

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского  
федерального университета

Дата подписания: 12.09.2023 16:44:47

Уникальный программный ключ: «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

## Методические указания

по выполнению практических работ

по дисциплине «Электрические станции и подстанции»

для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Передача и распределение электрической энергии в системах электроснабжения

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

## Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	3
1.	Практическая работа №1. Нагрузочная способность проводников	4
2.	Практическая работа №2. Нагрузочная способность трансформаторов	20
3.	Практическая работа №3. Проверка проводников на термическую стойкость при коротких замыканиях	35
4.	Практическая работа №4. Электродинамические силы в электроустановках.	47
5.	Практическая работа №5. Проверка шинных конструкций на электродинамическую стойкость.	52
6.	Практическая работа №6. Выбор выключателей.	60
7.	Практическая работа №7. Выбор разъединителей.	66
8.	Практическая работа №8. Выбор измерительных трансформаторов тока и напряжений.	71
9.	Практическая работа №9. Выбор токоограничивающих реакторов.	78

## Введение

Одна из основных задач методических указаний – развитие у студентов творческого подхода к теоретическому материалу, физическим трактовкам явлений и процессов, происходящих в электрической части станций и подстанций.

Дисциплина «Электрические станции и подстанции» относится к базовым профилирующим дисциплинам направления 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника. Содержание практических занятий соответствует программе дисциплины «Электрические станции и подстанции» для студентов, перечисленных выше специальностей.

В деле совершенствования подготовки студентов по данной дисциплине важную роль играет получение практических навыков инженерных расчетов. Это достигается в процессе выполнения практических занятий, которые являются самостоятельной работой студента под руководством преподавателя, и преследует следующие задачи:

- закрепление знания схем электрической станции и подстанций; б) выполнение технико-экономических расчетов;
- умение производить выбор оборудования;
- ознакомление с теоретическими основами работы и конструкцией электрических аппаратов;
- освоение методики выбора электрических аппаратов и токоведущих частей.

Часть задач в процессе работы над дисциплиной студентам рекомендуется изучить самостоятельно. Данная дисциплина обобщает весь изученный ранее материал и готовит студента дипломному проектированию.

## ***Практическая работа №1***

***Тема:*** Нагрузочная способность проводников

***Цель:*** Научиться выполнять выбор сечения проводов по экономической плотности тока.

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– нагрузочную способность проводников;

***уметь:***

– проводить выбор сечения проводов по экономической плотности тока.

***Актуальность темы:***

Заключается в необходимости выбора сечения провода по экономической плотности тока.

***Теоретическая часть:***

**Выбор проводников по экономической плотности тока.** Проводники выбираются по экономической плотности тока  $j_{\text{экон}}$ , которая установлена Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), исходя из минимума приведенных затрат. В нормальном режиме плотность тока  $j$  должна приближаться к экономической. Сечение проводника, отвечающее этому требованию, выбирают в соответствии с выражением:

$$S \approx S_{\text{экон}} = I_{\text{норм.расч.}} / j_{\text{экон.}}$$

где  $s_{\text{экон}}$  – экономическое сечение проводника, мм<sup>2</sup>;

$s$  – ближайшее (меньшее или большее) стандартное сечение проводника, мм<sup>2</sup>;

$I_{\text{норм. расч.}}$  – расчетный ток нормального режима, А;

$I_{эжн.}$  – экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup> (зависит от продолжительности использования максимальной нагрузки  $I_{max.}$ , передаваемой по линии или токопроводу, материала проводника, а также изоляции кабеля). В связи с неопределенностью в распределении рабочего тока вдоль сборных шин, режима работы и трудоемкостью определения экономического эффекта проводники сборных шин по экономической плотности тока  $j_{эжн.}$  не выбираются.

Проверка шин, комплектных токопроводов, кабелей и электрических аппаратов по нагрузочной способности. Температура проводника  $\vartheta$  в рабочем режиме не должна превышать продолжительно допустимую температуру  $\vartheta_{прод. доп.}$  т. е.

$$\vartheta \leq \vartheta_{прод. доп.},$$

В ПУЭ установлены следующие продолжительно допустимые температуры проводников, шин и кабелей, °С:

Проводники и шины	70
Кабели с бумажной изоляцией напряжением, кВ	
Менее 3	80
6	65-75
10	60
20,35	50-55

Расчетная нормированная (номинальная) температура окружающей среды для проводников и кабелей, проложенных на воздухе, принимается 25 °С, кабелей, проложенных в земле, – 15 °С.

В соответствии с ГОСТ 8024-90 продолжительно допустимая температура неизолированных проводников устанавливается 90–120 °С в зависимости от материала поверхности разъемных (в т. ч. болтовых) контактных соединений. Такие температуры принимают в качестве критерия работоспособности проводников комплектных токопроводов (заводского изготовления), а также ошиновки комплектных распределительных

устройств, которые проходят типовые испытания на нагрузочную способность.

Продолжительно допустимой температуре проводника соответствует продолжительно допустимый ток  $I_{прод. доп.}$  (для комплектных токопроводов и электрических аппаратов называемый номинальным током  $I_{ном.}$ ). Для шин, токопроводов и электрических аппаратов условие выполняется, если выполняется соотношение

$$I_{раб. нб.} \leq k_{a.n.} \cdot k^{\vartheta} \cdot I_{прод. доп.}$$

где  $I_{раб. нб.}$  – наибольший рабочий ток ;  $k_{a.n.}$  – коэффициент аварийной перегрузки;  $k$  – поправочный коэффициент на температуру окружающей среды;  $I_{прод. доп.}$  – продолжительно допустимый ток при нормированном значении температуры окружающей среды.

Для кабелей должно выполняться соотношение:

$$I_{раб. нб.} \leq k_{a.n.} \cdot k^{\vartheta} \cdot k_N \cdot k_U \cdot I_{прод. доп.}$$

где  $k_N$  – поправочный коэффициент на количество работающих кабелей, проложенных рядом в земле;  $k_U$  – поправочный коэффициент для кабелей, работающих не при номинальном напряжении.

Условия вычисления  $I_{раб. нб.}$ :

Место определения	Условия
Параллельные или взаиморезервируемые цепи	Отключение одной из цепей
Сборные шины станций и подстанций шины в цепи секционных и шиносоединительных выключателей	Наибольшие перетоки мощности
Цепи генераторов	Работа с номинальной мощностью, при пониженном напряжении 5% от номинального

Продолжительно допустимый (или номинальный) ток  $I_{\text{прод. доп.}}$ , как правило, определяется в результате испытаний, а иногда аналитически на основе теплового расчета проводников в установившемся рабочем режиме. Значения  $I_{\text{прод. доп.}}$  кабелей и некоторых типов шин приводятся в ПУЭ, а номинальных токов комплектных токопроводов и электрических аппаратов – в каталогах и информационных материалах заводов-изготовителей, а также в справочниках.

Коэффициент аварийной перегрузки  $k_{\text{ав.}}$  для токопроводов и электрических аппаратов принимается равным 1, кабелей – от 1 до 1,5 в зависимости от нагрузки в нормальном режиме и продолжительности перегрузки.

Поправочный коэффициент на температуру окружающей среды может быть определен по формуле:

$$k_{\vartheta} \approx \sqrt{\frac{\vartheta_{\text{прод. доп.}} - \vartheta_{\text{окр.}}}{\vartheta_{\text{прод. доп.}} - \vartheta_{\text{окр. ном.}}}}$$

где  $\vartheta_{\text{окр.}}$  и  $\vartheta_{\text{окр. ном.}}$  – фактическая и номинальная температуры окружающей среды.

Поправочный коэффициент  $k_N \leq 1$  зависит от количества кабелей и расстояния между ними в свету [1, 4];  $k_U$  учитывает изменения уровня продолжительно допустимого тока при использовании кабеля в сети напряжением ниже (иногда выше) его номинального напряжения [1]. При равенстве номинальных напряжений кабеля и сети  $k_U = 1$ .

Тепловой расчет шин. Определение  $I_{\text{прод. доп.}}$  можно проводить на основе теплового расчета проводников в стационарном рабочем режиме. Уравнение теплового баланса шины записывается в виде:

$$I^2 r + Q_c = Q_k + Q_l$$

где  $I$  – ток, А;  $r$  – активное сопротивление шины, Ом;  $Q_c$  – тепловой поток, поглощаемый шиной при солнечной радиации, Вт;  $Q_k$  и  $Q_l$  – тепловые потоки, обусловленные конвекцией и излучением, Вт.

Активное сопротивление

$$r = k_{\partial} \cdot r,$$

где  $r$  – сопротивление шины постоянному току при допустимой температуре продолжительного режима;

$k_{\partial}$  – коэффициент добавочных потерь.

Сопротивление шины постоянному току зависит от температуры и вычисляется по формуле:

$$r_{\Sigma} = \rho_1 l [1 + \alpha_{\rho} (\vartheta - \vartheta_1)] / s$$

где  $\rho_1$  – удельное электрическое сопротивление, при нормированной температуре  $\vartheta_1$ , Ом·м;

$l$  – длина проводника, м;  $s$  – площадь сечения проводника, м<sup>2</sup> ;

$\alpha_{\rho}$  – температурный коэффициент электрического сопротивления, 1/°C;

$\vartheta$  – температура, °C.

В диапазоне температур 20 ... 120 °C коэффициент  $\alpha_{\rho}$  для меди, алюминия и его сплавов остается практически постоянным и примерно равным 0,004 1/°C [5].

Коэффициент добавочных потерь:

$$k_{\partial} = k_n k_b,$$

где  $k_n$ ,  $k_b$  – коэффициенты соответственно поверхностного эффекта и эффекта близости.

В зависимости от функции  $\sqrt{f/R}$  коэффициент  $k_n$  определяется, например, по кривым. Здесь  $f$  – частота тока в сети, Гц;  $R$  – сопротивление постоянному току шины длиной 1000 м. Для шин кольцевого сечения  $k_n$  приближенно вычисляется по формуле:

$$k_n \approx 1 + 3,3 \cdot 10^{-10} (t/D \cdot r)^2$$

где  $D$  и  $t$  – внешний диаметр и толщина стенки шины, м;



$r$  – сопротивление шины постоянному току, Ом/м.

В распределительных устройствах (РУ) напряжением выше 1 кВ расстояние между шинами разных фаз значительно больше их геометрических размеров. Поэтому для несоставных шин  $k_{б.} \approx 1$  и  $k_{д.} \approx k_{п.}$ .

Для многополосных шин (рисунок 1.1)  $k_{д.}$  примерно равен коэффициенту добавочных потерь эквивалентной уединенной плоской шины шириной  $h_{эк.}$ , равной ширине полосы пакета  $h$ , и толщиной  $b_{эк.} = N \cdot b$ , где

$N$  – число полос в пакете;  $b$  – толщина полосы.

Тепловые потоки от шины конвекцией  $Q_k$  и излучением  $Q_l$  составляют соответственно:

$$Q_k = q_k \cdot F_k;$$

$$Q_l = q_l \cdot F_l,$$

где  $q_k$  и  $q_l$  – удельная теплоотдача (удельный тепловой поток) соответственно конвекцией и излучением, Вт/м;  $F_k$  – поверхность шины, участвующая в теплоотдаче конвекцией, м<sup>2</sup>;  $F_l$  – излучающая поверхность шины, м<sup>2</sup>.

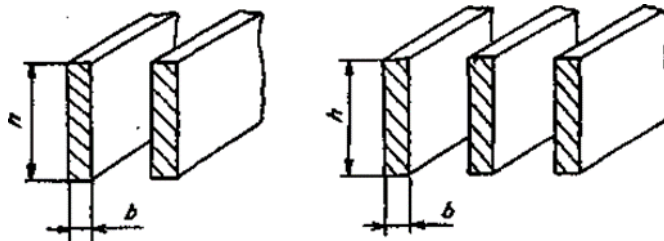


Рисунок 1.1 – Многополосные шины

Удельный тепловой поток конвекцией рассчитывается по формуле:

$$q_k = \alpha_k (\vartheta - \vartheta_{в.}),$$

где  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи при конвекции, Вт/м<sup>2</sup>;  $\vartheta_{в.}$  – температур воздуха, °С.

Для круглых и плоских шин, расположенных вертикально, коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции в закрытом РУ (ЗРУ) приближенно определяется согласно как:

$$\alpha_{\text{к.}} = \frac{A\lambda_{\text{в.}}}{L} \left( \frac{g}{T_{\text{в.}}} (\vartheta - \vartheta_{\text{в.}}) \frac{L^3}{\nu_{\text{в.}}^2} \right)^{1/4},$$

где  $g=9,81$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$T_{\text{в.}}=273+\vartheta_{\text{в.}}$  – термодинамическая температура воздуха, К;  $\nu_{\text{в.}}$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;

$\lambda_{\text{в.}}$  – теплопроводность воздуха, Вт/(м·°С);

$A$  – постоянный коэффициент, зависящий от формы шин;

$L$  – характерный размер (высота или диаметр шины).

Указания о характере  $L$ , а также значения  $A$  приведены в таблице 1.1. Параметр  $\nu_{\text{в.}}$  зависит от температуры, а  $\lambda_{\text{в.}}$ , кроме того – от давления воздуха. При температуре воздуха, близкой к 25 °С, и нормальном атмосферном давлении удельный тепловой поток конвекцией можно вычислить по формуле:

$$q_{\text{к.}} = B(\vartheta - \vartheta_{\text{в.}})^{1.25} L^{-0.25}$$

где  $B$  – параметр, значения которого приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры сечения шин

Форма сечения шины	Характерный размер шины $L$ равен	$A$	$B$ , Вт/(м <sup>0,75</sup> ·°С <sup>1,25</sup> )
Круглая трубчатая	внешнему диаметру $D$	0,46	1,31
Прямоугольная (при расположении шины на ребро)	высоте $L$	0,695	1,97

Конвективная теплоотдача шины открытого РУ (ОРУ) зависит как от перепада температур, профиля и размеров шины, так и от скорости ветра. Наименьшая теплоотдача и, следовательно, наиболее неблагоприятные условия работы шин будут при штиле (т. е. при скорости ветра, близкой к нулю). Тем не менее, даже при полном штиле конвективный теплообмен проводников в ОРУ остается выше, чем в ЗРУ (при свободной конвекции),

так как вне помещений всегда имеется слабое движение воздуха. Удельный конвективный тепловой поток, например, от трубчатых шин в ОРУ при штиле приближенно определяется по формуле:

$$q_{\text{к}} = B_0(\vartheta - \vartheta_{\text{в}})^{1,25} L^{-0,25}$$

где  $B_0 = 1,61 \text{ Вт}/(\text{м}^{0,75} \cdot ^\circ\text{С}^{1,3})$ ;  $L$  – характерный размер, равный внешнему диаметру шины  $D$ , м.

В соответствии с (1.15) и (1.16) удельный конвективный тепловой поток в ЗРУ и ОРУ приводится к виду, удобному для практических расчетов:

$$q_{\text{к}} = C / L^{1/4}$$

Значения  $C$ ,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1,75}$  при различных температурах воздуха (и соответствующей теплопроводности и кинетической вязкости воздуха), а также различных температурах шин указаны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Значения  $C$  при различных температурах,  $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1,75}$

Форма сечения шины	Тип установки	$C$ , $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1,75}$ , при		
		$\vartheta_{\text{в}} = 25^\circ\text{С}$ $\vartheta_{\text{прод.дон}} = 70^\circ\text{С}$	$\vartheta_{\text{в}} = 35^\circ\text{С}$ $\vartheta_{\text{прод.дон}} = 90^\circ\text{С}$	$\vartheta_{\text{в}} = 35^\circ\text{С}$ $\vartheta_{\text{прод.дон}} = 120^\circ\text{С}$
Круглая (трубчатая)	ЗРУ	152	195	335
	ОРУ	227	295	519
Прямоугольная (шина расположена на ребро)	ЗРУ	230	295	508

Для составных проводников теплоотдачу конвекцией с внутренней поверхности приближенно принимают равной 0,7 от теплоотдачи с наружной поверхности.

Удельный тепловой поток излучением,  $\text{Вт}/\text{м}$ , определяют по формуле:

$$q_{\text{л}} = \varepsilon \cdot c \cdot (T^4 - T_{\text{в}}^4),$$

Тепловой поток, поглощаемый шиной при солнечной радиации (на единицу длины), приближенно определяется по формуле:

$$Q_{\text{с}} \approx a_{\text{с}} \cdot L \cdot q_{\text{с}}.$$

$$I_{\text{прод, доп}} = \sqrt{\frac{Q_{\text{к, доп.}} + Q_{\text{л, доп.}} + Q_{\text{с.}}}{r_{\text{доп.}}}}$$

Тепловой расчет удобно проводить на 1 м длины шины.

Таблица 1.3 – Коэффициенты излучения поверхности шины

Материал шины или цвет краски	Значения коэффициентов	
	$\varepsilon$	$a_{\text{с}}$
Алюминий (окисленный)	0,15	0,4
Краска:		
белая	0,88	0,3
желтая	0,9	0,44
зеленая	0,9	0,65
красная	0,9	0,65
черная	0,92	0,97

### ***Задание:***

#### ***Задача №1***

Определить допустимый ток продолжительного режима однополосных и двухполосных шин (см. рисунок 1.1а) ЗРУ, расположенных на ребро и плашмя. Шины изготовлены из алюминия марки АДО и окрашены эмалевой краской. Размер одной полосы шины 60х8 мм.

#### ***Задача №2***

Выбрать сечение алюминиевых шин открытого (неэкранированного) участка токопровода в цепи генератора типа ТВФ-110-2ЕУЗ (рисунок 1.2). Номинальные данные генератора:  $P_{\text{ном}}=110$  МВт;  $U_{\text{ном.}}=10,5$  кВ;  $\cos\varphi_{\text{ном}}=0,8$ .

График нагрузки генератора представлен на рисунке 1.3. Принять температуру воздуха в ЗРУ равной нормированной, т. е. 25 °С.

