвы  $\vartheta_0 = +20^\circ \text{C}$ . Продолжительность использования максимума нагрузки  $T_{\max} = 5800 \text{ ч}$ . В течение суток максимальная нагрузка продолжается 3 ч. Ток КЗ на шинах 6 кВ, к которым подключены кабели  $I_{\text{н},0} = 11,2 \text{ кА}$ . Время отключения КЗ  $t_{\text{отк}} = 1,2 \text{ с}$ .

Определим рабочий ток в каждом кабеле в нормальном режиме работы:

$$I_{\text{раб,ном}} = \frac{P_{\max}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi} = \frac{3500}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 6 \cdot 0,85} = 198,1 \text{ А}.$$

При  $T_{\text{макс}} = 5800 \text{ ч}$ , согласно таблицы 4.18, для кабелей с бумажной изоляцией и алюминиевыми жилами  $J_9 = 1,2 \text{ А/мм}^2$ .

Экономическое сечение каждого из кабелей равно

$$q_9 = \frac{I_{\text{раб,ном}}}{J_9} = \frac{198,1}{1,2} = 165,1 \text{ мм}^2.$$

Принимаем, в соответствии с таблицей 5.1, два трехжильных кабеля марки ААШв  $3 \times 185 \text{ мм}^2$  с  $I_{\text{доп,ном}} = 340 \text{ А}$  при температуре почвы  $+15^\circ\text{C}$ , согласно таблицы 5.2.

Определим действительный допустимый ток кабеля с учетом поправочного коэффициента  $k_2$  на температуру почвы и коэффициента  $k_1$ , учитывающего число рядом проложенных кабелей. Для температуры почвы  $+20^\circ\text{C}$  и нормированной температуры жил кабеля  $+65^\circ\text{C}$  поправочный коэффициент  $k_2$  согласно таблице 5.4 равен 0,95. Коэффициент  $k_1$ , учитывающий число рядом проложенных кабелей, согласно таблицы 5.3, равен 0,92 при расстоянии между кабелями в свету 200 мм.

$$I'_{\text{доп}} = k_1 \cdot k_2 \cdot I_{\text{доп,ном}} = 0,92 \cdot 0,95 \cdot 340 = 297,2 \text{ А} > I_{\text{раб,ном}} = 198,1 \text{ А}.$$

При отключении одного кабеля в другом кабеле будет протекать ток равный

$$I_{\text{форс}} = 2 \cdot I_{\text{раб,ном}} = 2 \cdot 198,1 = 396,2 \text{ А}.$$

Допустимый ток одного кабеля с учетом аварийной перегрузки определим по формуле (5.5)

$$I''_{\text{доп}} = k_{a,n} \cdot (n-1) \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot I_{\text{доп,ном}},$$

где  $k_{a,n}$  — коэффициент аварийной перегрузки кабеля, который определяется по таблице 5.5 для  $t_{\text{макс}} = 3 \text{ ч}$  и коэффициента предварительной нагрузки кабеля

$$k_{n,n} = \frac{I_{\text{раб,ном}}}{I'_{\text{доп}}} = \frac{198,1}{297,2} = 0,67.$$

Для кабеля проложенного в земле при коэффициенте  $k_{n,n} = 0,8$  и  $t_{\text{макс}} = 3 \text{ ч}$  коэффициент аварийной перегрузки  $k_{a,n} = 1,15$ .

Фактическая перегрузка в часы максимума в форсированном режиме составляет

$$k_{n,\phi} = \frac{I_{\text{форс}}}{I'_{\text{доп}}} = \frac{396,2}{297,2} = 1,33.$$

Таким образом, кабель сечением  $3 \times 185 \text{ мм}^2$  не удовлетворяет условию нагрева в форсированном режиме.

Принимаем, согласно таблицы 5.2, два кабеля сечением  $3 \times 240 \text{ мм}^2$  с допустимым током каждого кабеля  $I_{\text{доп}} = 390 \text{ А}$ .

Действительный допустимый ток одного кабеля с учетом поправочных коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  составляет

$$I''_{\text{доп}} = 0,92 \cdot 0,95 \cdot 390 = 340,9 \text{ А} > I_{\text{доп,ном}} = 198,1 \text{ А}.$$

Коэффициент предварительной нагрузки кабеля равен

$$k_{n,n} = \frac{198,1}{340,9} = 0,58.$$

Для  $k_{n,n} = 0,6$  и  $t_{\text{макс}} = 3 \text{ ч}$  согласно таблицы 5.5 коэффициент аварийной перегрузки  $k_{a,n} = 1,3$ .

Фактическая перегрузка в часы максимума в форсированном режиме составляет

$$k_{n,\phi} = \frac{I_{\text{форс}}}{I''_{\text{доп}}} = \frac{396,2}{340,9} = 1,16,$$

что меньше допустимой перегрузки.

Окончательно принимаем для питания потребителя два кабеля типа ААШв  $3 \times 240 \text{ мм}^2$ .

Для проверки кабеля на термическую стойкость определим, согласно [3], ток КЗ за пучком из двух кабелей.

Результирующее сопротивление до шин 6 кВ, от которых питается по выбранным кабелям потребитель, составляет

$$x_{рез} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{n,0}} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 11,2} = 0,3247 \text{ Ом}.$$

Индуктивное и активное сопротивления кабелей равны

$$x_{\kappa} = x_0 \cdot l = 0,071 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 0,0071 \text{ Ом};$$

$$r_{\kappa} = r_0 \cdot l = 0,129 \cdot 100 \cdot 10^{-3} = 0,0129 \text{ Ом},$$

где  $x_0$  и  $r_0$  берутся из таблицы 5.2.

С учётом параллельного соединения кабелей полное результирующее сопротивление до места КЗ равно

$$z_{рез} = \sqrt{(x_{рез} + x_{\kappa}/2)^2 + (r_{\kappa}/2)^2} = \sqrt{(0,3247 + 0,0071/2)^2 + (0,0129/2)^2} = 0,3283 \text{ Ом}.$$

Ток КЗ за пучком кабелей равен

$$I_{n,0} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot z_{рез}} = \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,3283} = 11,08 \text{ кА}.$$

По каждому кабелю протекает ток КЗ равный 5,54 кА.

Тепловой импульс тока КЗ при этом равен

$$B_{\kappa} = I_{n,0}^2 \cdot (t_{отк} + T_a) = 5,54^2 \cdot (1,2 + 0,03) = 37,75 \text{ кА}^2 \cdot \text{с}.$$

Минимальное сечение кабеля по термической стойкости

$$q_{мин} = \frac{\sqrt{B_{\kappa}}}{C} = \frac{\sqrt{37,75 \cdot 10^6}}{90} = 68,27 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, принятые к установке кабели ААШв 3×240 мм<sup>2</sup> термически стойкие.

## 6 ВЫБОР ТОКООГРАНИЧИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ

### 6.1 Расчетные условия для выбора и проверки токоограничивающих реакторов

Реакторы служат для ограничения токов КЗ в электроустановках напряжением 6-10 кВ, а также позволяют поддерживать на шинах подстанции или электростанции определённый уровень напряжения при повреждениях за реакторами [14]. В электроустановках применяются как линейные, так и секционные реакторы. В качестве линейных реакторов могут применяться как одинарные, так и сдвоенные реакторы, схемы включения реакторов приведены на рисунке 6.1.

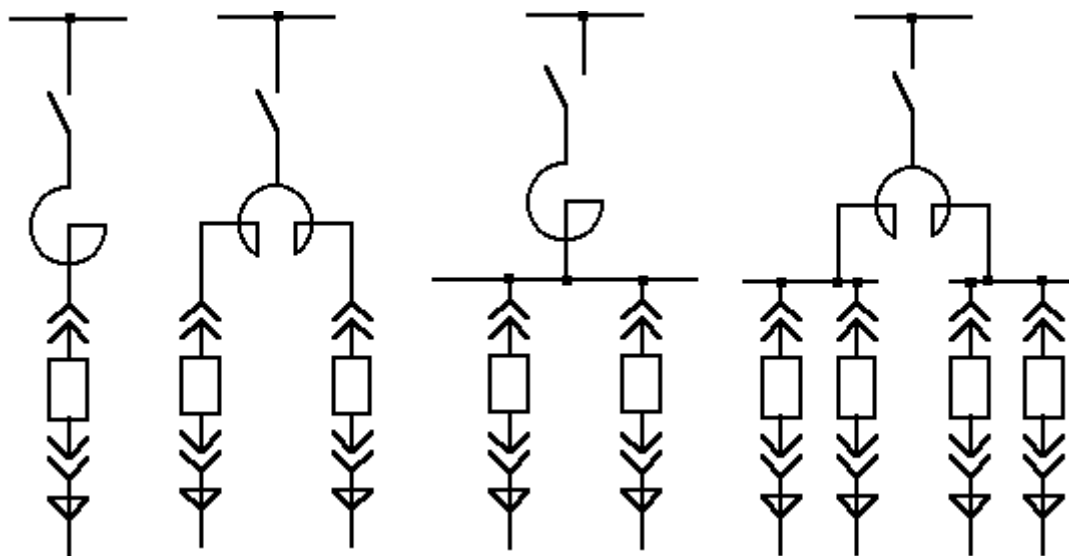


Рисунок 6.1 – Схемы включения линейных реакторов

Линейные реакторы широко применяются на электростанциях как для питания потребителей собственных нужд на ТЭЦ, так и питания потребителей промышленных предприятий. На подстанциях линейные реакторы применяются для питания потребителей.

Секционные реакторы применяются на ТЭЦ для ограничения тока КЗ на шинах генераторного распределительного устройства напряжением 6-10 кВ.

Токоограничивающие реакторы выбираются по номинальному напряжению, номинальному току, номинальному индуктивному сопротивлению. Номинальное напряжение реактора выбирается таким образом, чтобы выполнялось условие

$$U_{уст} \leq U_{ном}. \quad (6.1)$$

Номинальный ток одинарного реактора или одной ветви сдвоенного реактора, используемого в качестве линейного, должен быть таким, чтобы выполнялось условие

$$I_{ном} \geq I_{макс}. \quad (6.2)$$

Номинальный ток секционного реактора должен соответствовать наибольшей мощности, передаваемой от секции к секции в следующих режимах: нормальном или аварийном, при отключении одного трансформатора связи или самого мощного генератора, подключенного к шинам ГРУ. Обычно принимают  $I_{р,ном} \geq 0,7 \cdot I_{г,ном}$ .

Индуктивное сопротивление линейного реактора определяется исходя из следующих двух условий: ограничения тока КЗ до величины номинального тока отключения выключателя  $I_{отк,ном}$  или тока термической стойкости кабеля  $I_T$ , присоединенного к сборным шинам ГРУ электростанции или подстанции. Сопротивление реактора должно быть таким, чтобы выполнялись условия

$$I_{п,0} \leq I_{отк,ном} \quad (6.3)$$

или

$$I_{n,0} \leq I_T = \frac{S \cdot C \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t_{отк} + T_a}}, \quad (6.4)$$

где  $S$  - сечение кабеля, присоединенного к шинам ГРУ электростанции или подстанции.

Из двух значений определяемых выражениями (6.3) и (6.4) следует выбрать меньшее значение.