### ***Задача №3***

Выбрать сечение алюминиевых шин, соединяющих трансформатор типа ТДЦ-80000/220 со сборными шинами 10 кВ ТЭЦ (см. рисунок 1.2). В нормальном режиме нагрузка каждого трансформатора составляет 63 % его номинальной мощности, а при отключении одного из них нагрузка оставшегося в работе трансформатора превышает его номинальную мощность на 26 %. Продолжительность использования максимальной нагрузки трансформатора  $T_{max.} = 6300$  ч. Температуру воздуха принять равной 25 °С.

### ***Задача №4***

Выбрать сечение алюминиевых шин в цепи трансформатора собственных нужд (ТСН) типа ТДНС-10000/10 (рисунок 1.4) на стороне высшего напряжения. Продолжительность использования максимальной нагрузки  $T_{max.} = 7500$  ч. Максимальная температура воздуха в распредустройстве 35 °С. При повреждении рабочего трансформатора потребители собственных нужд получают питание от резервного трансформатора

### ***Задача №5***

Выбрать и проверить по условиям нагрева в рабочем режиме кабели с алюминиевыми жилами, связывающие распределительные пункты РП 1 и РП 2 (рисунок 1.5) с шинами 10 кВ ТЭЦ. Максимальная нагрузка пункта РП 1 составляет  $P_{max.} = 8$  МВт, пункта РП 2 –  $P_{max.} = 3$  МВт; коэффициент мощности нагрузки  $\cos\varphi = 0,9$ . Кабели проложены в земле, температура почвы 15 °С. Суточные графики нагрузки распределительных пунктов представлены на рисунке 1.6

### ***Задача №6***

а) выбрать сечение алюминиевой шины по условию допустимой температуры в длительном режиме. Максимальная трехфазная нагрузка цепи равна 3200 кВт, междуфазное напряжение – 6 кВ, коэффициент мощности – 0,88.

б) проверить, удовлетворяет ли выбранное в пункте (а) сечение шины условию экономической плотности тока при продолжительности использования максимума нагрузки, равной 6000 ч.

### ***Задача №7***

По условиям рабочего режима выбрать шины в ячейке РУ 10 кВ цепи турбогенератора типа ТВФ-100-2, имеющего следующие параметры:  $P_{н.} = 100$  МВт,  $U_{н.} = 10,5$  кВ,  $\cos\varphi = 0,85$ ,  $I_{н.} = 6,48$  кА. Турбогенератор работает с номинальной нагрузкой 7 месяцев в году, а остальное время несет нагрузку 0,6 номинальной. Сравнить по величине поперечного сечения алюминиевые шины трех профилей: а) коробчатые, б) трубчатые круглого сечения, в) трубчатые квадратного сечения.

### ***Задача №8***

Медная шина с допустимым длительным током 860 А несет токовую нагрузку 750 А. Определить, допустим ли для шины указанный ток, если температура окружающего воздуха будет +40 °С.

### ***Задача №9***

Определить температуру алюминиевой окрашенной шины сечением 80х8 мм<sup>2</sup> при рабочем токе 700 А и при температурах воздуха: а) +25 °С б) +15 °С.

### ***Задача №10***

Трехжильный кабель с бумажной пропитанной изоляцией, напряжением 10 кВ, сечением алюминиевой жилы 150 мм<sup>2</sup> проложен в туннеле и нагружен током 175 А. Проверить, сможет ли кабель длительно работать с указанной нагрузкой, если температура воздуха в туннеле поднялась до +35 °С.

Таблица 1.4 – Допустимый ток продолжительного режима неокрашенных и окрашенных шин без учета солнечной радиации

Тип установки	Окраска шин	Тепловой поток, Вт			Допустимый рабочий ток, А	
		$Q_k$	$Q_l$	$Q_c$	с учетом солнечной радиации	без учета солнечной радиации
	неокрашенные		15,9	34	1617	1853
	белая		93,2	25,5	2163	2300
ОРУ	желтая	126,9	95,4	37,4	2108	2312
	зеленая		95,4	52,7	2019	2312
	красная		95,4	55,2	2004	2312
	неокрашенные		15,9			1529
ЗРУ	белая желтая,	84,8	93,2 95,4	0	-	2068 2081
	зеленая,				-	
	красная				-	

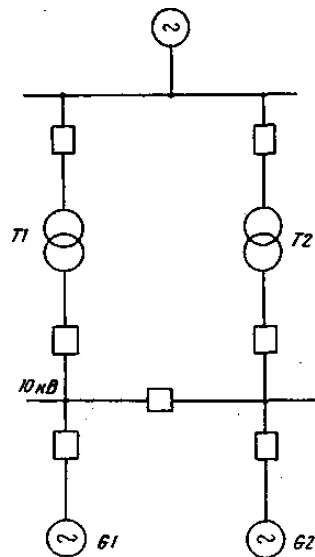


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема ТЭЦ

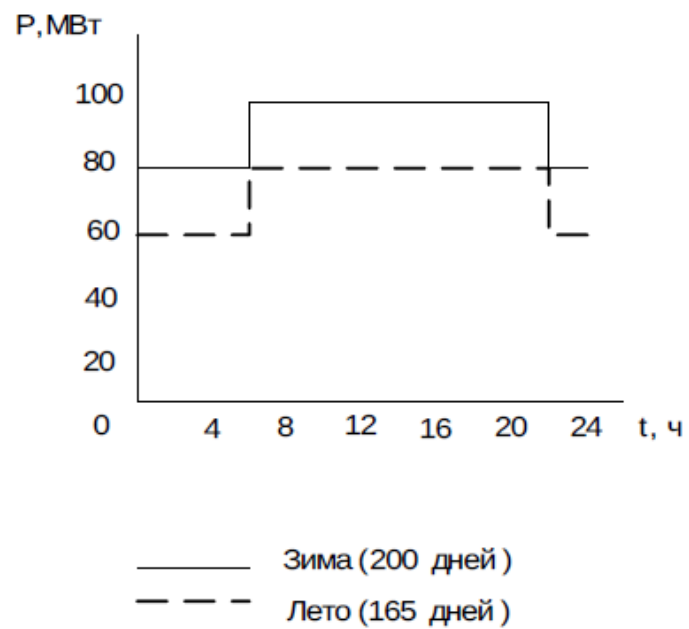


Рисунок 1.3 – Суточные графики нагрузки генератора



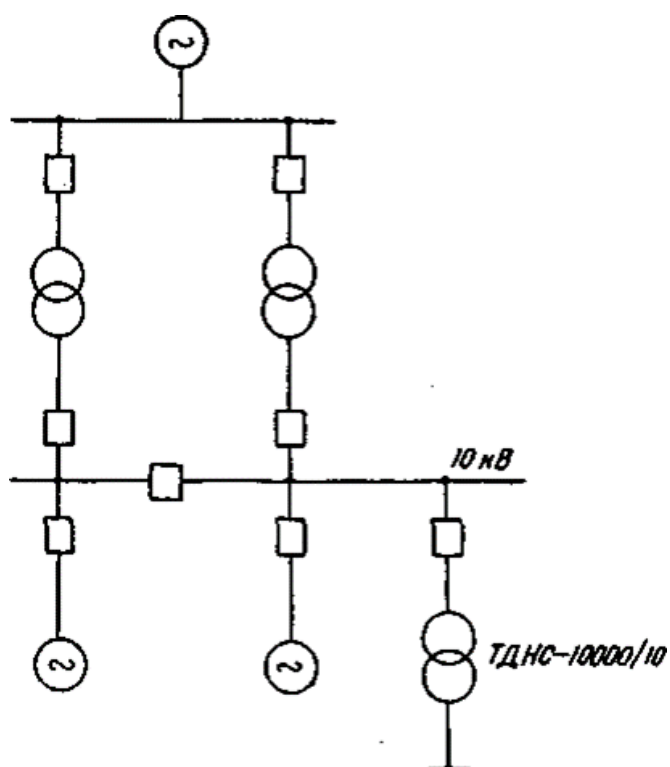


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема ТЭЦ с трансформатором СН

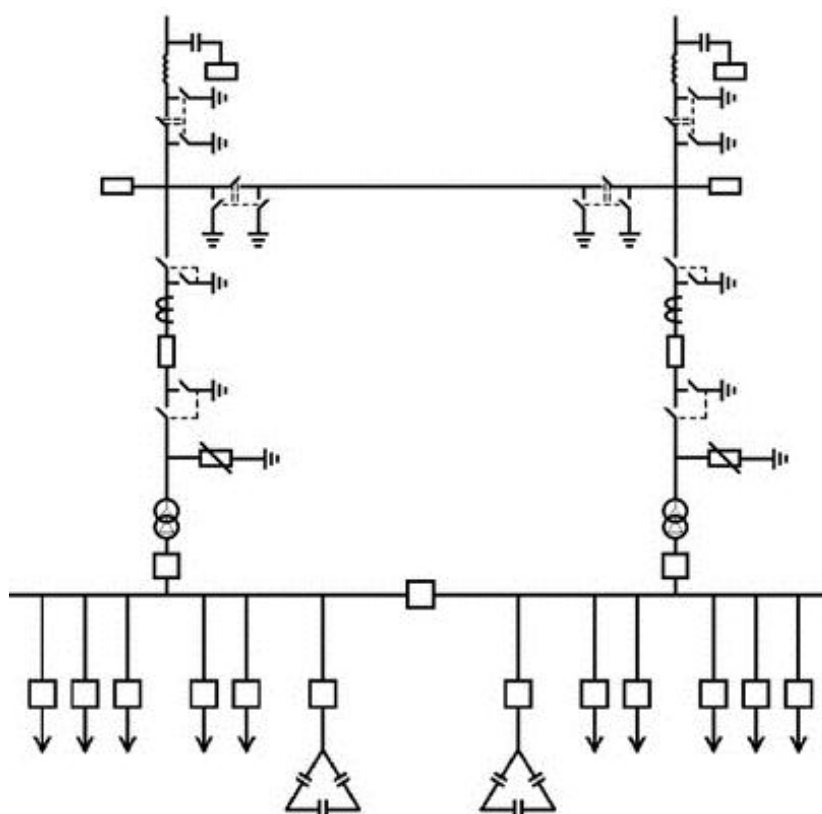


Рисунок 1.5 – Схема электроснабжения потребителей 10 кВ

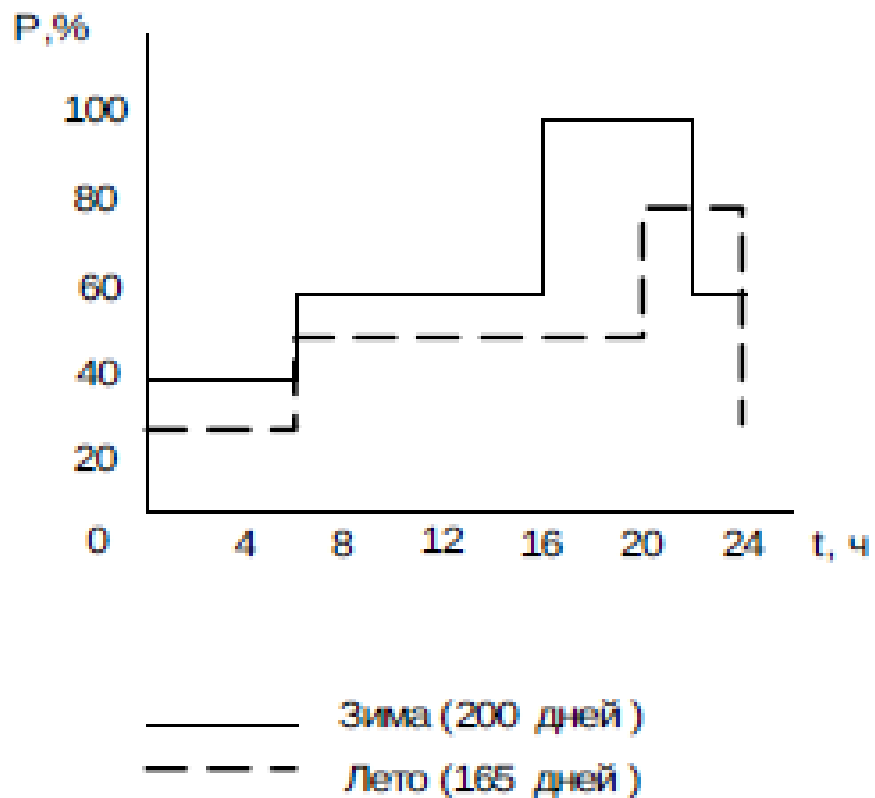


Рисунок 1.6 – Суточные графики нагрузки распределительных пунктов

**Контрольные вопросы:**

1. Как осуществляется проверка шин по условия нагрузочной способности?
2. Как влияет на допустимый продолжительный ток шин удельное электрическое сопротивление материала?
3. Изложите понятие о выборе проводников по экономической плотности тока.
4. Объясните влияние солнечной радиации на продолжительный ток шин.
5. Перечислите от чего зависит конвективная теплоотдача шины открытого РУ (ОРУ).

**Список литературы:**

**Перечень основной литературы:**

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем : учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - 2-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 359 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 349-350 - ISBN 978-5-7782-2743-9 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438316>

2. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции : учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 111 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 61-63 - ISBN 978-5-7410-1542-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=468847>

***Перечень дополнительной литературы:***

3. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. - 2-е изд. доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 149 с. : ил. - Библиогр.: с. 114 - ISBN 978-5-9729-0207-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493858>

## ***Практическая работа №2***

***Тема:*** Нагрузочная способность трансформаторов

***Цель:*** Приобрести навык теплового расчета трансформатора и оценки работы трансформатора в разные периоды времени

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– определение нагрузочной способности трансформаторов;

***уметь:***

– проводить тепловой расчет трансформатора и оценку работы трансформатора в разные периоды времени.

***Актуальность темы:***

Заключается в проведении теплового расчета трансформатора.

***Теоретическая часть:***

Выбор трансформаторов на электростанциях и подстанциях заключается в выборе типа, количества, номинальной мощности, и номинального коэффициента трансформации.

Номинальной мощностью трансформатора называют кажущуюся мощность (нагрузку), которую трансформатор может нести непрерывно в течение всего нормального срока службы при номинальных режимных условиях (номинальных напряжении, частоте и температуре охлаждающей среды). Нормальный срок службы назначают примерно равным сроку морального старения.

Действительный срок службы трансформатора определяет процесс старения изоляции его обмоток, который, в свою очередь, зависит от температуры изоляции обмоток. Для бумажной изоляции, погруженной в

масло, нормальный срок службы обеспечивается при работе с неизменной температурой 98 °С. Следовательно, трансформатор будет иметь нормальный срок службы в том случае, если температура в наиболее нагретой точке его обмоток будет неизменна и равна 98 °С. В этих условиях изоляция трансформатора подвергается так называемому номинальному (нормальному) износу.

Превышение температуры обмоток трансформатора над температурой окружающего воздуха зависит от мощности нагрузки. Номинальную мощность трансформатора назначают в соответствии с нормированным превышением температуры обмоток над температурой воздуха. Однако при установке трансформатора на открытом воздухе температура последнего не постоянна, а изменяется в течение года в соответствии с климатическими условиями. Для каждой климатической зоны может быть установлена так называемая эквивалентная по износу изоляции температура воздуха за время  $T$ , при которой трансформатор, работая с неизменной нагрузкой, имеет такой же износ изоляции, как в действительных условиях при переменной температуре воздуха за рассматриваемый период времени. В качестве номинальной температуры охлаждающей среды принята температура + 20 °С. Для верхних сдоев масла нормированное превышение температуры при номинальной нагрузке  $\Theta_{м(н)}$  равно: для систем охлаждения М и Д – 55 °С, для систем охлаждения Ц и ДЦ – 40 °С.

При выборе номинальной мощности трансформатора следует учитывать его способность к перегрузкам.

Систематические перегрузки – это такие перегрузки, которым трансформатор может подвергаться систематически (ежесуточно в часы суточного максимума нагрузок), причем износ изоляции за рассматриваемый период не превышает номинального.

Если трансформатор в течение некоторого времени работает с нагрузкой менее номинальной, то износ его изоляции идет замедленно против расчетных условий. За счет этого трансформатор можно перегрузить

на каком-то другом отрезке времени, т. е. пойти на усиленный против номинального износ изоляции, но так, чтобы суммарное число отжитых часов равнялось расчетному.

Для оценки допустимости систематической перегрузки трансформатора в часы суточного максимума необходимо выполнить расчет его температурного режима, т. е. вычислить изменение температуры масла и обмоток трансформатора в течение суток. Для этой цели можно воспользоваться следующими расчетными выражениями, справедливыми при внезапном изменении коэффициента (кратности) нагрузки  $k$  от  $k_1 = S_1 / S_H$  до  $k_2 = S_2 / S_H$ . ( $S_H$  – номинальная мощность трансформатора).

Превышение температуры масла (в верхних слоях) над температурой охлаждающей среды:

$$\Theta_m = \Theta_1 + (\Theta_1 - \Theta_1) \cdot \left(1 - t^{\frac{1}{\tau}}\right)$$

где  $\Theta_1$  – превышение температуры масла, соответствующее коэффициенту начальной нагрузки  $k_1$ ,

$$\Theta_1 = \Theta_{m(n)} \cdot \left(\frac{1 + b \cdot k_1^2}{1 + b}\right)^m$$

$\Theta_2$  – превышение температуры масла, соответствующее коэффициенту нагрузки  $k_2$ ,

$$\Theta_1 = \Theta_{m(n)} \cdot \left(\frac{1 + b \cdot k_2^2}{1 + b}\right)^m$$

где  $b$  – отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода;

$\tau$  – постоянная времени теплового процесса трансформатора, ч;

$t$  – время, ч;

$m$  – показатель степени, зависит от системы охлаждения.