Требуемое сопротивление цепи для ограничения тока КЗ до величины  $I_{n,0,тр\epsilon б}$  равно

$$x_{рез}^{тр\epsilon б} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{n,0,тр\epsilon б}}. \quad (6.5)$$

Требуемое сопротивление реактора равно

$$x_p^{тр\epsilon б} = x_{рез}^{тр\epsilon б} - x_{рез}, \quad (6.6)$$

где  $x_{рез}$  - результирующее сопротивление цепи КЗ до установки реактора, которое определяется по выражению

$$x_{рез} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{n,0}}.$$

После расчета  $x_p^{тр\epsilon б}$  выбирают тип реактора с большим ближайшим индуктивным сопротивлением и рассчитывают действительное значение периодической составляющей тока КЗ за реактором.

Сопротивление секционного реактора выбирается из условий наиболее эффективного ограничения токов КЗ [1,5]. Обычно сопротивление секционного реактора принимается таким, чтобы падение напряжения на реакторе при протекании по нему номинального тока было не более  $(0,08 \div 0,12) \cdot U_{ном}$ , т.е.

$$\frac{\sqrt{3} \cdot x_p \cdot I_{ном}}{U_{ном}} = 0,08 \div 0,12. \quad (6.7)$$

Выбранный реактор необходимо проверить на электродинамическую и термическую стойкость при протекании через него тока КЗ.

Реактор будет электродинамически стойким, если выполняется условие

$$i_{дин} \geq i_y, \quad (6.8)$$

где  $i_y$  - ударный ток трехфазного КЗ за реактором;

$i_{дин}$  - ток электродинамической стойкости реактора.

Проверка реактора на термическую стойкость проводится по условию

$$B_k \leq B_{тер, доп}, \quad (6.9)$$

где  $B_k$  - расчетный импульс квадратичного тока при КЗ за реактором;

$B_{тер, доп}$  - допустимый импульс квадратичного тока КЗ для проверяемого реактора, который определяется по формулам (1.21) или (1.22).

Необходимо также определить потерю напряжения  $\varepsilon\%$  в реакторе в нормальном и утяжеленном режимах и остаточное напряжение  $U_{ост}\%$  на шинах ГРУ электростанции или подстанции при КЗ за реактором.

Потеря напряжения в реакторе определяется по выражениям:

для одинарного реактора

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3} \cdot x_p \cdot I \cdot 100 \cdot \sin \varphi}{U_{ном}}, \quad (6.10)$$

для сдвоенного реактора

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3} \cdot x_p \cdot (1 - k_{св}) \cdot I \cdot 100 \cdot \sin \varphi}{U_{ном}}, \quad (6.11)$$

где  $I$  – ток, протекающий через реактор;

$k_{св}$  - коэффициент связи сдвоенного реактора;

$U_{ном}$  - номинальное напряжение установки, где используется реактор.

Допустимая потеря напряжения в нормальном режиме не должна превышать  $1,5 \div 2,0\%$ , а в утяжеленном режиме -  $3 \div 4\%$ .

Остаточное напряжение на шинах генераторного распределительного устройства при КЗ за реактором определяется по формуле:

$$U_{ост} \% = \frac{\sqrt{3} \cdot x_p \cdot I_{n,0} \cdot 100}{U_{ном}}, \quad (6.12)$$

где  $I_{n,0}$  - периодическая составляющая трехфазного тока КЗ за реактором.

Остаточное напряжение на шинах ГРУ при КЗ за реактором должно быть не менее  $65 \div 70\%$  от номинального значения.

## 6.2 Примеры выбора и проверки токоограничивающих реакторов

**Пример 6.1** Выбрать групповой линейный реактор для ограничения тока КЗ в распределительной сети 10 кВ, присоединенной к сборным шинам ТЭЦ. Распределительная сеть состоит из шести кабельных линий сечением  $3 \times 150 \text{ мм}^2$  каждая. Максимальный ток продолжительного режима работы для каждой линии  $I_{макс} = 255 \text{ А}$ . Ток КЗ на шинах ГРУ составляет  $I_{n,0} = 45 \text{ кА}$ . На отходящих кабельных линиях установлены выключатели типа ВМП-10К с током отключения  $I_{отк,ном} = 20 \text{ кА}$ . Полное время отключения КЗ  $t_{отк} = 1,5 \text{ с}$ . Коэффициент мощности потребителя  $\cos \varphi = 0,87$ .

Намечаем к установке сдвоенный реактор на номинальное напряжение 10кВ. К каждой ветви реактора подключено по три линии и поэтому ток каждой ветви составляет

$$I_{ветви} = 3 \cdot 255 = 765 \text{ A}.$$

Выбираем реактор на номинальный ток ветви 1000 А

$$I_{ном} = 1000 \text{ A} > I_{ветви} = 765 \text{ A}.$$

Определяем результирующее сопротивление цепи КЗ при отсутствии реактора

$$x_{рез} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{н,0}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 45} = 0,134 \text{ Ом}.$$

Определяем допустимое значение тока КЗ в распределительной сети. Ток термической стойкости кабеля сечением  $3 \times 150 \text{ мм}^2$  при полном времени отключения  $t_{отк} = 1,5 \text{ с}$  составляет в соответствии с (6.4)

$$I_T = \frac{S \cdot C \cdot 10^{-3}}{\sqrt{t_{отк} + T_a}} = \frac{150 \cdot 100 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{1,5 + 0,23}} = 11,4 \text{ кА},$$

где  $C = 100 \text{ A} \cdot \text{с}^{0,5} / \text{мм}^2$  в соответствии с таблицей 4.2;

$T_a = 0,23 \text{ с}$  - для ветвей, защищенных реакторами с номинальным током 1000 А и выше, согласно таблице 1.1 .