Превышение температуры обмотки над температурой охлаждающей среды

$$\Theta_{об.} = \Theta_m + \Delta\Theta_{об.(n)} \cdot K^{2m}$$

где  $\Delta\Theta_{об.н.}$  – суммарный перепад температуры между наиболее нагретой точкой изоляции и верхними слоями масла при номинальной нагрузке. Значения  $\Delta\Theta_{об.н.}$  и  $m$  приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения  $\Delta\Theta_{об.н.}$  и  $m$

Система охлаждения	М	Д	Ц, ДЦ
$\Delta\Theta_{об. н.}, ^\circ\text{C}$	23	23	38
$m$	0,8	0,9	1

Температуры масла и обмоток определяют добавлением температуры охлаждающей среды  $\vartheta_0$ :

$$\vartheta_m = \Theta_m + \vartheta_0$$

$$\vartheta_{об} = \Theta_{об} + \vartheta_0$$

Изменение температуры обмотки определяет процесс старения изоляции в течение суток. Износ изоляции удобно характеризовать величиной относительного износа, т. е. отношением суточного износа изоляции в рассматриваемом режиме к номинальному суточному износу (износу в условиях, когда температура обмотки в наиболее нагретой точке постоянна и равна  $98^\circ\text{C}$ ).

Относительный износ изоляции  $\dot{L}$  рассчитывается в соответствии с шестиградусным правилом: при изменении температуры обмотки на  $6^\circ\text{C}$  срок службы трансформатора изменяется в два раза:

$$L = 2^{\frac{\vartheta_{об.-98}}{6}}$$

Систематическая нагрузка по рассматриваемому графику допустима, если среднесуточный относительный износ изоляции не превышает единицы:

$$L = \frac{1}{24} \int_0^{24} L dt \leq 1$$

На графиках (2.2, 2.3, 2.4), построенных для масляных трансформаторов с системой охлаждения Д, постоянной времени 2,5 ч, при



эквивалентной температуре охлаждающей среды 0, 10 и 20 °С. Графики взяты из ГОСТ 14209 -69 [3]. В таблице 2.2 даны постоянные времени трансформаторов, а на рисунке 2.1 – эквивалентный двухступенчатый суточный график нагрузки трансформатора, для которого построены расчетные кривые.

По оси абсцисс отложена кратность  $k$  предшествующей нагрузки трансформатора или коэффициент начальной нагрузки (отношение начальной нагрузки к номинальной), а по оси ординат – коэффициент допустимого превышения нагрузки  $k_{\text{доп}}$  по току или при неизменном напряжении – по полной мощности. Кривые построены для различных продолжительностей перегрузок  $t$ : от 0,5 до 24 ч.

Мощность трансформатора, МВА	0,005–1,0	1,0–6,3	6,3–32	32–63	80–125	125 и выше
Система охлаждения	М		Д		Ц и ДЦ	
Постоянная времени, ч	2,5	3,5	2,5	3,5	2,5	3,5

В случае двухступенчатого рабочего графика нагрузки порядок определения допустимой перегрузки трансформатора по кривым нагрузочной способности следующий:

1) В соответствии с максимальной расчетной нагрузкой намечается тип и номинальная мощность трансформатора  $S_n$  и вычисляется его перегрузка:

$$k_2 = S_2 / S_n;$$

2) Определяется коэффициент начальной нагрузки:

$$k_1 = S_1 / S_n;$$

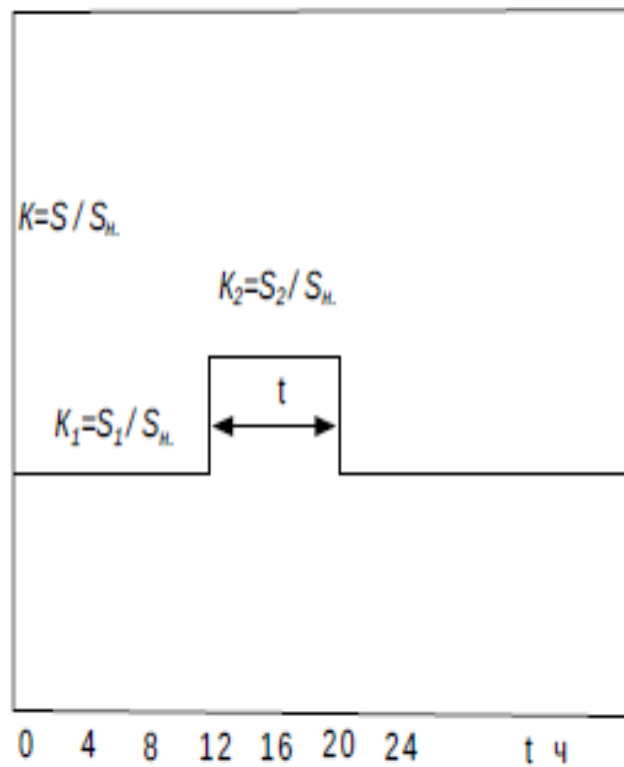


Рисунок 2.1 – Расчетный двухступенчатый график нагрузки трансформатора

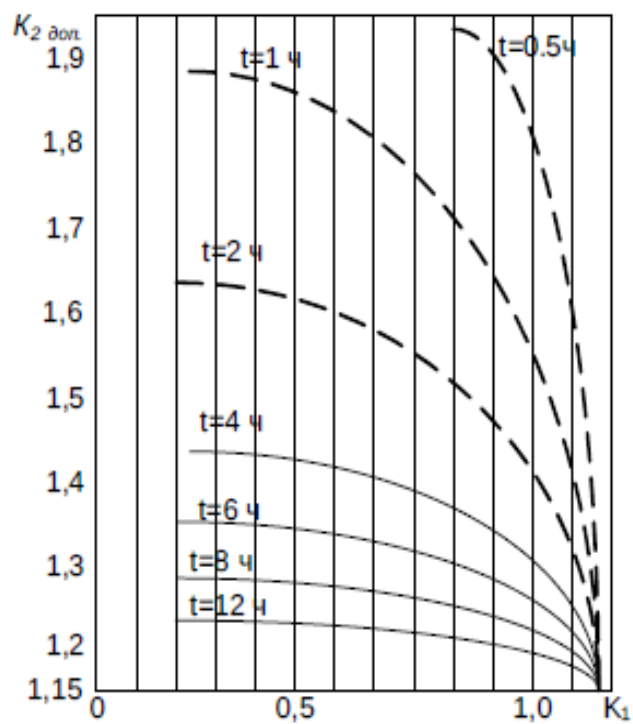


Рисунок 2.2 – График нагрузочной способности трансформаторов с системой охлаждения Д при  $\tau=2,5$  ч и  $\theta=0$  °С

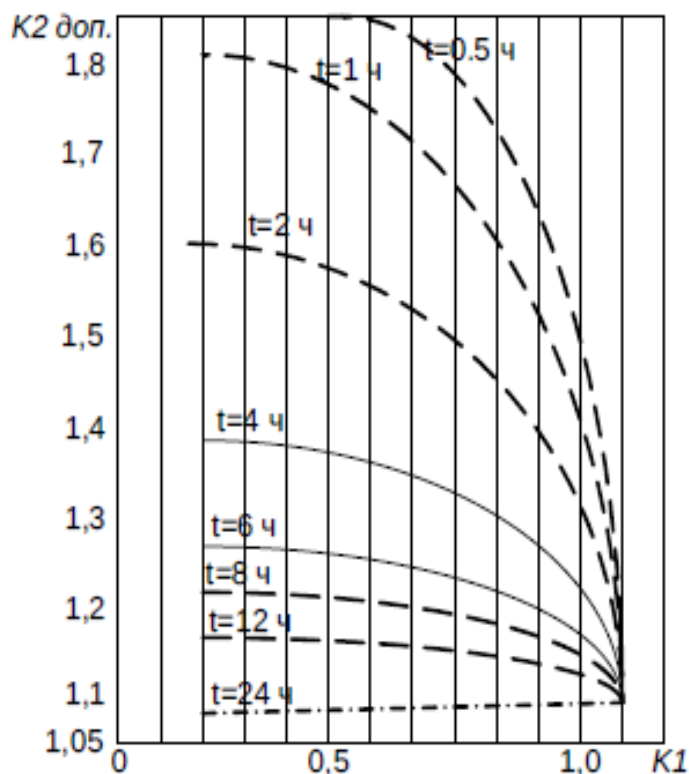


Рисунок 2.4 – Нагрузочная способность трансформаторов с системой охлаждения Д при  $\tau=2,5$  ч и  $\vartheta=+20$  °С

3) пользуясь таблицей 2.2, определяют для намечаемого к установке трансформатора его постоянную времени. В зависимости от вида системы охлаждения, постоянной времени и эквивалентной температуры охлаждающей среды выбирают нужное семейство расчетных графиков нагрузочной способности;

4) по графикам для коэффициента начальной нагрузки  $k_1$  и расчетной продолжительности перегрузки  $t$  находят коэффициент допустимого превышения нагрузки  $k_{2\text{доп.}}$ ;

5) сравнивая расчетный  $k_2$  и допустимый  $k_{2\text{доп.}}$  коэффициенты превышения нагрузки, делают заключение о допустимости такого режима для трансформатора.

Если суточный график многоступенчатый, то его предварительно преобразуют в эквивалентный двухступенчатый трафик с нагрузками:

эквивалентная начальная нагрузка за время 10 ч, предшествующее началу наибольшей перегрузки:

$$S_{1э} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n1} S_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^{n1} t_i}}$$

Эквивалентная нагрузка на второй ступени (при перегрузке):

$$S_{2э} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n2} S_i^2 t_i}{\sum_{i=1}^{n2} t_i}}$$

где  $S_i$  – нагрузка  $i$ -й ступени;  $t_i$  – время  $i$ -й ступени;  $n1$  – число ступеней за время 10 ч до начала перегрузки;  $n2$  – число ступеней за время перегрузки  $t$ .

В случае двух превышений нагрузки над номинальной, меньший максимум учитывают при вычислении  $S_{1э}$ . Расчет  $S_{1э}$  ведут за 10 ч до или после большего максимума в зависимости от того, где расположен меньший максимум. Если трансформатор круглый год работал с одинаковым суточным графиком нагрузки, то при оценке допустимых перегрузок принимают годовую эквивалентную температуру охлаждающей среды. Если летний график нагрузки трансформатора ниже зимнего, то следует воспользоваться сезонными эквивалентными температурами охлаждающей среды и определить отдельно допустимость соответствующих перегрузок зимой и летом.

Аварийные перегрузки – это такие перегрузки, которые можно допустить на трансформатор в редких аварийных случаях (например, при отключении одного из параллельно работавших трансформаторов) без его повреждения. Значения допустимых аварийных перегрузок назначают таким образом, чтобы температуры обмоток и масла трансформатора не превышали значений, при которых происходят необратимые процессы, препятствующие дальнейшей нормальной работе трансформатора. Максимально допустимая температура для масла составляет 115 °С, для изоляции обмоток (в наиболее нагретой точке) -140 °С.

При аварийных перегрузках идут на повышенный против нормального износ изоляции. Так как эти случаи в эксплуатации достаточно редки, а время аварийного режима ограничено, то значительного снижения срока службы против нормального при этом не происходит.

Согласно [7] в аварийных условиях в течение не более 5 суток допускается перегрузка масляных трансформаторов до 40 % на время суточного максимума продолжительностью не более 6 ч в сутки, причем коэффициент начальной нагрузки  $k_1$  не должен быть более 0,93.

Допустимую аварийную перегрузку  $k_{2доп.}=1,4$  следует рассматривать как некоторый условный расчетный коэффициент, используемый при выборе трансформаторов по условиям аварийной перегрузки. Величину допустимой аварийной перегрузки в эксплуатации назначают в зависимости от конкретных условий: графика нагрузки, температуры охлаждающей среды. Ее определяют расчетом теплового режима трансформатора.

**Выбор трансформаторов на подстанциях.** В тех случаях, когда на подстанции оказывается возможным установить один трансформатор, выбор его номинальной мощности производят с учетом способности трансформатора к систематическим перегрузкам.

При установке на подстанции двух трансформаторов выбор их номинальной мощности осуществляют с учетом возможности аварийной перегрузки при повреждении и одном из трансформаторов. В нормальном режиме оба трансформатора работают с заметной недогрузкой.

Если на подстанции имеется три напряжения, то, как правило, устанавливают трехобмоточные трансформаторы или автотрансформаторы, что в большинстве случаев дает заметные экономические выгоды по сравнению с двухобмоточными трансформаторами. Понижающие автотрансформаторы, экономически всегда выгоднее трехобмоточных трансформаторов, но их применение возможно только в тех случаях, когда сети высшего и среднего напряжений работают с эффективно заземленными нейтралями.

Если проектируемая подстанция имеет связь на стороне низшего (среднего) напряжения с электростанцией, то при выборе трансформаторов на подстанции необходимо учитывать протекающие через них дополнительные потоки обменной мощности станции с системой.

**Выбор трансформаторов на электростанциях.** Для электростанций, имеющих местную нагрузку на генераторном напряжении, предварительно составляют характерные суточные графики обменной мощности станции с системой в нормальном режиме. Кроме того, рассматривают потоки обменной мощности в аварийных режимах: а) при выходе из работы одного наиболее крупного генератора станции, подключенного к шинам генераторного напряжения (при этом в случае необходимости остальные генераторы форсируют мощность до номинального значения); б) при аварийном состоянии в системе, когда генераторы данной станции должны форсировать мощность до номинальной. На основании анализа полученных графиков выбирают число и номинальную мощность трансформаторов связи с системой.

Связь с системой через один трансформатор возможна лишь при выполнении двух условий: а) если мощность, выдаваемая станцией в систему в нормальном режиме, не превышает аварийного резерва; б) если снижение тепловых отборов турбины, обусловленное вынужденным ограничением электрической мощности станции при нарушении связи с системой, восполнимо с помощью редукционно–охладительной установки (РОУ) (производительность РОУ обычно рассчитывается на резервирование одной турбины). Установка одного трансформатора связи на станции – довольно редкое явление.

На электростанциях районного типа, выдающих всю вырабатываемую электроэнергию на повышенных напряжениях, генераторы включают в блоки с повышающими трансформаторами (автотрансформаторами). Номинальная мощность трансформатора должна обеспечивать выдачу всей активной и реактивной мощности генератора.

На гидроэлектростанциях часто экономически целесообразно применять укрупненные блоки. Мощность укрупненного блока не должна превышать аварийного резерва в системе.

Трансформаторы и автотрансформаторы для станций и подстанций принимают, как правило, трехфазными с регулированием напряжения под нагрузкой, кроме двухобмоточных трансформаторов, включаемых в блоки с генераторами.

Вышеизложенные методические указания, решения и ответы к задачам составлены в соответствии с действующими стандартами и

нормами. Однако при проектировании электроустановок приходится учитывать значительно более широкий круг обстоятельств, чем задается в условиях задач. Учет этих факторов может изменить решение, заставив выбрать трансформатор большей мощности по сравнению с той, которая оказалась принятой при локально заданных исходных условиях.

### ***Задание:***

#### ***Задача №1***

Трансформатор типа ТД работает по двухступенчатому графику нагрузки (рисунок 2.6) при эквивалентной температуре охлаждающей среды (воздуха) +20 °С. Постоянная времени равна 2,5 ч, отношение потерь короткого замыкания к потерям холостого хода равно 5. Рассчитать тепловой режим трансформатора.

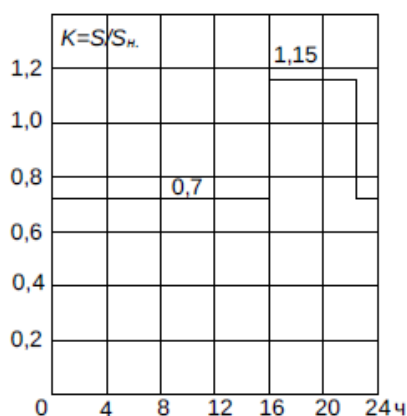


Рисунок 2.6 – Двухступенчатый график

### **Задача №2**

Оценить может ли трансформатор типа ТД-16000/110, рассчитанный на номинальную мощность 16000 кВА, в течение зимнего сезона работать по суточному графику, приведенному на рисунке 2.7.

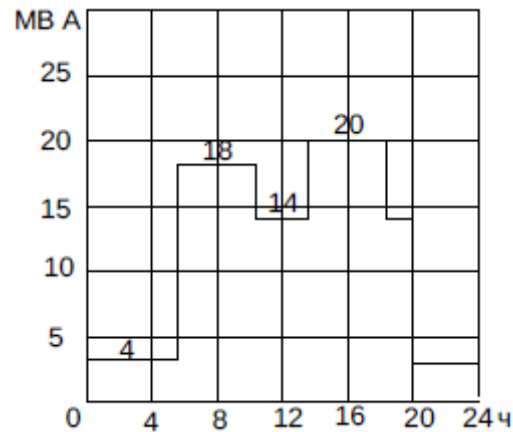


Рисунок 2.7 – Суточный график нагрузки

### **Задача №3**

Определить, может ли трансформатор типа ТД, рассчитанный на номинальную мощность 16000 кВА, работать по суточному графику, приведенному на рисунке 2.7, если эквивалентная летняя температура составляет +20 °С (Ростов-на-Дону).

### **Задача №4**

Пользуясь стандартной шкалой номинальных напряжений, укажите, при каком соотношении напряжений применение двухобмоточного автотрансформатора окажется экономически наиболее выгодным и почему?

### **Задача №5**

Определить номинальную мощность трехфазного автотрансформатора, а также ее составляющие: мощности, передаваемые электрическим и электромагнитным путями, если  $U_{1н.} = 220$  кВ;  $U_{2н.} = 121$  кВ и  $I_{н.} = 328$  А.



### Задача №6

Определить величину наибольшего возможного перенапряжения в сети СН (в долях от номинального фазного напряжения) при металлическом замыкании фазы на землю в сети ВН, если связь осуществляется с помощью автотрансформатора 220/35 кВ. Принять, что сети ВН и СН работают с разземленными нейтралями. Возможно ли применение такого автотрансформатора?