В цепи кабельных линий установлены выключатели типа ВМП-10К с номинальным током отключения  $I_{отк,ном} = 20 \text{ кА}$  . Следовательно, параметры реактора определяются требованием термической стойкости кабеля.

Требуемое результирующее сопротивление цепи КЗ, исходя из допустимого значения тока КЗ 11,4 кА, должно быть не менее

$$x_{рез}^{треб} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_T} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 11,4} = 0,532 \text{ Ом}.$$

Требуемое сопротивление реактора для ограничения тока КЗ

$$x_p^{тр\epsilon\delta} = x_{рез}^{тр\epsilon\delta} - x_{рез} = 0,532 - 0,134 = 0,398 \text{ Ом}.$$

Выбираем окончательно реактор типа РБСГ-10-2х1000-0,45У3 с параметрами  $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ ,  $I_{ном} = 1000 \text{ А}$ ,  $x_p = 0,45 \text{ Ом}$ ,  $k_{св} = 0,49$ ,  $i_{дин} = 29 \text{ кА}$ ,  $I_T = 11,4 \text{ кА}$ ,  $t_T = 8 \text{ с}$ .

Результирующее сопротивление цепи КЗ с учетом реактора

$$x'_{рез} = x_{рез} + x_p = 0,134 + 0,45 = 0,584 \text{ Ом}.$$

Фактическое значение периодической составляющей тока КЗ за реактором

$$I_{n,0} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot x'_{рез}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 0,584} = 10,38 \text{ кА}.$$

Проверим выбранный реактор на электродинамическую и термическую стойкость:

$$i_{дин} = 29 \text{ кА} \succ i_y = \sqrt{2} \cdot I_{n,0} \cdot k_y = \sqrt{2} \cdot 10,38 \cdot 1,956 = 28,71 \text{ кА},$$

т.е. реактор электродинамически стойкий.

Допустимое для реактора значение термического импульса  $B_{тер, доп}$  при  $t_{отк} = 1,5 \text{ с} \prec t_T = 8 \text{ с}$  определяем по выражению (1.22). Таким образом

$$B_k = I_{n,0}^2 \cdot (t_{отк} + T_a) = 10,38^2 \cdot (1,5 + 0,23) = 186,40 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} \prec B_{тер, доп} = I_T^2 \cdot t_{отк} = 11,4^2 \cdot 1,5 = 194,94 \text{ кА}^2 \cdot \text{с},$$

т.е. выбранный реактор термически стойкий.

Определим потерю напряжения в реакторе по выражению (6.11)

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\sqrt{3} \cdot x_p \cdot (1 - k_{св}) \cdot I \cdot 100 \cdot \sin \varphi}{U_{ном}} = \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot 0,45 \cdot (1 - 0,49) \cdot 3 \cdot 0,255 \cdot 100 \cdot 0,493}{10,5} = 1,428\%, \end{aligned}$$

что меньше допустимого значения  $1,5 \div 2,0 \%$ .

Остаточное напряжение на шинах ГРУ при КЗ за реактором согласно (6.12) составляет

$$U_{ост} \% = \frac{\sqrt{3} \cdot x_p \cdot I_{n,0} \cdot 100}{U_{ном}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,45 \cdot 10,38 \cdot 100}{10,5} = 77,05\% ,$$

что лежит в пределах нормы .

Таким образом, выбранный реактор удовлетворяет всем предъявляемым требованиям.

**Пример 6.2** Выбрать тип сдвоенных реакторов на вторичной стороне понижающих трансформаторов типа ТД-40000/110/10,5. Трансформаторы работают раздельно. В распределительном устройстве ток КЗ не должен превышать 12 кА. Коэффициент аварийной перегрузки трансформатора при отключении второго трансформатора 1,25 .

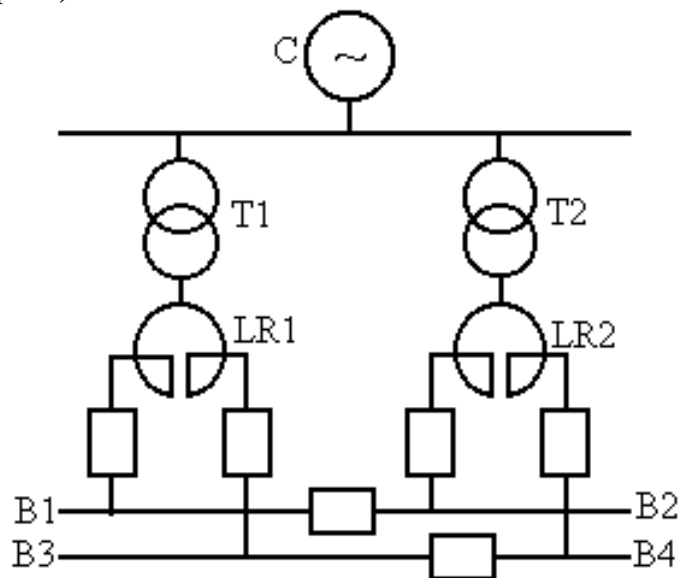


Рисунок 6.2-Схема подстанции

Номинальное напряжение реактора  $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$  . Определим расчетный ток ветви сдвоенного реактора при отключении одного

трансформатора.

$$I_{\text{макс}} = \frac{k_{\text{ав}} \cdot S_{\text{ном}}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{1,25 \cdot 40000}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot 10} = 1443,4 \text{ А}.$$

Принимаем к установке реактор с номинальным током ветви  $I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}$ .

Сопротивление реактора определим из условия ограничения тока КЗ до величины  $I_{\text{н},0} = 12 \text{ кА}$ . За базисные величины принимаем номинальный ток и номинальное напряжение реактор.