### Задача №7

Выбрать число, тип и номинальную мощность трансформаторов для понижающей подстанции 35/3,5 кВ, предназначенной для электроснабжения потребителей 3 категории с максимальной нагрузкой 11,5 МВт при  $\cos\varphi=0,92$ . Эквивалентная температура воздуха: зимой 0 °С, летом +10 °С. Суточные графики нагрузок в зимний и летний периоды года приведены на рисунке 2.8.

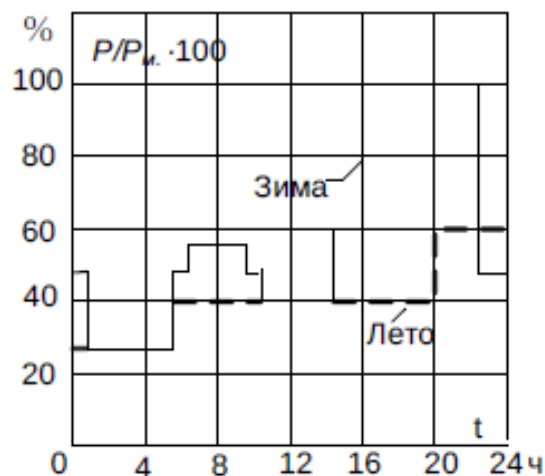


Рисунок 2.8 – Суточные графики нагрузок в зимний и летний периоды

### Задача №8

Выбрать число, тип и номинальную мощность трансформаторов для понижающей подстанции 110/38,5/11 кВ, предназначенной для электроснабжения потребителей 3 категории. Максимальная нагрузка сети СН 6500 кВт при  $\cos\varphi=0,9$ , сети НН–11500 кВт при том же  $\cos\varphi$ .

Эквивалентная температура воздуха  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  летом и  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  зимой. Суточные графики нагрузок сетей СН и НН приведены на рисунке 2.9.

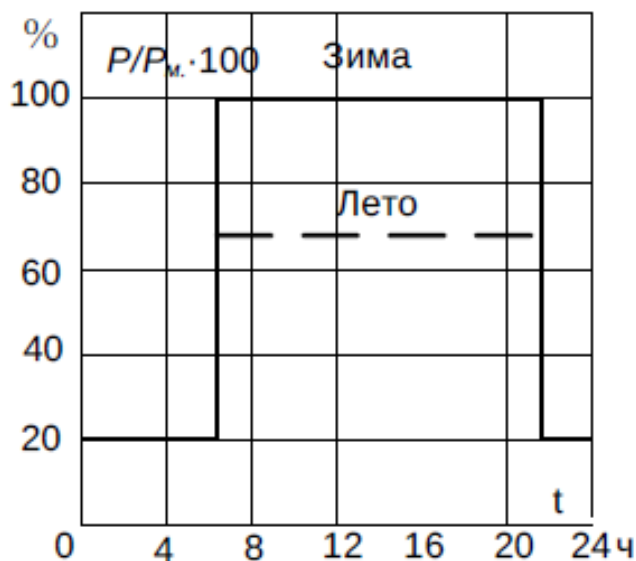


Рисунок 2.9 – Суточные графики нагрузок сетей СН и НН

### Задача №9

Выбрать число, тип и номинальную мощность трансформаторов для понижающей подстанции 110/38,5/11 кВ, предназначенной для электроснабжения потребителей 1, 2 категорий.

Максимальная нагрузка длится 5 ч и составляет: на стороне СН–10 МВт при  $\cos\varphi = 0,8$ , на стороне НН–25 МВт при  $\cos\varphi = 0,9$ . Предшествующая нагрузка составляет 0,7 максимальной.

### Контрольные вопросы:

1. Объясните выбор трансформаторов на подстанциях.
2. Что такое систематические перегрузки?
3. Объясните понятие шестиградусное правило
4. От чего зависит процесс старения изоляции?
5. Изложите порядок определения допустимой перегрузки трансформатора по кривым нагрузочной способности в случае двухступенчатого рабочего графика

***Список литературы:***

***Перечень основной литературы:***

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем : учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - 2-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 359 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 349-350 - ISBN 978-5-7782-2743-9 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438316>

2. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции : учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 111 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 61-63 - ISBN 978-5-7410-1542-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=468847>

***Перечень дополнительной литературы:***

1. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. - 2-е изд. доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 149 с. : ил. - Библиогр.: с. 114 - ISBN 978-5-9729-0207-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493858>

### ***Практическая работа №3***

**Тема:** Проверка проводников на термическую стойкость при коротких замыканиях

**Цель:** Приобрести навык проверки проводников на термическую стойкость при КЗ

**Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:**

Обучающийся должен:

**знать:**

– термическую стойкость проводников при коротких замыканиях;

**уметь:**

– проводить проверку проводников на термическую стойкость при КЗ.

**Актуальность темы:**

Заключается в проведении проверки проводников на термическую стойкость при коротких замыканиях.

**Теоретическая часть:**

В отечественной практике степень термического воздействия тока КЗ на проводники и электрические аппараты принято определять по значению интеграла Джоуля:

$$B_{к.} = \int_0^{откл} i_{kt}^2 dt.$$

Где  $i_{k.t}$  ток в произвольный момент времени, А;  $t_{откл.}$  – расчетная продолжительность КЗ, с;  $t$  – время, с.

Без существенной погрешности этот интеграл можно принять равным сумме интегралов от периодической  $B_{к. п.}$  и апериодической  $B_{к. а.}$  оставляющих тока КЗ, т. е.

$$B_{к.} = B_{к. п.} + B_{к. а.}$$

Методика расчета интеграла Джоуля зависит от исходной расчетной схемы электроустановки, положения расчетной точки КЗ и ее удаленности от генераторов, синхронных компенсаторов или электродвигателей.

При этом возможны четыре случая (четыре типа расчетных схем):

1. Если исходная расчетная схема имеет произвольный характер, но для всех генераторов (синхронных компенсаторов) расчетное КЗ является удаленным, т. е. отношение действующего значения периодической составляющей тока любого генератора (синхронного компенсатора) в начальный момент КЗ к его номинальному току не достигает двух, то путем преобразования эквивалентной схемы замещения все источники энергии (генераторы, синхронные компенсаторы и источники более удаленной части системы) следует заменить одним эквивалентным источником, ЭДС которого считать неизменной по амплитуде, а индуктивное сопротивление равным результирующему эквивалентному сопротивлению расчетной схемы. При этом интеграл Джоуля определяется по формуле:

$$B_{\text{к.}} = I_{\text{н.с.}}^2 \left[ t_{\text{откл.}} + T_{\text{а.г.}} (1 - \exp(-2t_{\text{откл.}}/T_{\text{а.эк.}})) \right],$$

где  $I_{\text{н. с.}}$  – действующее значение периодической составляющей тока КЗ от эквивалентного источника энергии (системы), А;  $T_{\text{а. эк.}}$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ от эквивалентного источника:

$$T_{\text{а. эк.}} = x_{\text{эк.}}(R=0) / (\omega R_{\text{эк.}}(x=0)),$$

где  $x_{\text{эк.}}(R=0)$  и  $R_{\text{эк.}}(x=0)$  – результирующие эквивалентные сопротивления расчетной схемы, найденные путем учета соответственно только индуктивных и только активных сопротивлений элементов этой схемы.

В тех случаях, когда  $t_{\text{откл.}} \geq 3T_{\text{а. эк.}}$  интеграл Джоуля можно определять по более простой формуле:

$$B_{\text{к.}} \approx I_{\text{н. с.}} (t_{\text{откл.}} + T_{\text{а. эк.}}).$$

Если исходная расчетная схема содержит один или несколько однотипных генераторов (синхронных компенсаторов), причем последние

находятся в одинаковых условиях относительно расчетной точки КЗ (все машины или блоки присоединены к общим шинам), а расчетное КЗ является близким, т. е. начальное действующее значение периодической составляющей тока генератора (синхронного компенсатора) превышает его номинальный ток в два раза и более, то интеграл Джоуля следует вычислять, используя выражение

$$B_K = I_{п.о.г.} [B_{к.г.} t_{откл.} + T_{а.г.} (1 - \exp(-2t_{откл.}/T_{а.г.}))]$$

где  $I_{п.о.г.}$  – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от генератора (синхронного компенсатора), А;  $T_{а.г.}$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ от генератора (синхронного компенсатора), с;  $B_{к.г.}$  – относительный интеграл Джоуля от генератора,

$$B_{к.г.} = \frac{\int_0^{откл.} I_{н.т.г.}^2 dt}{I_{п.о.г.}^2 t_{откл.}},$$

где  $I_{н. т. г.}$  – действующее значение периодической составляющей тока КЗ от генератора (синхронного компенсатора) в произвольный момент времени, А.

Значения относительного интеграла Джоуля при разных удаленностях расчетной точки КЗ от генератора (синхронного компенсатора)  $I_{п.о.г.ном}$  т. е. разных отношениях начального действующего значения периодической составляющей тока машины к ее номинальному току, могут быть определены по кривым (рисунок 3.1).

При  $t_{откл} \geq 3T_{а.г.}$  приближенно для вычисления интеграла Джоуля можно использовать формулу:

$$B_K = I_{п.о.г.}^2 (B_{к.г.} t_{откл.} + T_{а.г.})$$

3. Если исходная расчетная схема содержит произвольное число источников энергии, для которых расчетное КЗ является удаленным, и, кроме того, генератор (синхронный компенсатор), который при КЗ оказывается связанным с точкой КЗ по радиальной схеме и для которого это КЗ является

близким, то интеграл Джоуля от периодической составляющей тока КЗ следует рассчитывать по формуле

$$B_{к.п} = (I_{п.с.}^2 + 2I_{п.с.}I_{п.о.г.}Q_{к.г.} + I_{п.о.г.}^2 B_{к.г.})t_{откл},$$

где  $I_{п.с.}$  – действующее значение периодической составляющей тока КЗ от удаленных источников энергии, А;  $Q_{к.г.}$  – относительный интеграл от периодической составляющей тока в месте КЗ, обусловленного действием генератора,

$$Q_{к.г.} = \frac{\int_0^{откл.} I_{п.т.г.} dt}{I_{п.о.г.} t_{откл.}}$$

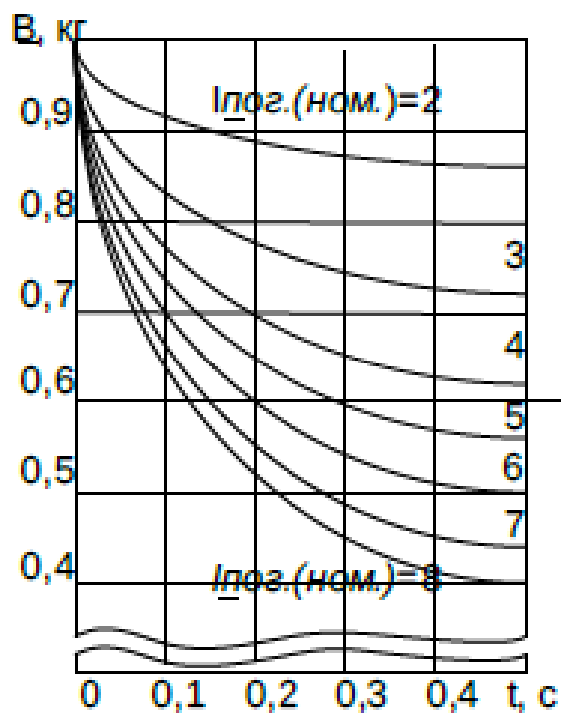


Рисунок 3.1 – Кривые для определения  $B_{к.г.}$  от синхронных генераторов с тиристорной системой возбуждения

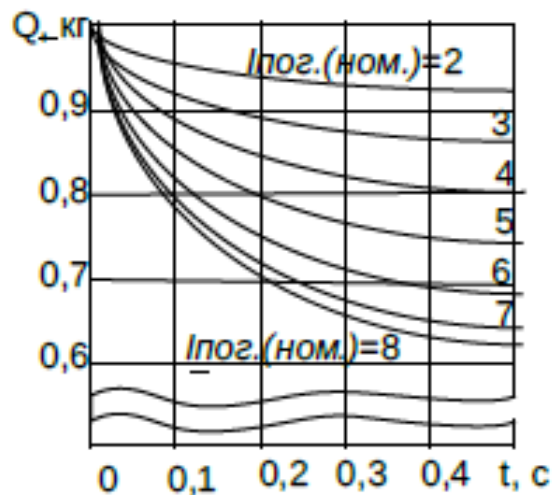


Рисунок 3.2 – Кривые для определения  $Q_{к.г.}$  от синхронных генераторов с тиристорной системой возбуждения

Значение относительного интеграла  $Q_{к.г.}$  при разных удаленностях расчетной точки КЗ от генератора (синхронного компенсатора) находят по кривым (рисунок 3.2).

Интеграл Джоуля от апериодической составляющей тока КЗ

$$B_{к.п.} = I_{п.с.}^2 T_{а.эк.} (1 - \exp(-2t_{откл.}/T_{а.г.})) + I_{п.о.г.}^2 T_{а.г.} (1 - \exp(-2t_{откл.}/T_{а.г.})) + \frac{4I_{п.с.}I_{п.о.г.}}{\frac{1}{T_{а.эк.}} + 1/T_{а.г.}} \left[ 1 - \exp\left(-t_{откл.} \left(\frac{1}{T_{а.эк.}} + 1/T_{а.г.}\right)\right) \right]$$

Если исходная расчетная схема содержит различные источники энергии, для которых расчетное КЗ является удаленным, и группу однотипных электродвигателей (синхронных или асинхронных), а расчетная точка КЗ находится на шинах, куда подключены электродвигатели, или вблизи этих шин, то при определении интеграла Джоуля все электродвигатели допустимо заменять одним эквивалентным электродвигателем, мощность которого равна сумме номинальных мощностей отдельных электродвигателей.

При этом интеграл Джоуля от апериодической и периодической составляющих следует вычислять, как и в предыдущем случае, согласно (3.2) и (3.3) или (3.3 а). Вместо  $I_{п.о. г.}$  и  $T_{а. г.}$  необходимо подставлять значения соответствующих величин  $I_{п.о. д.}$  и  $T_{а. д.}$  для эквивалентного



электродвигателя, вместо  $V_{к.г.}$  и  $Q_{к.г.}$  в (3.2) – значения функций  $V_{к.д.}$  и  $Q_{к.д.}$  электродвигателя. Последние для синхронного электродвигателя могут быть найдены по кривым (рисунок 3.3 и 3.4), а для асинхронного электродвигателя – по кривым (рисунок 3.5 и 3.6).

Проверка электрического аппарата на термическую стойкость при КЗ заключается в сравнении найденного при расчетных условиях значения интеграла Джоуля с его допустимым для данного аппарата значением  $V_{тер.}$ . Электрический аппарат удовлетворяет условию термической стойкости, если выполняется условие:

$$V_{к.} \leq V_{тер.}$$

Допустимое значение интеграла Джоуля зависит от соотношения между расчетной продолжительностью КЗ  $t_{откл.}$  и предельно допустимым временем воздействия нормированного тока термической стойкости  $t_{тер. норм.}$ , указываемым заводом-изготовителем аппарата. Если  $t_{откл.} \geq t_{тер. норм.}$ , то

$$V_{тер.} = I_{тер.норм.}^2 \cdot t_{тер.норм.}$$

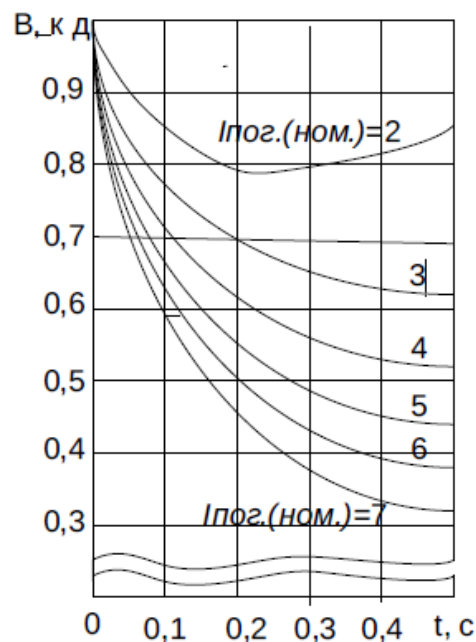


Рисунок 3.3 – Кривые для определения от  $V_{к.д.}$  синхронного электродвигателя

Проверка проводников на термическую стойкость при КЗ заключается в определении их температуры нагрева к моменту отключения КЗ и сравнении этой температуры с предельно допустимой температурой нагрева при КЗ. Последняя зависит от вида проводника, его материала и других факторов. Нормированные значения предельно допустимых температур нагрева разных проводников при КЗ приведены в таблице 3.1.

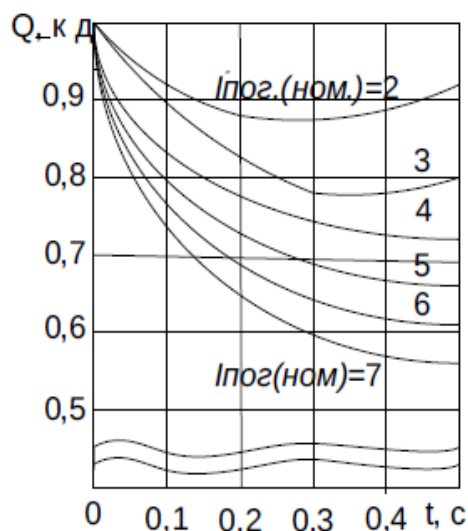


Рисунок 3.4 – Кривые для определения  $Q_{к.д.}$  синхронного электродвигателя

Расчет температуры нагрева проводников к моменту отключения КЗ ведут с использованием кривых зависимости этой температуры от функции  $A_{\vartheta}$  – (рисунок 3.7). Расчет ведут в следующем порядке:

- выбирают кривую, соответствующую материалу проверяемого проводника; по этой кривой, исходя из начальной температуры проводника  $\vartheta_i$  определяют начальное значение функции  $A_{\vartheta.н.}$ ,  $A \text{ с}^2/\text{мм}^2.н.$ ,  $A \text{ с}^2/\text{мм}^4$ ;
- используя изложенную выше методику, вычисляют значение интеграла Джоуля;
- находят значение функции  $A_{\vartheta.ке.}$ , соответствующее конечной температуре нагрева проводника  $\vartheta_{н.}$ ;

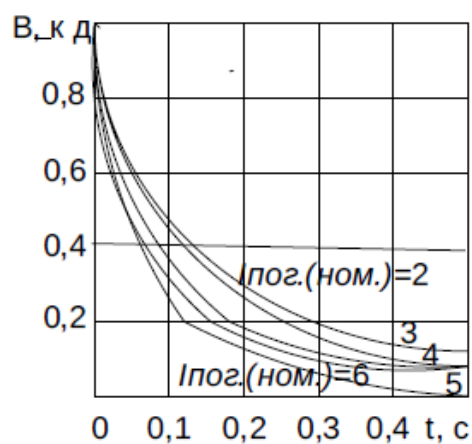


Рисунок 3.5 – Кривые для определения  $V_{к.д.}$  от асинхронного электродвигателя

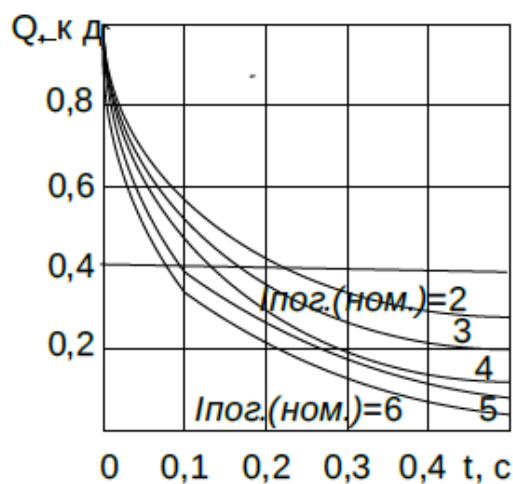


Рисунок 3.6 – Кривые для определения  $Q_{к.д.}$  от асинхронного электродвигателя

Если при выборе сечения проводника определяющим условием является его термическая стойкость при КЗ, то исходя из этого условия по кривым на рисунке 3.7 находят значение функции  $A_{л. доп.}$ , соответствующее предельно допустимой температуре нагрева проводников при КЗ, и определяют минимальное сечение проводника, при котором обеспечивается его термическая стойкость:

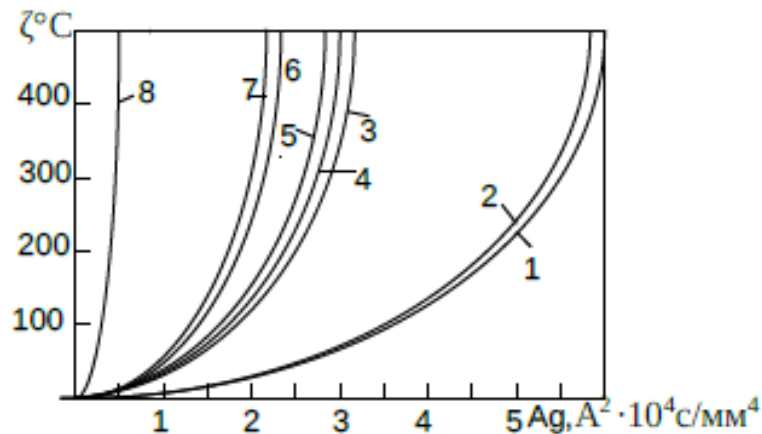


Рисунок 3.7 – Кривые для определения температуры нагрева проводников из различных материалов при КЗ 1 – ММ; 2 – МТ; 3 – АМ; 4 – АТ; 5 – АДО, АСТ; 6 – АД31Т1; 7 – АД31Т; 8 – СтЗ.

### **Задание:**

#### **Задача №1**

Проверить, будет ли термически устойчив трансформатор тока, установленный в цепи со следующими значениями тока КЗ (периодическая составляющая):  $I_{п.о.}=60$  кА,  $I_{п. 0,2}=50$  кА,  $I_{п. 0,6}=40$  кА. Постоянная времени затухания апериодического тока  $T_a=0,07$  с. Время отключения КЗ составляет 0,6 с. Трансформатор тока  $U_n=6$  кВ,  $I_n=1000$  А, односекундная кратность тока термической устойчивости  $k_T=80$ .

#### **Задача №2**

Определить конечную температуру медной шины прямоугольного сечения с размерами  $40 \times 4$  мм<sup>2</sup>. Периодическая составляющая тока КЗ не затухает и равна 25 кА. Время отключения КЗ 2,0 с. Постоянная времени апериодического тока  $T_a=0,08$  с. До КЗ токовая нагрузка шины составляла  $0,7 I_{доп}$ . Температура воздуха равна +25 °С.

#### **Задача №3**

Проверить трехжильный кабель с бумажной изоляцией, с алюминиевыми жилами сечением 70 мм<sup>2</sup> на термическую устойчивость в

режиме КЗ. Периодическая составляющая тока КЗ - 7 кА (незатухающая), время отключения КЗ - 1,5 с. Температура жилы до КЗ равна 50 °С. Тепловыделением от аperiodического тока пренебречь.

#### Задача №4

Проверить термическую устойчивость шин I при КЗ в цепи трансформатора собственных нужд  $T_{с.н.}$  мощностью 6,3 МВА (рисунок 3.8).

Условию длительного режима удовлетворяют алюминиевые шины прямоугольного сечения 50·6 мм<sup>2</sup>. Периодические составляющие тока КЗ на шинах 10,5 кВ станции равны: от системы  $I_{н.с.}=20$  кА (незатухающая), от каждого генератора  $I_{н.г.}=13,5$  кА.

Постоянную времени аperiodического тока для всех ветвей принять равной 0,07 с; время отключения КЗ- 0,5 с. До КЗ нагрузка шин составляла 65 % допустимого тока. Температура воздуха +25 °С.

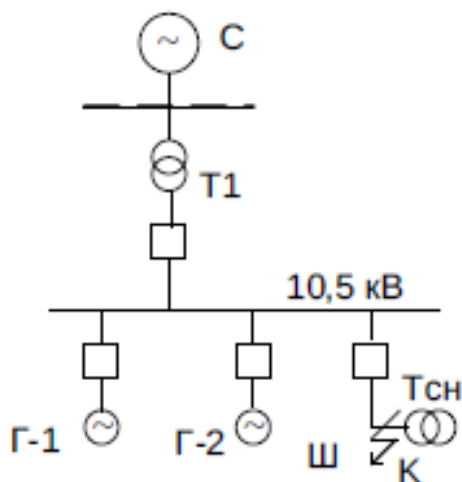


Рисунок 3.8 – Расчетная схема

#### Задача №5

Определить минимальное стандартное сечение кабеля с алюминиевыми жилами термически устойчивого при КЗ в цепи, где периодическая составляющая тока КЗ не затухает и равна 7,5 кА. Время действия релейной защиты в цепи составляет 1,8 с, а полное время отключения выключателя

0,15 с. Напряжение сети 10 кВ. Нагревом от апериодической составляющей тока КЗ пренебречь.

### **Задача №6**

Определить минимальное сечение термически устойчивой алюминиевой шины в цепи секционного выключателя СВ подстанции (рисунок 3.9). Периодический незатухающий ток КЗ на шинах 10 кВ составляет: при двух включенных трансформаторах 40 кА; при одном включенном трансформаторе 28 кА. Время отключения КЗ - 0,6 с. Постоянная времени апериодического тока 0,07 с. Дополнительно найти, как измениться искомое сечение, если шину выполнить из меди

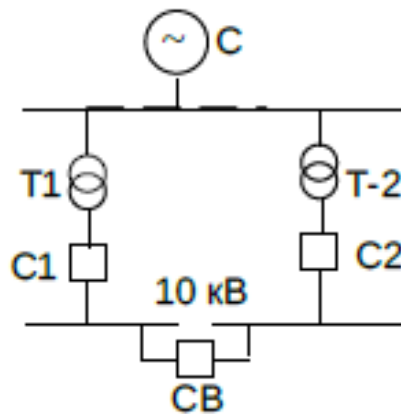


Рисунок 3.9 – Расчетная схема

### **Задача №7**

Определить максимально допустимую продолжительность КЗ в сети из условия обеспечения термической устойчивости кабеля с алюминиевыми жилами сечением  $70 \text{ мм}^2$ , с бумажной пропитанной изоляцией, если незатухающий периодический ток в цепи равен 8 кА. До короткого замыкания кабель был нагружен длительно допустимым током. Нагревом от апериодической составляющей тока КЗ пренебречь.

### **Контрольные вопросы:**

1. От чего зависит методика расчета интеграла Джоуля?

2. В чем заключается проверка проводников на термическую стойкость при КЗ?

3. Как осуществляется расчет температуры нагрева проводников к моменту отключения КЗ с использованием кривых зависимости температуры от функции  $A_9$ ?

***Список литературы:***

***Перечень основной литературы:***

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем : учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - 2-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 359 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 349-350 - ISBN 978-5-7782-2743-9 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438316>

2. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции : учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 111 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 61-63 - ISBN 978-5-7410-1542-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=468847>

***Перечень дополнительной литературы:***

1. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. - 2-е изд. доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 149 с. : ил. - Библиогр.: с. 114 - ISBN 978-5-9729-0207-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493858>

## ***Практическая работа №4***

***Тема:*** Электродинамические силы в электроустановках.

***Цель:*** Анализ и расчет электродинамических нагрузок, действующие на шины

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– определение электродинамических сил в электроустановках;

***уметь:***

– проводить анализ и расчет электродинамических нагрузок, действующие на шины

***Актуальность темы:***

Заключается в определении электродинамических сил в электроустановках

***Теоретическая часть:***

При расчете нагрузок на шины последние считаются достаточно длинными и концевые эффекты не учитываются. Электродинамические нагрузки, действующие на параллельные шины, распределены по длине равномерно.

Для параллельных шин, расположенных в одной плоскости, максимальные значения нагрузок при двух- и трехфазных КЗ наступают примерно через 0,01 с и равны, Н/м,

$$q_{max} = \alpha i^2 / \alpha,$$

Если размеры поперечного сечения шин близки к расстоянию между ними, то при расчете нагрузок следует учитывать коэффициент формы. В этом случае для шинной конструкции при двухфазном КЗ, а также для



проводников одной фазы, состоящих из двух элементов, при любом виде КЗ наибольшие нагрузки вычисляются как:

$$q_{max} = k_{ф.} \cdot \alpha \cdot i_{уд.}^2 / \alpha,$$

Для шин, расположенных по вершинам треугольника (в частном случае в одной плоскости), наибольшие нагрузки при трехфазном КЗ находятся согласно по формуле:

$$q_{max} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10^{-7}}{\alpha} i_{уд.}^2 \cdot \xi$$

Таблица 4.1 – Коэффициент максимальной нагрузки

Расположение шин	Фаза	Коэффициент $\xi$ максимальной нагрузки			
		Результирующе й	Изгибающе й	Растягивающе й	Сжимающе й
В одной плоскости (рисунок 4.1а)	А,С	0,93	0,93	0,00	0,00
	В	1,00	1,00	0,00	0,00
По вершинам прямоугольного равнобедренного треугольника (рисунок 4.1б)	А	0,87	0,87	0,29	0,87
	В	0,95	0,43	0,93	0,07
	С	0,95	0,93	0,14	0,43
По вершинам Равностороннего треугольника (рисунок 4.1в)	А	1,00	0,94	0,25	0,75
	В	1,00	0,50	1,00	0,00
	С	1,00	0,94	0,25	0,75
По вершинам Равностороннего треугольника (рисунок 4.1г)	А,В, С	1,00	0,50	1,00	0,00

### Задание:

#### Задача №1

Определить наибольшие результирующие и изгибающие электродинамические нагрузки при трехфазном КЗ, действующие на шины, расположенные в одной плоскости (рисунок 4.1а), а также по вершинам прямоугольного равнобедренного треугольника (рисунок 4.1б) и равностороннего треугольника (рисунок 4.1в). Расстояние между шинами (во всех конструкциях)  $a = 0,4$  м, ударный ток КЗ  $i_{уд.} = 50$  кА.

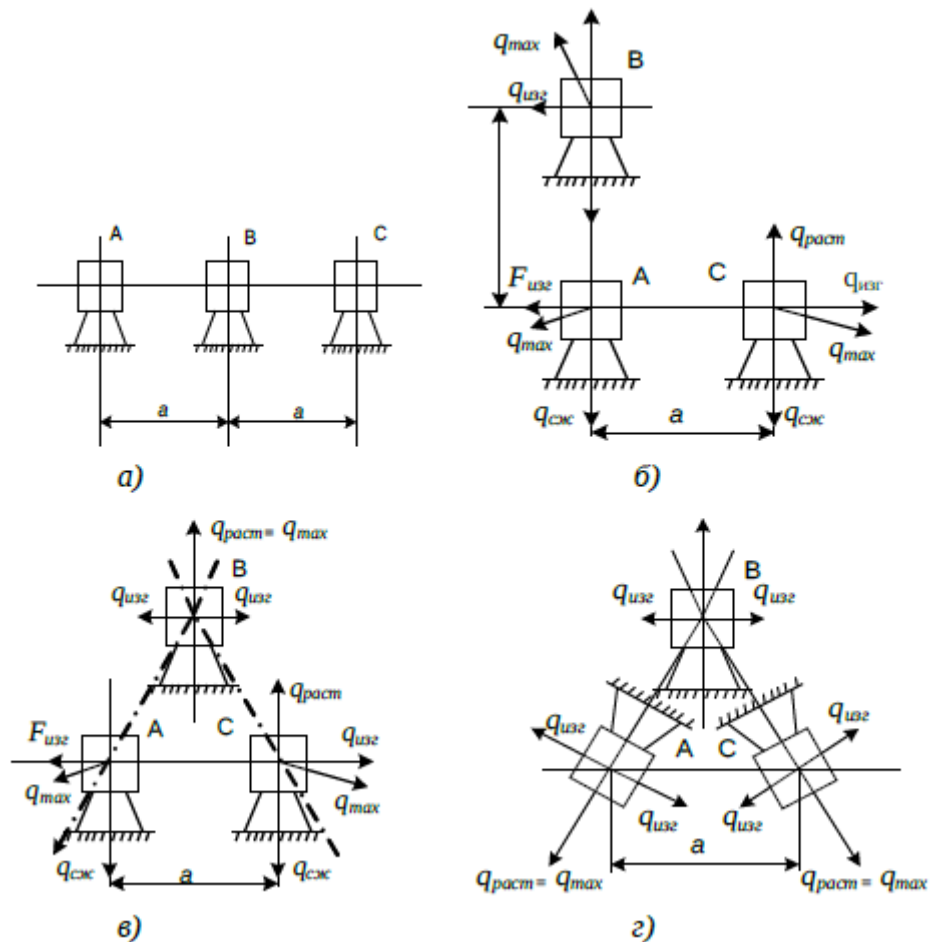


Рисунок 4.1 – Шинные конструкции

#### Задача №2

Определить наибольшие электродинамические нагрузки на прямоугольные шины, расположенные на ребро, при двухфазном КЗ. Сечение шин 80x8 мм, ударный ток КЗ  $i_{уд.} = 20$  кА, расстояние между осями шин принято 160, 80, 48, 32 и 16 мм.

### ***Контрольные вопросы:***

1. Какие принимаются допущения для расчета нагрузок на шины?
2. Как влияет взаимное расположение фаз на электродинамические нагрузки?
3. Как определяются максимальные значения нагрузок при КЗ для:
  - Параллельных шин. Через какое время наступает?
  - Для шин, расположенных по вершинам равнобедренного прямоугольного треугольника?
  - Для шин, расположенных по вершинам равностороннего треугольника?
4. При каком расположении шин электродинамические нагрузки будут минимальны?
5. Как влияют расстояния между фазами на электродинамические нагрузки?

### ***Список литературы:***

#### ***Перечень основной литературы:***

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем : учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - 2-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 359 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 349-350 - ISBN 978-5-7782-2743-9 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438316>
2. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции : учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 111 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с.

61-63 - ISBN 978-5-7410-1542-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL:  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=468847>

***Перечень дополнительной литературы:***

1. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. - 2-е изд. доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 149 с. : ил. - Библиогр.: с. 114 - ISBN 978-5-9729-0207-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL:  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493858>

## ***Практическая работа №5***

***Тема:*** Проверка шинных конструкций на электродинамическую стойкость.

***Цель:*** Приобрести навыки проверки шинных конструкций

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– определение электродинамических сил в электроустановках;

***уметь:***

– проводить проверку шинных конструкций на электродинамическую стойкость.

***Актуальность темы:***

Заключается в проверке шинных конструкций на электродинамическую стойкость.

***Теоретическая часть:***

Условия электродинамической стойкости изоляторов и шин и расчетная схема шинной конструкции.

Электродинамической стойкостью шинной конструкции называется свойство конструкции выдерживать без повреждений механические воздействия, создаваемые токами КЗ.

Шинная конструкция считается электродинамически стойкой, если максимальное расчетное напряжение в материале шин  $\sigma_{расч.}$  и максимальные расчетные нагрузки на изоляторы  $F_{расч.}$  не превосходят допустимых значений, т. е.

$$\sigma_{расч.} \leq \sigma_{доп.},$$

$$F_{расч.} \leq F_{доп.}.$$

Согласно ПУЭ (правило устройства электроустановок) допустимое напряжение  $\sigma_{доп.}$  принимается равным 70 % временного сопротивления разрыву (предела прочности) материала шин  $\sigma_{в}$ , т. е.:

$$\sigma_{доп.} = 0,7\sigma_{в.}$$

Допустимая нагрузка на изолятор  $F_{доп.}$  принимается равной 60 % от минимальной разрушающей нагрузки  $F_{разр.}$  приложенной к головке изолятора, т. е.:

$$F_{доп.} = 0,6 F_{разр.}$$

Для современных опорных (стержневых) изоляторов 6...35 кВ с внутренней заделкой арматуры (рисунок 5.1а) расстояние  $H$  примерно равно высоте изолятора  $H_{из}$ . Для изоляторов 110 кВ (а также некоторых типов изоляторов 10...35 кВ) с внешним креплением арматуры (рисунок 5.1б) опасное сечение проходит по верхней торцевой поверхности опорного фланца, для опорных штыревых изоляторов (рисунок 5.1в) – проходит по плоскости соединения чугунного штыря и фарфорового тела.