Результирующее сопротивление цепи КЗ с учетом ограничения тока КЗ до значения  $I_{\text{н},0} = 12 \text{ кА}$  равно

$$x_{\text{рез}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{ном}}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 12} = 0,481 \text{ Ом}.$$

Требуемое сопротивление реактора для ограничения тока КЗ равно

$$x_p^{\text{треб}} = x_{\text{рез}} - x_m = 0,481 - 0,2625 = 0,2185 \text{ Ом},$$

$$\text{где } x_m = \frac{u_{\text{к}} \% \cdot U_{\text{б}}^2}{100 \cdot S_{\text{ном}}} = \frac{10,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 40} = 0,2625 \text{ Ом}.$$

Принимаем к установке сдвоенный реактор типа РБСД-10-2х1600-0,25УЗ с параметрами  $U_{\text{ном}} = 10 \text{ кВ}$ ,  $I_{\text{ном}} = 1600 \text{ А}$ ,  $x_p = 0,25 \text{ Ом}$ .

Результирующее сопротивление цепи КЗ с учетом реактора равно

$$x'_{\text{рез}} = x_p + x_m = 0,25 + 0,2625 = 0,5125 \text{ Ом}.$$

Фактическое значение периодической составляющей тока КЗ за реактором равно

$$I_{\text{н},0} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot x_{\text{рез}}} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,5125} = 11,27 \text{ кА} < 12 \text{ кА}.$$

Таким образом, выбранный реактор удовлетворяет условию ограничению тока КЗ.

**Пример 6.3** Для схемы ТЭЦ, представленной на рисунке 6.3, выбрать секционные реакторы и определить потери напряжения в них в нормальном режиме работы. К шинам ГРУ подключено 4 генератора мощностью по 63 МВт. Графики нагрузок генераторов и потребителей равные:  $P_{г, макс} = 252 \text{ МВт}$ ,  $P_{потр, макс} = 150 \text{ МВт}$ . Расход электроэнергии на собственные нужды составляет 10% от мощности станции. Коэффициент мощности генераторов и потребителей равен 0,8. Нагрузка по секциям распределена равномерно.

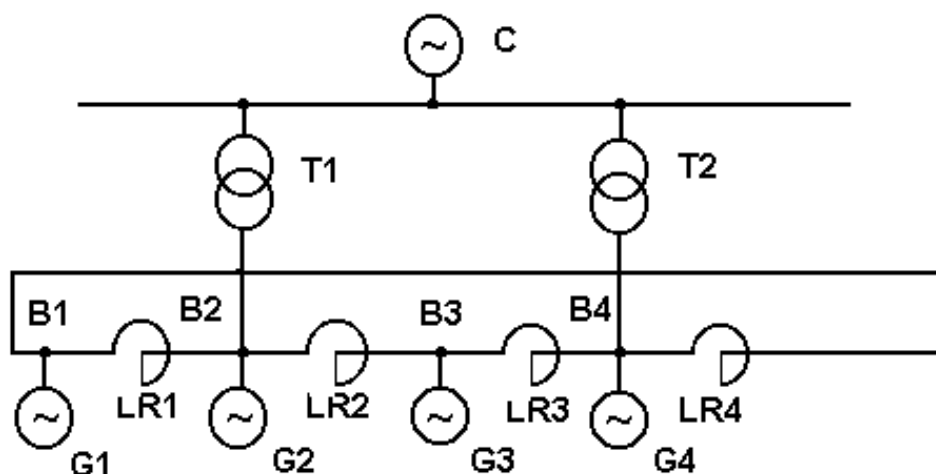


Рисунок 6.3 – Схема ТЭЦ

Рассчитаем мощности, протекающие через реакторы в нормальном режиме, при отключении одного генератора, при отключении одного трансформатора и при разрыве кольца.

В нормальном режиме работы через каждый секционный реактор протекает мощность

$$P_{LR1} = P_{LR2} = P_{LR3} = P_{LR4} = \frac{P_{г} - P_{потр} - P_{CH}}{2} = \frac{63 - 37,5 - 6,3}{2} = 9,6 \text{ МВт}.$$

При отключении одного генератора через каждый секционный реактор протекает мощность

$$P_{LR1} = P_{LR2} = P_{LR3} = P_{LR4} = \frac{P_{номп} + P_{CH}}{2} = \frac{37,5 + 6,3}{2} = 21,9 \text{ MBm} .$$

При отключении одного трансформатора, например Т1, через каждый секционный реактор протекает мощность

$$P_{LR1} = P_{LR2} = \frac{P_{\varepsilon} - P_{номп} - P_{CH}}{2} = \frac{63 - 37,5 - 6,3}{2} = 9,6 \text{ MBm} ,$$

$$P_{LR3} = P_{LR4} = P_{LR2} + P_{\varepsilon} - P_{номп} - P_{CH} = 9,6 + 63 - 37,5 - 6,3 = 28,8 \text{ MBm} .$$

При разрыве кольца, например, отключен реактор LR4, через секционные реакторы протекает мощность

$$P_{LR1} = P_{\varepsilon} - P_{номп} - P_{CH} = 63 - 37,5 - 6,3 = 19,2 \text{ MBm} ,$$

$$P_{LR2} = P_{LR3} = \frac{P_{\varepsilon} - P_{номп} - P_{CH}}{2} = \frac{63 - 37,5 - 6,3}{2} = 9,6 \text{ MBm} .$$

Расчетным режимом является режим отключения одного трансформатора:

$$I_{макс} = \frac{P_{LR3}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos \varphi} = \frac{28800}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,8} = 2078 \text{ A} .$$

Принимаем к установке реактор типа РБГ-10-2500-0,14УЗ с параметрами  $U_{ном} = 10 \text{ кВ}$ ,  $I_{ном} = 2500 \text{ А}$ ,  $x_p = 0,14 \text{ Ом}$ .

Ток через реакторы в нормальном режиме равен

$$I_{раб,ном} = \frac{P_{LR}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos \varphi} = \frac{9600}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 0,8} = 692,8 \text{ А} .$$

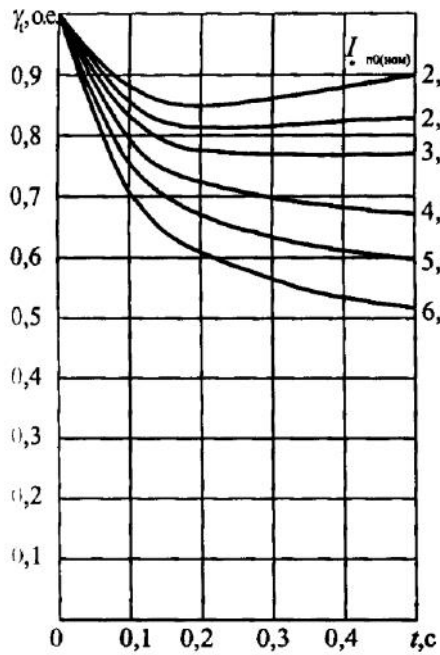
Потеря напряжения в реакторе в нормальном режиме, согласно (6.10) равна

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{3} \cdot x_p \cdot I_{раб,ном} \cdot 100 \cdot \sin \varphi}{U_{ном}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 0,14 \cdot 692,8 \cdot 100 \cdot 0,6}{10000} = 1,008\% ,$$

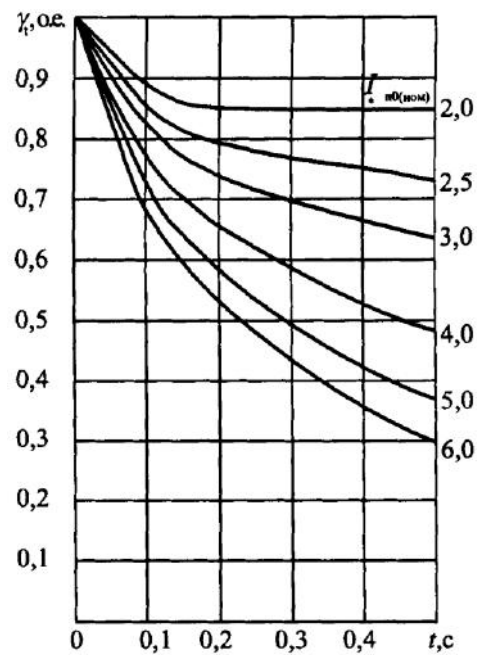
что меньше допустимого значения потерь.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

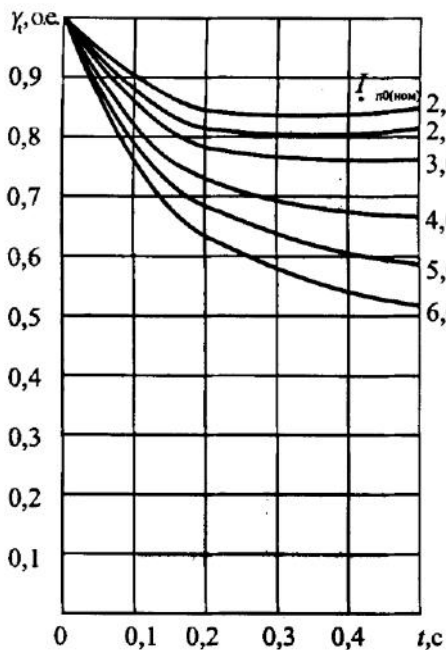
Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от  
синхронных генераторов и синхронных и асинхронных  
электродвигателей



а



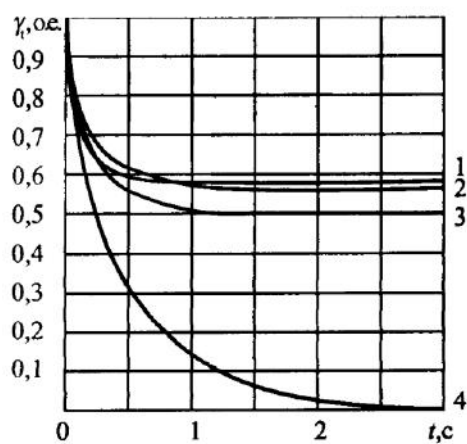
б



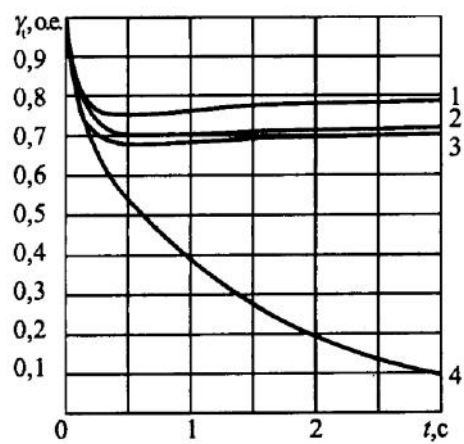
в

а- с тиристорной независимой системой возбуждения;  
б- с тиристорной системой самовозбуждения;  
в- с диодной независимой (высокочастотной) системой возбуждения