В качестве расчетной схемы шины принимают балку, заземленную или шарнирно опертую на опоры (таблица 5.1). Различают следующие основные типы шинных конструкций и соответствующие им расчетные схемы:

Шинные конструкции с разрезными шинами, длина целых (или сварных) участков которых равна длине пролета. Расчетной схемой пролета таких конструкций служит балка с шарнирным опиранием (схема 1, таблица 5.1). Обычно расчетной схеме 1 отвечают шинные конструкции напряжением 110 кВ и выше.

Шинные конструкции с разрезными шинами, длина которых равна длине двух пролетов. Расчетная схема пролета такой конструкции представляет собой балку с жестким опиранием (заземлением) на одной и шарнирным опиранием на другой опоре (схема 2). Эти конструкции иногда находят применение в РУ 110...220 кВ, реже – до 35 кВ.

Многопролетные конструкции с неразрезными (цельными или сварными) шинами. Средние пролеты ошиновки отвечают расчетной схеме балки с жестким опиранием (защемлением) на обеих опорах (схема 3). Конструкции широко используются в РУ до 35 кВ.

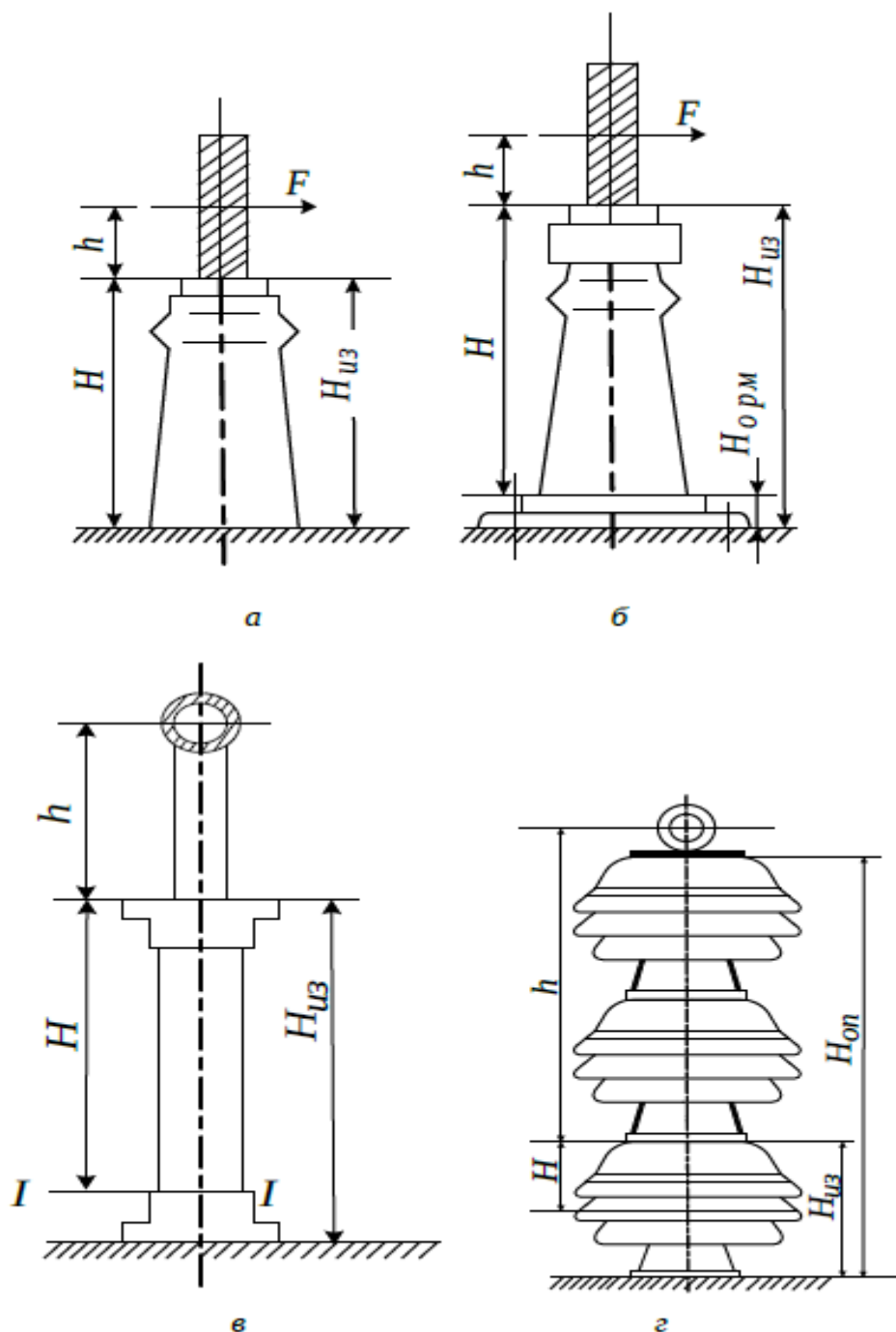


Рисунок 5.1 – К определению допустимых нагрузок на изоляторы

Опоры шин (т. е. изоляторы и основания, на которых они крепятся) в расчетах принимаются упругоподатливыми или абсолютно жесткими. Как

правило, опоры можно считать абсолютно жесткими (не участвующими в колебаниях при КЗ) в РУ напряжением до 35 кВ включительно. В РУ напряжением 110 кВ и выше расчет электродинамической стойкости шинных конструкций следует проводить с учетом упругой податливости опор (изоляторов).

### ***Задание:***

#### ***Задача №1***

Проверить на электродинамическую стойкость шинную конструкцию в цепи трансформатора собственных нужд ТЭЦ (рисунок 1.4). Шины расположены в одной плоскости, расстояние между фазами,  $a = 0,7$  м; длина пролета шины  $l = 1,2$  м. Согласно результатам расчетов (см. практическое занятие 1, задача 4) в цепи трансформатора собственных нужд выбраны алюминиевые шины прямоугольного сечения 100х6 мм. Масса шины  $m = 1,612$  кг/м [1, таблицы 7.2]. Ударный ток КЗ в этой цепи  $i_{уд.} = 249,1$  кА.

#### ***Задача №2***

Определить марку алюминиевого сплава, из которого изготовлены шины, и тип изолятора шинной конструкции, фазы которой расположены по вершинам прямоугольного равнобедренного треугольника (см. рисунок 5.1б).

Шины имеют полый профиль с каналом квадратного сечения «труба квадратная». Высота стенки шины  $h_1 = 60$  мм, толщина  $s = 4$  мм. Длина пролета  $l = 1,5$  м; расстояние между фазами  $a = 0,5$  м. Ударный ток КЗ 65 кА. Номинальное напряжение электроустановки – 10 кВ.

#### ***Задача №3***

Определить количество прокладок в двухполосной шине и марку изоляторов для открытого токопровода в электроустановке 10 кВ.

Шины изготовлены из технического алюминия марки АД0. Сечение одной полосы пакета шины  $s = h \cdot b = 100 \cdot 10 = 1000$  мм<sup>2</sup>. Фазы токопровода



расположены в одной горизонтальной плоскости. Расстояние между фазами  $a=1,5$  м. Полосы пакета установлены на изоляторах плашмя (широкой стороной). Расстояние между осями полос пакета шины  $aэ.=2 \cdot b=2 \cdot 10=20$  мм. Длина пролета шины  $l=1,5$  м. Ударный ток КЗ  $i_{уд.} = 50$  кА.

#### **Задача №4**

Определить наибольшие нагрузки на изоляторы и наибольшие напряжения в материале шин жесткой ошиновки ОРУ 110 кВ при ударном токе КЗ 50 кА.

Вычислить наибольший допустимый ударный ток КЗ по условию электродинамической стойкости этой конструкции для решения вопроса о возможности сохранения установленных изоляторов и шин при расширении распределительного устройства и увеличении уровня токов КЗ.

Трубчатые шины кольцевого сечения внешним диаметром  $D = 90$  мм, внутренним –  $d = 80$  мм изготовлены из алюминиевого сплава марки 1915Т (модуль упругости  $E = 7,1 \cdot 10^{10}$  Па, плотность  $\delta = 2770$  кг/м<sup>3</sup>). Конструкция смонтирована из разрезных шин. Длина целого участка равна длине пролета  $l= 9$  м. Фазы расположены в одной (горизонтальной) плоскости. Расстояние между осями шин смежных фаз  $a = 1,4$  м.

Шины установлены на изоляционных опорах (колоннах), собранных из трех опорно-штыревых изоляторов типа ОНШ-35-2000 УХЛ1 (см. рисунок 3.1г). Разрушающая нагрузка изолятора  $R_{разр.} = 20\,000$  Н. Масса опоры  $М_{оп.} = 134$  кг. Высота каждого изолятора  $R_{из.} = 400$  мм, высота всей опоры  $H_{оп.}=1200$  мм.

#### **Задача №5**

Проверить электродинамическую устойчивость алюминиевых прямоугольных шин сечением  $80 \times 8$  мм<sup>2</sup>. Шины закреплены на изоляторах плашмя, расстояние между осями фаз  $a = 70$  см, пролёт между изоляторами

**Задача №6**

Проверить электродинамическую устойчивость шинной конструкции, выполненной в виде двухполосного пакета из алюминиевых шин сечением  $100 \times 8 \text{ мм}^2$ . Расстояние между фазами  $a = 70 \text{ см}$ , пролёт между изоляторами  $l = 120 \text{ см}$ , Расстояние между прокладками  $l_{\text{н.}} = 40 \text{ см}$  (см. рисунок 5.2). Ударный ток КЗ в цепи составляет  $75 \text{ кА}$ .

Проверить электродинамическую устойчивость шинной конструкции, выполненной в виде двухполосного пакета из алюминиевых шин сечением  $100 \times 8 \text{ мм}^2$ . Расстояние между фазами  $a = 70 \text{ см}$ , пролёт между изоляторами  $l = 120 \text{ см}$ , Расстояние между прокладками  $l_n = 40 \text{ см}$  (см. рисунок 5.2). Ударный ток КЗ в цепи составляет  $75 \text{ кА}$ .

Рисунок 5.2 – Шинная конструкция

Найти максимально допустимое расстояние между прокладками  $l_n$  двухполосного пакета из медных шин сечением 100 10 мм<sup>2</sup> (расположение шин на рисунке 5.3). Пролёт между изоляторами равен 140 см. Начальный периодический ток трёхфазного КЗ составляет 50 кА. Постоянная времени затухания аperiodического тока  $T_a = 0,08$  с.

Рисунок 5.3 – К расчету задачи 7

### ***Контрольные вопросы:***

1. Что называется, электродинамической стойкостью шинных конструкций?
2. Какая шинная конструкция называется электродинамически стойкой?
3. Перечислите основные типы шинных конструкций и соответствующие им расчетные схемы?
4. Каков порядок расчета электродинамической стойкости изоляторов и шин, расположенных в одной плоскости?
5. Каков порядок расчета составных шин?
6. Каков порядок расчета шин, фазы которых расположены по вершинам треугольника?
7. Каков порядок расчета шин с упругоподатливыми опорами?

### ***Список литературы:***

#### ***Перечень основной литературы:***

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем : учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - 2-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 359 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 349-350 - ISBN 978-5-7782-2743-9 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438316>
2. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции : учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 111 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 61-63 - ISBN 978-5-7410-1542-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=468847>

***Перечень дополнительной литературы:***

1. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. - 2-е изд. доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 149 с. : ил. - Библиогр.: с. 114 - ISBN 978-5-9729-0207-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493858>

## ***Практическая работа №6***

***Тема:*** Выбор выключателей.

***Цель:*** Приобрести навык расчета и выбора выключателей

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– определение выключателя;

***уметь:***

– проводить расчет и выбор выключателей.

***Актуальность темы:***

Заключается в приобретении навыков расчета и правильного выбора выключателей.

***Теоретическая часть:***

Для защиты электрических сетей и электрооборудования до 1 кВ от ненормальных режимов применяют автоматические выключатели, плавкие предохранители и различные комбинированные аппараты.

Предохранители дешевле и проще в эксплуатации, чем автоматы, но автоматические выключатели по сравнению с предохранителями имеют ряд преимуществ: при перегрузках и КЗ отключают все фазы защищаемой сети и исключают неонифазные режимы; уменьшают длительность простоя электроустановок; более безопасны в обслуживании.

Автоматы применяют при использовании средств и устройств автоматики и в случаях необходимости автоматического или дистанционного управления, быстрого восстановления напряжения и при частых аварийных отключениях.

В других случаях рекомендуется применять инерционные и безинерционные предохранители, при этом инерционность предохранителя выбирается в зависимости от характера нагрузки. Для исключения наполиофазных режимов применяют предохранители с блок-контактном в сочетании с пускателями или контакторами. Перспективны полупроводниковые (электронные) защитно-коммутационные и пускорегулирующие устройства: тиристорные выключатели, пускатели, станции управления и т.п.

Если для защиты электрических сетей и электрооборудования выбраны автоматические выключатели, то на ответвлениях от распределительных устройств и минопроводов рекомендуется применять установочные автоматы на номинальные токи до 630 А. Автоматы подстанционные устанавливаются на трансформаторных и преобразовательных подстанциях при токах выше 400 А.

При относительно больших токах КЗ рекомендуется применять блок «автоматический выключатель-предохранитель». В этом случае предохранители отключают токи КЗ, близкие по величине к одноразовой предельной коммутационной способности автомата.

Меньшие токи КЗ отключаются автоматическим выключателем.

Согласно требованиям правил устройств электроустановок (ПУЭ) кроме защиты от КЗ все низковольтные сети должны быть защищены от перегрузки. К ним относят:

- а) сети, выполненные открыто проложенным кабелем внутри любых помещений;
- б) осветительные сети, независимо от способа прокладки проводов и кабелей;
- в) силовые сети промышленных предприятий;
- г) сети во взрывоопасных помещениях.

В целом условия согласования характеристик аппаратов защиты (предохранителей и автоматов) с сечениями проводов и кабелей защищаемых сетей, можно обобщить в виде:

$$I_a \cdot K_z \leq I_g,$$

где  $I_a$  - номинальный ток или ток срабатывания аппарата защиты, А;  
 $K_z$  - кратность допустимого длительного тока по отношению к номинальному току (или току срабатывания) аппарат защиты, %.

Значение  $K_z$  нормируются ПУЭ в зависимости от условий окружающей среды, типа аппарата защиты, изоляции проводов и кабелей. Таким образом, выбор предохранителей и автоматов для защиты сетей напряжением до 1 кВ тесно связан с выбором сетей проводов и кабелей.

### ***Задание:***

#### ***Задача №1***

Для приведенной электрической схемы ТЭЦ (рисунок 1.4 часть 1) мощностью 2·110 МВт выбрать выключатели в следующих присоединениях:

- 1) для РУ10 кВ – трансформатора СН ТСН 1;
- 2) генератора G1;

Начальные периодические токи КЗ на шинах 220 кВ (точка К1), шинах 10 кВ (точка К2) и за линейным реактором (точка К3). Результаты расчетов токов КЗ и постоянной времени  $T_a$  приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Расчет токов КЗ и постоянной времени  $T_a$

Наименование ветви		Точка КЗ	$I_{н.о.}$ кА	$T_a$
РУ220 кВ		К1	4,8	0,028
РУ 10 кВ	От G1		4,5	0,41
	От системы и G2	К2	44,8	0,13
	Кабельная линия с реактором РБ10-1000-0,35	К3	15,6	0,185

### **Задача №2**

По условию задачи 1 выбрать выключатель в присоединении кабельной линии.

### **Задача №3**

По условию задачи 1 выбрать выключатель в присоединении для РУ220 кВ.

### **Задача №4**

Проверить на термическую устойчивость выключатель В в цепи трансформатора связи (см. рисунок 6.1). Периодическая составляющая тока при КЗ в точке К составляет: от системы  $I_{п.с.} = 7,8$  кА (незатухающий ток); от каждого генератора  $I_{п.г.} = 6,3$  кА,  $I_{п.г.1} = 4,6$  кА,  $I_{п.г.4} = 3,8$  кА. Постоянные времени апериодического тока: для системы  $T_{а.с.} = 0,05$  с, для генератора  $T_{а.г.} = 0,1$  с. Время отключения КЗ – 0,4 с. Ток термической устойчивости выключателя (десятисекундный) 10кА.

### **Задача №5**

Выбрать автоматический выключатель для защиты линии 0,38 кВ, присоединённой к ТП–10/0,4 кВ мощностью 160 кВА. Максимальная нагрузка линии  $I_{р.мах.} = 90$  А. К линии подключён электродвигатель с  $I_{н. д.} = 25$  А и кратностью пускового тока  $K_{п.} = 7$ , остальная нагрузка – освещение и электронагрев. Номинальная мощность самого крупного потребителя – 35 А.

При расчёте токов КЗ получены результаты:  $I(3) k.мах. = 1400$  А;  $I(3) k.n. = 560$  А;  $I(2) k.min. = 280$  А;  $I(1)k.min. = 200$  А.



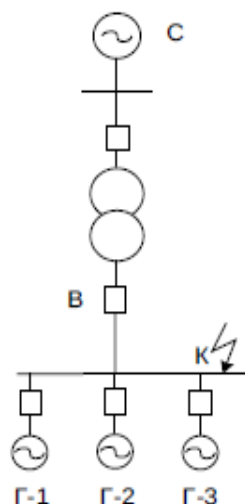


Рисунок 6.1 – К расчету задачи 4

**Контрольные вопросы:**

1. Каково назначение выключателя?
2. По каким условиям выбирают выключатель?
3. Каковы условия проверки выключателя по включающей способности?
4. Каковы условия проверки выключателя на симметричный ток?
5. По каким соотношениям определяется возможность отключения апериодической составляющей тока КЗ?
6. Что значит собственное время отключения выключателя. Как определяется?
7. От чего и каким образом зависят условия проверки выключателя на термическую стойкость?
8. Как и какие выключатели проверяются по параметрам восстанавливающегося напряжения?

**Список литературы:**

**Перечень основной литературы:**

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем : учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский

государственный технический университет. - 2-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 359 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 349-350 - ISBN 978-5-7782-2743-9 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438316>

2. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции : учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 111 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 61-63 - ISBN 978-5-7410-1542-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=468847>

***Перечень дополнительной литературы:***

1. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. - 2-е изд. доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 149 с. : ил. - Библиогр.: с. 114 - ISBN 978-5-9729-0207-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493858>

## ***Практическая работа №7***

***Тема:*** Выбор разъединителей.

***Цель:*** Приобрести навык расчета и выбора разъединителей.

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– определение разъединителей;

***уметь:***

– проводить расчет и выбор разъединителей.

***Актуальность темы:***

Заключается в приобретении навыков расчета и выбора разъединителей

***Теоретическая часть:***

Разъединители являются простейшими коммутационными аппаратами. Они предназначены в основном для разъединения отключенных частей электроустановок с целью создания видимого разрыва для обеспечения безопасности при ремонтных работах. Разъединители можно использовать также для отключения и выключения некоторых электрических цепей с током. Из-за малой отключающей способности разъединители (у них нет дугогасительных устройств) могут отключать только небольшие токи. Разъединители могут снабжаться дополнительными заземляющими ножами. Главными и заземляющими ножами управляют обычно при помощи ручных (рычажных) приводов.

Для внутренних электроустановок напряжением 10 кВ наиболее часто используют разъединители типа РВ-10.

Разъединители для наружной установки должны иметь изоляцию, рассчитанную для работы в неблагоприятных условиях окружающей среды

(загрязнения, влага, снег), а также обладать повышенной механической прочностью в связи с возможностью образования гололеда на контактах.

### Задание:

#### Задача №1

Выбрать разъединитель на участке электроустановки, указанном в таблицах 7.1 , 7.2 и на рисунке 7.1.

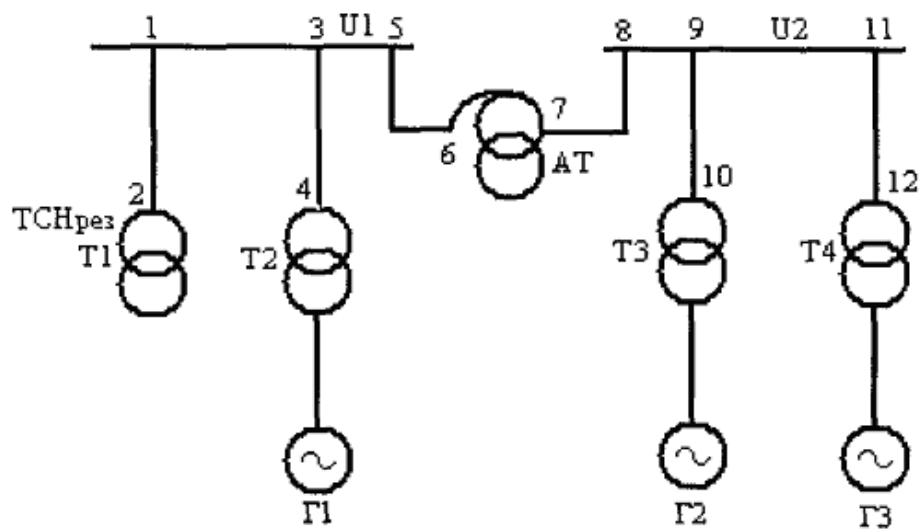


Рисунок 7.1 – Расчетная схема

Таблица 7.2 – Технические данные электроустановки

ВАРИАНТ		1	2	3	4	5
Шины, выключатели, разъединители, участок		1-2	3-4	5-6	7-8	9-10
Напряжение, кВ	$U_1$	220	220	220	110	110
	$U_2$	330	500	500	220	220
Мощность генераторов, МВА	$\Gamma 1$	---	---	253	117,5	117,5
	$\Gamma 2$	---	---	---	253	253
	$\Gamma 3$	353	---	---	253	253
Мощность трансформаторов, МВА	$T1$	---	40	---	32	32
	$T2$	---	---	250	125	125
	$T3$	400	---	---	250	250
	$T4$	---	---	---	250	400
Мощность автотрансформатора	$AT$	---	---	---	250	250
Токи КЗ на	$i''$	9,5	11	11	12,8	10,2

выбранном участке, кА	$i_y$	26	30,2	30,2	35	27,9
	$i_{n.t}$	7,8	9,8	9,8	10,1	8,3
	$i_{a.t}$	7	10	10	11	9,1
Время действия защиты, с	$t_d$	0,1	0,25	0,2	0,25	0,2
Время отключения выключателей, с	$t_{откл}$	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Расстояние между фазами, м	$L$	7	5	5	3	5

Таблица 7.1 – Технические данные электроустановки

ВАРИАНТ		6	7	8	9	10
Шины, выключатели, разъединители, участок		1-2	3-4	5-6	7-8	9-10
Напряжение, кВ	$U_1$	110	110	110	110	110
	$U_2$	220	230	220	220	220
Мощность генераторов, МВА	$G1$	---	117,5	---	---	---
	$G2$	---	---	---	---	---
Мощность трансформаторов, МВА	$T1$	32	125	---	---	32
	$T2$	32	125	---	---	---
	$T3$	---	---	---	---	---
Мощность автотрансформатора	$AT$	---	---	125	250	---
Токи КЗ на выбранном участке, кА	$i''$	12,5	12,5	10	10,2	12,5
	$i_y$	34	34	31,6	27,9	34
	$i_{n.t}$	9,6	9,6	8,5	8,3	9,6
	$i_{a.t}$	10,2	10,2	9,0	9,1	10,2
Время действия защиты, с	$t_d$	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2
Время отключения выключателей, с	$t_{откл}$	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Расстояние между фазами, м	$L$	3	3	3	5	3

### Задача №2

Проверить электродинамическую устойчивость разъединителя Р1 в цепи трансформатора связи (см. рисунок 7.2). Начальное значение периодической составляющей тока трех фазного КЗ в точке К равны: от

системы 8,5 кА, от каждого генератора по 7 кА. Постоянные времени затухания апериодического тока: для системы  $T_{a.c.} = 0,05$  с, для генератора  $T_{a.g.} = 0,1$  с. Номинальный ток электродинамической устойчивости разъединителя составляет 80 кА.

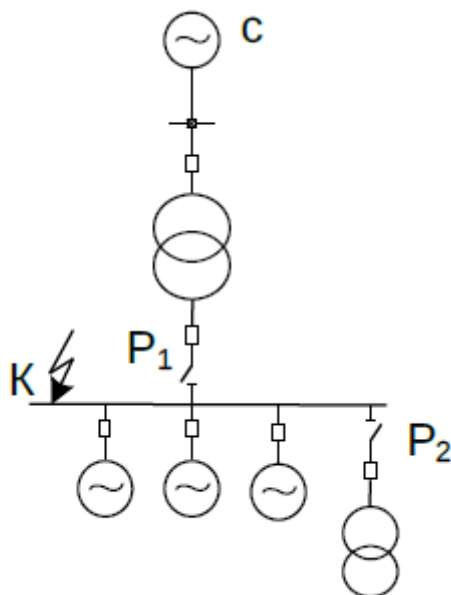


Рисунок 7.2 – Расчетная схема

### **Задача №3**

Определить каким номинальным током электродинамической устойчивости должен обладать разъединитель P2 в схеме на рисунке 7.2 при данных задачи 2.

### **Контрольные вопросы:**

1. По каким условиям выбирают разъединители?
2. При помощи каких приводов можно управлять разъединителями?
3. Объясните конструкцию разъединителей типа РВ-10/400, РЛНДА-1-10, РЛНД-35.
4. Каково назначение разъединителей?
5. Какие требования предъявляются к конструкциям разъединителя?
6. В чем состоит назначение заземляющих ножей?

7. В чем состоит отличие выключателя от разъединителя?

***Список литературы:***

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем : учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - 2-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 359 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 349-350 - ISBN 978-5-7782-2743-9 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438316>
2. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции : учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 111 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 61-63 - ISBN 978-5-7410-1542-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=468847>
3. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. - 2-е изд. доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 149 с. : ил. - Библиогр.: с. 114 - ISBN 978-5-9729-0207-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493858>

## ***Практическая работа №8***

***Тема:*** Выбор измерительных трансформаторов тока и напряжений.

***Цель:*** Приобрести навык выбора измерительных трансформаторов тока и напряжений

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– определение измерительных трансформаторов тока и напряжений;

***уметь:***

– проводить расчет и выбор измерительных трансформаторов тока и напряжений.

***Актуальность темы:***

Заключается в приобретении навыка измерительных трансформаторов тока и напряжений

***Теоретическая часть:***

Выбор измерительных трансформаторов тока (ТТ) проводят по следующим условиям:

$$\begin{aligned}U_{ном.} &\geq U_{сети ном.}; I_{ном.} \geq I_{ном. расч.}; \\k_n \cdot I_{ном.} &\geq I_{прод. расч.} = I_{раб. нб.}; i_{дин.} \geq i_{уд.} \\ \sqrt{2} \cdot I_{ном.} \cdot k_{дин.} &\geq i_{уд.}; \\ I_{тер. тер.}^2 &\geq B_k. \\ (I_{ном.} \cdot k_{тер.})^2 \cdot t_{тер.} &\geq B_k. ;\end{aligned}$$

При выборе номинального первичного тока  $I_{ном.}$  следует учитывать возможность перегрузки некоторых типов трансформаторов тока на 10–20 %, что оговорено в каталогах на трансформаторы тока.



Значение номинального вторичного тока унифицировано и равно 5 А (реже 1 и 10 А).

Класс точности измерительного ТТ выбирают в соответствии с его назначением. Если к ТТ подключаются расчетные счетчики электроэнергии, то класс точности его работы должен быть не ниже 0,5. Если подключаются только щитовые электроизмерительные показывающие приборы, то достаточен класс точности 1, а иногда (амперметр в цепи секционного или шиносоединительного выключателя) можно применить трансформатор тока с классом точности 3.

Для того чтобы ТТ работал в выбранном классе точности, нагрузка его вторичной цепи не должна превышать номинальную, т. е. при  $I_{2ном.} = 5$  А нагрузка вторичной цепи:

$$S_2 \approx I_{2ном.}^2 \cdot Z_2 \approx 25 \cdot Z_2 \leq S_{2ном.}$$

Расчетная нагрузка трансформатора тока ( $Z_{2расч.}$ ) складывается из нагрузки измерительных приборов и потерь мощности в проводах и контактах. Суммарное сопротивление катушек приборов, последовательно включенных во вторичную цепь трансформатора тока ( $Z_{\Sigma приб.}$ ), подсчитывают в соответствии со схемой их включения и распределения по фазам. При составлении трехлинейной схемы включения измерительных приборов необходимо учитывать схему внутренних соединений приборов.

Сопротивление проводов вторичной цепи зависит от длины трасс прокладки проводов  $l_{пр.}$ , сечения проводов  $s$  и схемы соединения трансформаторов тока.

При выборе материала проводов (с медными или алюминиевыми жилами) необходимо учитывать, что контрольные кабели с медными жилами ( $\rho = 0,0175$  Ом·мм<sup>2</sup>/м), применяют во вторичных цепях мощных электростанций с высшим напряжением 220 кВ и выше. Во вторичных цепях

остальных электроустановок используют кабели с алюминиевыми жилами ( $\rho = 0,028 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$ ).

Сечения проводников выбирают в соответствии с требованиями точности измерения. При этом руководствуются следующим.

1. Провод должен удовлетворять требованиям механической прочности, поэтому при наличии в цепи расчетных счетчиков сечение медных проводов должно быть не менее  $2,5 \text{ мм}^2$ , а алюминиевых – не менее  $4 \text{ мм}^2$ ; для цепей с измерительными приборами (без счетчиков) медные провода должны иметь сечение не менее  $1,5 \text{ мм}^2$ , а алюминиевые – не менее  $2,5 \text{ мм}^2$ .

2. Сечение провода должно быть взято больше минимального, удовлетворяющего требованию механической прочности (сечение больше  $6 \text{ мм}^2$  не применяется). Стандартные сечения жил контрольных кабелей: 1,5; 2,5; 4; 6  $\text{мм}^2$ .

Из условия допустимой нагрузки на ТТ для обеспечения его работы в выбранном классе точности следует, что сопротивление провода

$$Z_{\text{пров.}} \leq Z_{2\text{ном.}} - Z_{\Sigma \text{приб}} - Z_{\text{конт.}},$$

$$s = \rho l_{\text{расч.}} / r_{\text{пров.}},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода;  $l_{\text{расч.}}$  – расчетная длина провода, зависящая от схемы соединения трансформаторов тока (рисунок 8.1).

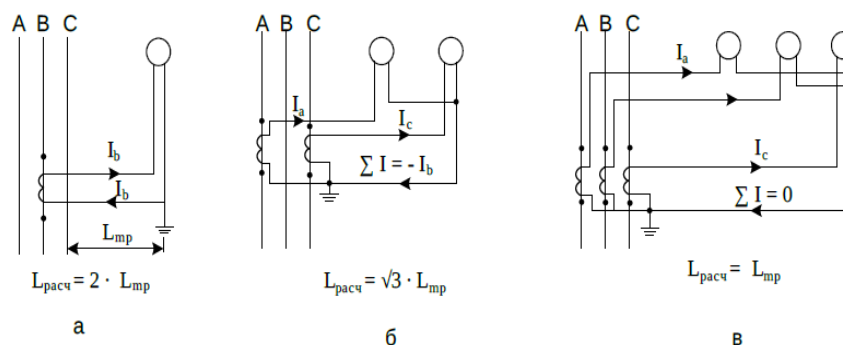


Рисунок 8.1 – Схемы соединения трансформаторов тока и измерительных приборов: а – включение приборов в одну фазу, б – включение приборов в неполную звезду, в – включение приборов в звезду

Длина соединительных проводов от трансформатора тока до приборов (в один конец)  $l_{тр.}$  (длина трассы) должна быть известна из проекта распределительного устройства и щита управления. Ориентировочно  $l_{тр.}$ , м, (для одной цепи в один конец) составляет:

**Задание:**

### **Задача №1**

Определить сечение медных соединительных проводов вторичной цепи (ТТ), установленных на вводе 10 кВ в РУ подстанции по схеме, приведенной на рисунке 8.2. Трансформаторы тока должны иметь класс точности 0,5. Расстояние между трансформаторами тока, установленными в РУ 10 кВ, и щитом, на котором установлены приборы, 20м (по трассе). Сопротивление переходных контактов принимаем 0,1 Ом.

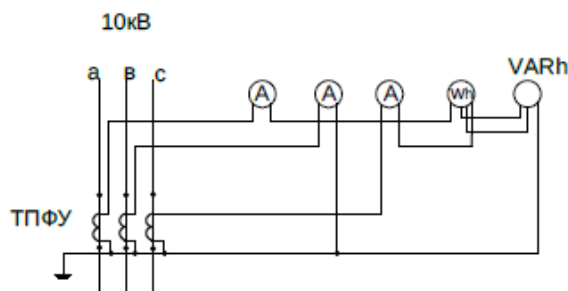


Рисунок 8.2 – Схема включения измерительных приборов

### **Задача №2**

Выбрать трансформатор напряжения, к которому подключены измерительные приборы по схеме рисунок 8.3, если он должен работать в классе точности 0,5. Напряжение сети 6 кВ.

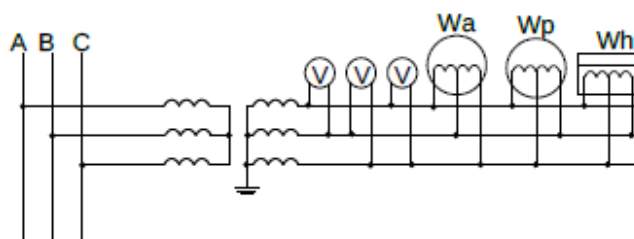


Рисунок 8.3 – Схема включения приборов

### **Задача №3**

Выбрать трансформатор напряжения на сборных шинах подстанции. Подстанция с постоянным дежурством персонала. Установленная мощность трансформаторов 2х40 МВ А.

### **Задача №4**

Выбрать трансформатор тока и напряжения для присоединения измерительных приборов в цепи генератора ТВФ-63-2, включенного на сборные шины 10,5 кВ. Использовать схему на рисунке 8.4.