Рисунок А.1- Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов



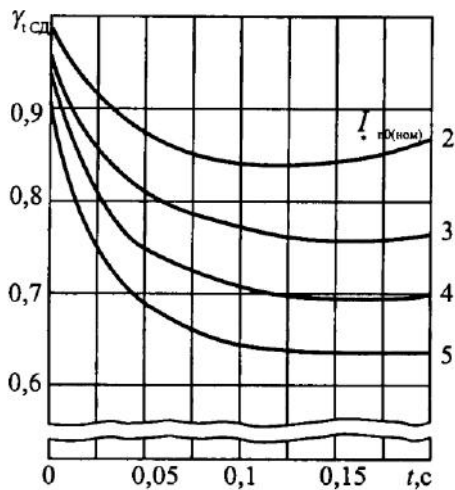
а



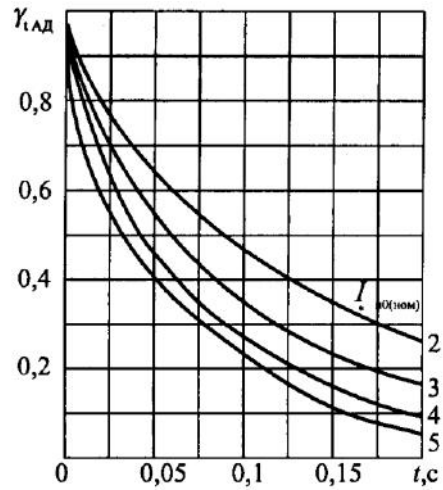
б

а- при трехфазных КЗ на выводах генераторов;  
б- при трехфазных КЗ на стороне высшего напряжения  
блочных трансформаторов

Рисунок А.2-Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от турбогенераторов с различными системами возбуждения



а



б

а- для синхронного электродвигателя;  
б- для асинхронного электродвигателя

Рисунок А.3-Типовые кривые изменения периодической составляющей тока КЗ от электродвигателей

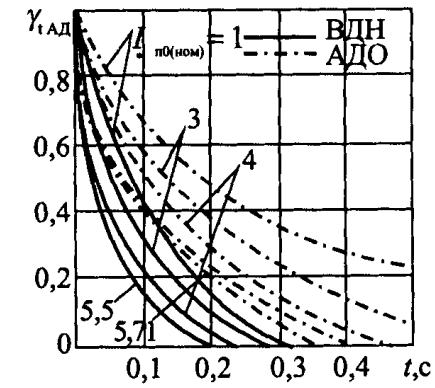
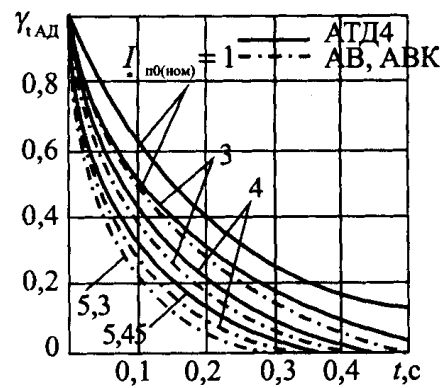
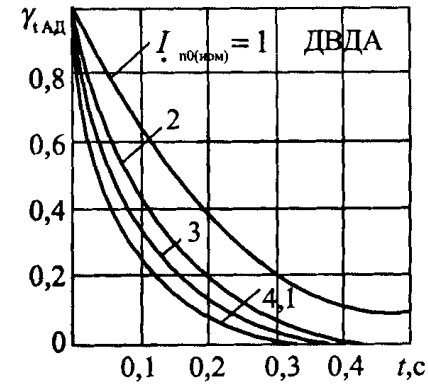
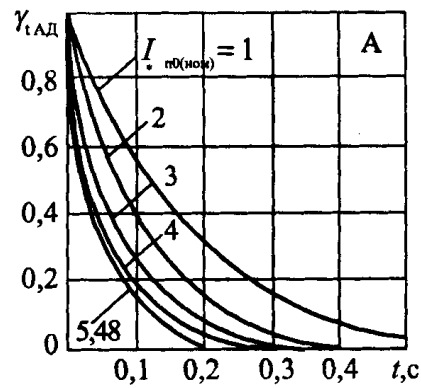
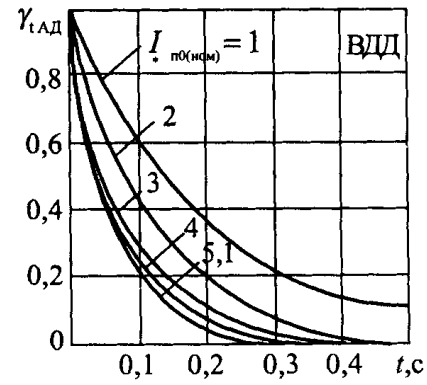
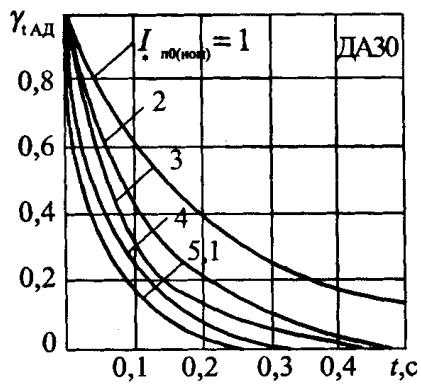
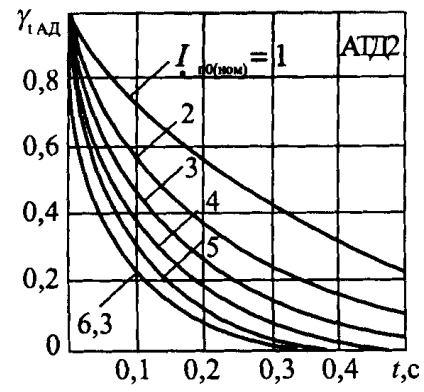
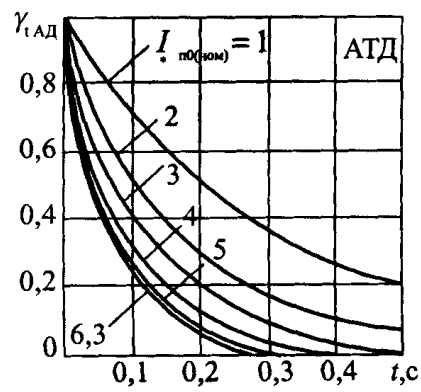
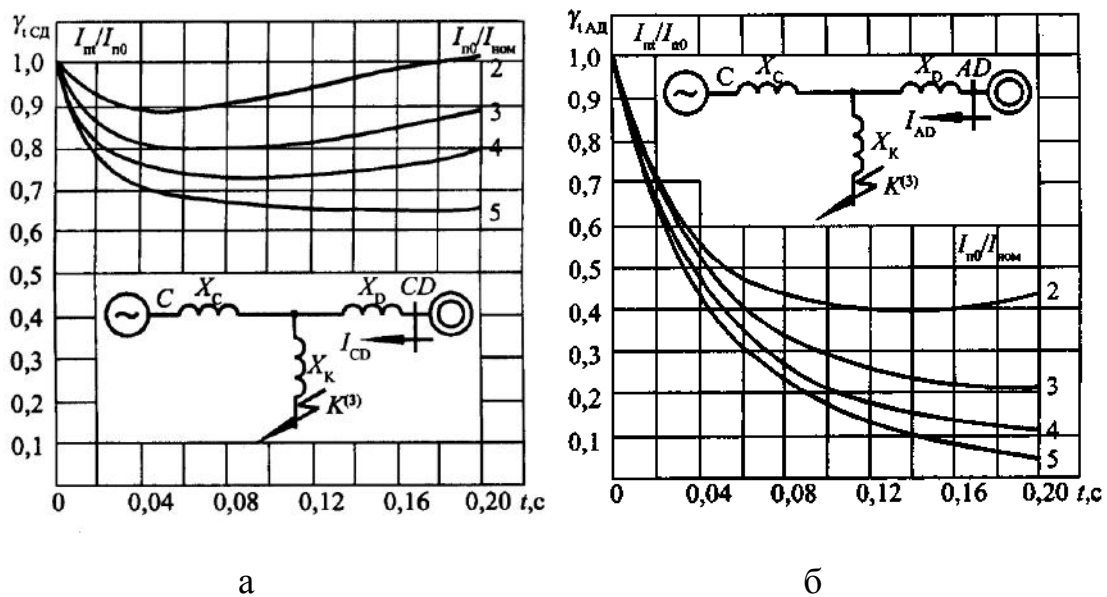


Рисунок А.4-Типовые кривые изменения тока КЗ от асинхронных электродвигателей



а- для эквивалентного синхронного электродвигателя;  
 б- для эквивалентного асинхронного электродвигателя

Рисунок А.5-Типовые кривые для определения тока КЗ от эквивалентных электродвигателей напряжением 6 кВ при трехфазном КЗ в сети

## ЛИТЕРАТУРА

1 Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций.- М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

2 Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования/Под ред. Б.Н. Неклепаева.-М.:Изд-во НЦ ЭНАС, 2001. –152 с.

3 Правила устройства электроустановок. С.-П.: ДЕАН, 1999. – 926 с.

4 Электротехнический справочник. Т.3. Кн.1/ Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов) – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.

5 Электрическая часть станций и подстанций/А.А .Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова и др. Под ред. А.А. Васильева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

6 Баков Ю.В. Проектирование электрической части электростанций с применением ЭВМ.- М.: Энергоатомиздат, 1991.- 272 с.

7 Гук Ю.Б., Кантан В.В., Петрова С.С. Проектирование электрической части станций и подстанций.-Л.: Энергоатомиздат, 1985.-312 с.

8 Околович М.Н. Проектирование электрических станций.- М.: Энергоатомиздат, 1982.- 400 с.

9 Неклепаев Б.Н., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования. М.: Энергоатомиздат, 1989.- 608 с.

10 Леньков Ю.А. Методическая разработка к курсовому проекту по курсу «Электрическая часть станций».- Алма-Ата, изд.РУМК, 1988.- 47 с.

11 Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций и тепловых сетей.- М.:ЦНТИ Информэнерго, 1981. – 122 с.

12 Долин А.П., Шонгин Г.Ф. Открытые распределительные устройства с жесткой ошиновкой. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 192 с.

13 Электротехнический справочник. Т.2./Под ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И.Н. Орлов)- М.: Энергоатомиздат, 1986. – 712 с.

14 Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования/Под ред. Ю.Г. Барыбина и др.- М.: Энергоатомиздат, 1991.- 464 с.

15 Чунихин А.А. Электрические аппараты. - М.: Энергоатомиздат, 1988.- 720 с.

Учебное издание

Леньков Юрий Аркадьевич  
Хожин Гамиль Хожаевич

ВЫБОР АППАРАТОВ И ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ  
РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Учебное пособие  
по курсу  
«Электрические станции и подстанции»  
для студентов, обучающихся по направлению «Электроэнергетика»

Утверждено к печати Ученым советом Павлодарского  
государственного университета им. С. Торайгырова

Подписано в печать  
Формат 29,7 x 42<sup>1</sup>/<sub>4</sub>. Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл.печ.л. . Уч.-изд. л. . Тираж экз. Заказ

Гарнитура Times

Издательство ПГУ им. С. Торайгырова, г. Павлодар, 637034, ул.  
Ломова, 64