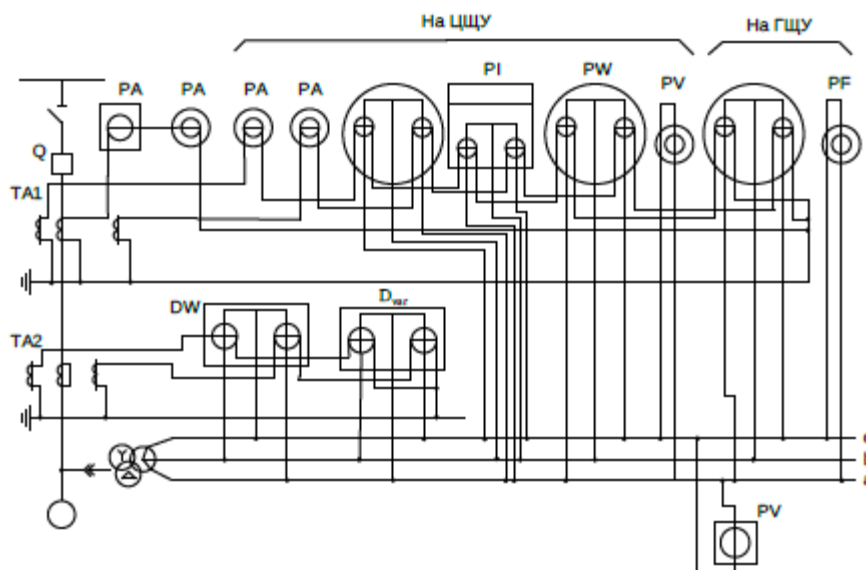


Рисунок 8.4 – Схема включения измерительных приборов генератора

### **Контрольные вопросы:**

1. Как изменяется погрешность трансформаторов тока и напряжения при увеличении длины контрольного кабеля, соединяющего их с измерительными приборами?

2. Для какой цели применяются измерительные преобразователи (датчики)?
3. В чём заключается преимущество избирательного измерения (измерения по «вызову») перед индивидуальным измерением?
4. Как выбираются трансформаторы тока и напряжения для присоединения к сборным шинам 10,5 кВ?
5. Как проверяют трансформатор тока и напряжения по вторичной нагрузке?
6. Как выбирается класс точности измерительного прибора?
7. Какие схемы соединения ТТ бывают?
8. Как выбирают сечение проводников?
9. В чём заключается особенности режима работы и конструкции ТТ и ТН?
10. Назовите основные типы трансформатора тока и напряжения?

***Список литературы:***

***Перечень основной литературы:***

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем : учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - 2-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 359 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 349-350 - ISBN 978-5-7782-2743-9 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438316>
2. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции : учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 111 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 61-63 - ISBN 978-5-7410-1542-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=468847>

***Перечень дополнительной литературы:***

1. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. - 2-е изд. доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 149 с. : ил. - Библиогр.: с. 114 - ISBN 978-5-9729-0207-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493858>

## ***Практическая работа №9***

***Тема:*** Выбор токоограничивающих реакторов.

***Цель:*** Приобрести навык выбора токоограничивающих реакторов

***Знания и умения, приобретаемые обучающимся в результате освоения темы:***

Обучающийся должен:

***знать:***

– определение токоограничивающих реакторов;

***уметь:***

– проводить выбор токоограничивающих реакторов.

***Актуальность темы:***

Заключается в приобретении навыка выбора токоограничивающих реакторов

***Теоретическая часть:***

Ограничение токов КЗ в различных узлах электроэнергетической системы важно для ограничения последствий аварий, для снижения стоимости аппаратуры и проводников распределительных устройств.

Физическая суть методов ограничения токов КЗ заключается в использовании дополнительного сопротивления в цепи тока КЗ, необходимое значение которого заранее может быть рассчитано.

Введение дополнительного сопротивления в цепь тока КЗ осуществляется либо установкой специальных аппаратов – токоограничивающих реакторов, либо созданием искусственно удлиненного пути для токов КЗ. Естественно, что установка реакторов требует дополнительных затрат. Далее будет показано, что установка реакторов в ряде случаев не всегда эффективна. Поэтому выбор средств ограничения

токов КЗ окончательно решается лишь технико-экономическим сопоставлением вариантов.

При сравнении способов ограничения токов КЗ важно правильно выбрать место установки дополнительного сопротивления. В идеальном случае пути циркуляции токов нормального режима и КЗ не совпадают, и добавочное сопротивление ограничивает только токи КЗ (например, секционный реактор ГРУ 10 кВ ТЭЦ). Но в реальных условиях часто через дополнительное сопротивление также протекают токи неаварийных режимов, что сопровождается дополнительными потерями напряжения (линейные реакторы, реакторы в цепи трансформаторов связи подстанций и др.).

Поэтому часто применяют устройства, обеспечивающие меньшие потери напряжения в нормальном режиме (сдвоенные реакторы, трансформаторы с расщепленными обмотками низшего напряжения), но достаточно большое сопротивление для эффективного ограничения токов КЗ.

В ряде случаев дополнительное сопротивление в цепи тока КЗ удастся создать из существующих элементов сети путем:

- отключения секционного выключателя РУ 10 кВ ПС;
- отключения при КЗ секционного выключателя ГРУ 10 кВ ТЭЦ;
- отключения шиносоединительного выключателя (ШСВ) при двойной системе шин ОРУ 110-220 кВ с фиксированными присоединениями;
- отключения секционного выключателя системы сборных шин ОРУ ПО-220 кВ;
- создания удлиненного пути токов КЗ через сеть 110–220 кВ и др.

Перенос поперечных связей между генераторами на более высокое напряжение также приводит к снижению токов КЗ. При тех же условиях на напряжении 6 кВ поперечные связи неосуществимы.

Установка секционных реакторов на стороне низшего напряжения на ПС малоэффективна. Типовым является применение раздельной работы секций на среднем и низшем напряжениях и введение на низшем напряжении



дополнительных сопротивлений в цепь тока КЗ, последовательно с обмотками трансформаторов (реакторов, линейных регулировочных трансформаторов). Для схем ПС характерно совпадение путей токов КЗ и токов нормальных режимов. Это послужило причиной широкого использования сдвоенных реакторов в цепях трансформаторов, имеющих в нормальном режиме сниженные потери напряжения в сравнении с одинарными реакторами.

### ***Задание:***

#### ***Задача №1***

Определить напряжение (в процентах от номинального напряжения реактора) на выводах разомкнутой ветви сдвоенного реактора, когда по другой ветви протекает:

- а) ток, равный длительному номинальному току реактора при  $\cos\varphi = 0,8$ ;
- б) ток короткого замыкания (при повреждении непосредственно за реактором).

Тип реактора РБАС-10-2х600-6, коэффициент связи 0,5, напряжение на шинах питания принять неизменным и равным 10,5 кВ.

#### ***Задача №2***

Определить, при каком значении коэффициента связи напряжение на разомкнутой ветви сдвоенного реактора при коротком замыкании на выводах другой ветви не превосходит допустимой величины, равной 1,5 от номинального напряжения реактора. Напряжение на шинах питания принять неизменным и равным 1,05 от номинального напряжения реактора.

#### ***Задача №3***

При неизменной токовой паузе в плече 2 сдвоенного реактора, равной номинальной при  $\cos\varphi = 0,8$ , определить потери напряжения в обеих ветвях для следующих вариантов токовой нагрузки плеча 1:

а)  $I_1 = I_n$ . при  $\cos\varphi = 0,8$ ;

б)  $I_1 = 0,5 \cdot I_n$ . при  $\cos\varphi = 0,9$ ;

в)  $I_1 = 0$ ;

коэффициент связи равен 0,6.

Нарисовать графики  $\Delta U_1 \% = f(I_1 / I_n)$  и  $\Delta U_2 \% = f(I_1 / I_n)$  и пояснить характер их изменения.

#### ***Задача №4***

Дан реактор типа РБАС-6-2х1000-8. Расшифровать марку реактора и вычислить его сопротивление (в процентах) в режимах сквозной, одноцепной и продольной токовых нагрузок. Коэффициент связи равен 0,46.

#### ***Задача №5***

Ток короткого замыкания у потребителя предполагается ограничить с помощью линейных групповых сдвоенных реакторов типа РБАС-10 до величины 13,5 кА. Определить параметры реактора при максимально возможном числе линии, подключаемых к его сборкам, исходя из того, что потеря напряжения в реакторе в форсированном режиме не должна превышать 4 %.

Напряжение источника питания считать неизменным и равным 1,05 от номинального напряжения реактора, сопротивлением питающих кабелей пренебречь. Коэффициент мощности – 0,85, рабочий ток форсированного режима линии – 250 А. Коэффициент связи сдвоенного реактора принять 0,5.

#### ***Задача №6***

Выявить целесообразность установки секционного реактора (СР) LR1 в ГРУ 10 кВ ТЭЦ с генераторами типа ТВФ-63-2ЕУЗ (рисунок 9.1).

Исходные данные:

Генераторов:  $P_{ном.} = 63 \text{ МВт}$ ;  $U_{ном.} = 10,5 \text{ кВ}$ ;  $\cos \varphi = 0,8$ ;  $T_a. = 0,247 \text{ с}$ ;  $X_{d.ном.} = 0,136$ .

трансформаторов связи:

$S_{ном.} = 32 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $n = 115/11 \text{ кВ}$ ,  $U_k. = 10,5 \%$ .

системы:  $S_k. = 5000 \text{ МВА}$ ; линий:  $l = 30 \text{ км}$ ,  $X_{уд.} = 0,4 \text{ Ом/км}$ ;

нагрузок:  $P_{нг.1} = P_{нг.2} = 35 \text{ МВт}$ ,  $\cos \varphi_{нг.} = 0,87$ .

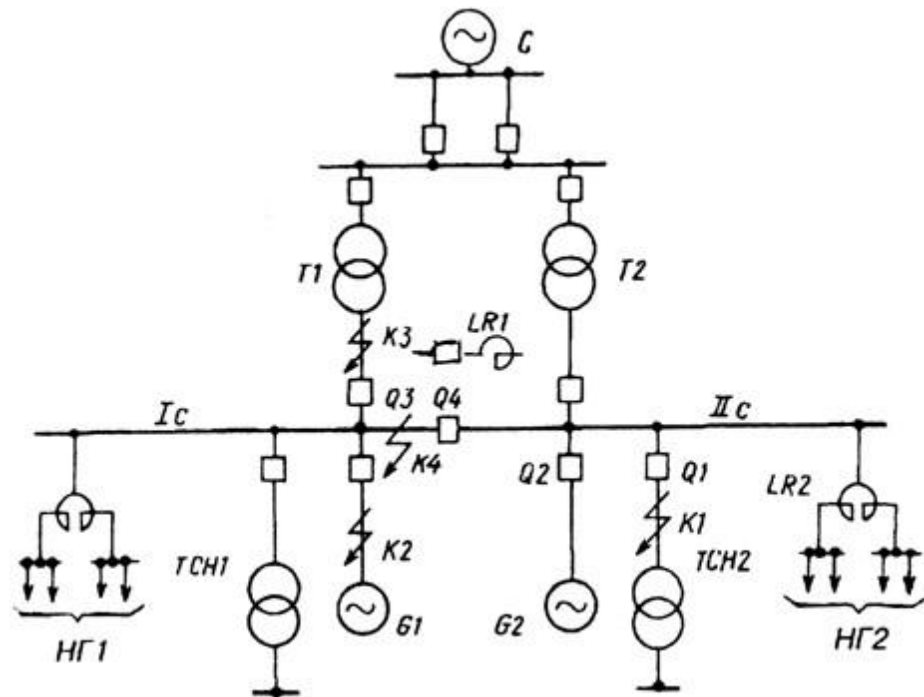


Рисунок 9.1 – Принципиальная схема ТЭЦ

Суточные графики нагрузки приведены на рисунке 9.2

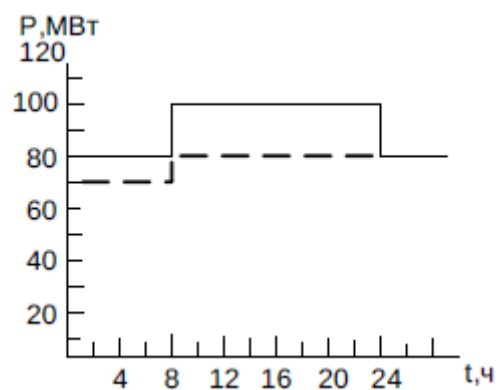


Рисунок 9.2 – Суточные графики выработки генераторами

Каждый способ ограничения токов КЗ наиболее эффективен для определенного уровня мощностей, распределяемых в узле данного напряжения. Рассмотрим вариант с установкой в ГРУ 10 кВ ТЭЦ секционного реактора.

### Задача №7

Выявить эффективность и целесообразность установки СР LR1 в ГРУ 10 кВ ТЭЦ с агрегатами 2х110 МВт (см. рисунок 9.1). Исходные данные: генераторов типа ТВФ-110-2ЕУЗ:  $P_{ном.} = 110$  МВт,  $U_{ном.} = 10,5$  кВ,  $I_{ном.} = 7,56$  кА,  $\cos \varphi_{ном.} = 0,8$ ,  $x''d. (ном.) = 0,189$ ,  $Ta.. = 0,41$  с. Трансформаторы типа ТРДН-80000/110:  $S_{ном.} = 80$  МВА,  $n = 115/10,5$  кВ,  $U_k = 10,5$  %; системы:  $S_k = 5000$  МВА; линий:  $l = 60$  км,  $X_{уд.} = 0,4$  Ом/км; нагрузок 10 кВ:  $P_{нг.} = P_{нг2} = 35$  МВт,  $\cos \varphi_{н.г.} = 0,87$ . Суточные графики нагрузки приведены на рисунке 9.3.

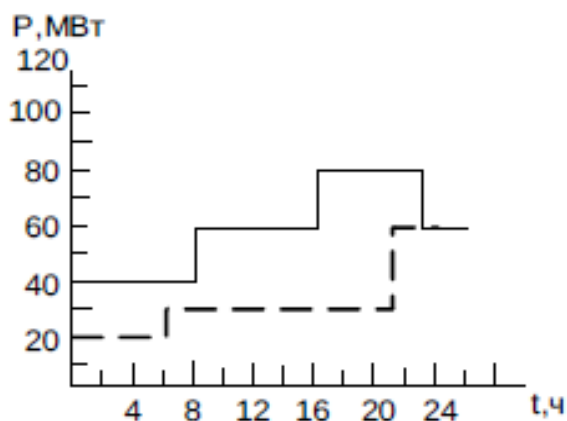


Рисунок 9.3 – Суточные графики нагрузки сети 10 кВ, включая собственные нужды ТЭЦ

### Задача №8

Для условий задачи 1 при наличии СР выбрать линейные реакторы (ЛР) на отходящих кабельных линиях 10 кВ местной нагрузки.

Исходные данные для кабельной сети:

- число распределительных пунктов (РП) 16;
- категория потребителей I и II;
- все линии резервированы;
- длина линий от ГРУ 10 кВ до РП 2 км;
- в линии проложены кабели с алюминиевыми жилами сечением  

$$s = 150 \text{ мм}^2;$$
- максимальная нагрузка каждой подстанции  $P_{max.} = 5000 \text{ кВт}$  при  

$$\cos \varphi = 0,87, T_{max.} = 5600 \text{ ч};$$
- минимальное сечение кабелей, отходящих от РП, составляет  $70 \text{ мм}^2$  (алюминиевые жилы), на линиях установлены выключатели типа ВМП-10-20/630УЗ ( $I_{откл.ном.} = 20 \text{ кА}$ );
- начальное значение периодической составляющей начального тока КЗ
- на сборных шинах 10 кВ ТЭЦ (см. задачу 1)  $I_{no} = 64,01 \text{ кА}$ ;
- полное время отключения тока КЗ выключателями, установленными на РП,  

$$t_{откл.} = t_{защ.1} + t_{в. откл.} = 0,6 \text{ с};$$
- выключателями отходящих от ТЭЦ кабельных линий  

$$t_{откл.} = t_{защ.2} + t_{в. откл.} = t_{защ.1} + \Delta t + t_{в. откл.} = 0,6 + 0,5 = 1,1 \text{ с}.$$
- Выбрать ЛР на отходящих от ТЭЦ кабельных линиях.
- Чтобы обеспечить надежную работу кабельной сети в условиях КЗ на кабельных линиях, отходящих от ГРУ 10 кВ ТЭЦ, устанавливаются ЛР. Для этого необходимо выполнение условий:
  - Ток КЗ должен быть меньше номинального тока отключения выключателей кабельной сети, установленных на головном участке кабельных линий и у потребителей.
  - Ток КЗ должен быть меньше тока термической стойкости кабелей, отходящих от ГРУ 10 кВ ТЭЦ, и кабелей, отходящих от сборных шин РП потребителя.

- Уровень токов КЗ на сборных шинах ГРУ 10 кВ ТЭЦ, сниженный за счет установки секционного реактора, определяет значение сопротивления линейных реакторов. Следовательно, установка СР облегчает условия КЗ для кабельной сети.

***Контрольные вопросы:***

1. В чем заключается физическая суть методов ограничения токов КЗ?
2. Какие устройства обеспечивают меньшие потери напряжения в нормальном режиме?
3. В каких случаях удастся создать дополнительное сопротивление в цепи тока КЗ?
4. Почему установка секционных реакторов на стороне низшего напряжения ПС малоэффективна?
5. Влияние секционных реакторов на ограничение токов КЗ. Выявление области целесообразного применения секционных реакторов.
6. Определение целесообразности установки секционного реактора по минимуму затрат.
7. Влияние линейных реакторов на ограничение токов КЗ.
8. Оценка достоинств и определение области применения блочной схемы ТЭЦ как средства ограничения токов КЗ.
9. Ограничение токов КЗ на ПС.

***Список литературы:***

***Перечень основной литературы:***

1. Филиппова, Т.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем : учебник / Т.А. Филиппова, Ю.М. Сидоркин, А.Г. Русина ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - 2-е изд. - Новосибирск : НГТУ, 2016. - 359 с. : схем., ил. - Библиогр.: с. 349-350 - ISBN 978-5-7782-2743-9 ; То

же [Электронный ресурс]. - URL:  
<http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=438316>

2. Кулеева, Л.И. Проектирование подстанции : учебное пособие / Л.И. Кулеева, С.В. Митрофанов, Л.А. Семенова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Оренбургский Государственный Университет. - Оренбург : ОГУ, 2016. - 111 с. : ил., схем., табл. - Библиогр.: с. 61-63 - ISBN 978-5-7410-1542-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=468847>

***Перечень дополнительной литературы:***

1. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учебное пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. - 2-е изд. доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 149 с. : ил. - Библиогр.: с. 114 - ISBN 978-5-9729-0207-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493858>