

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

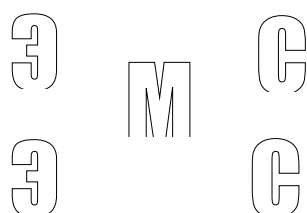
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра электромеханических систем и электроснабжения

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ПОДСТАНЦИИ**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям  
для обучающихся направления 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника»  
(профиль «Электроснабжение»)  
всех форм обучения



Воронеж 2022

УДК 621.3(07)  
ББК 31.2я7

**Составители:**

канд. техн. наук Н. В. Ситников,  
канд. техн. наук С. А. Горемыкин

**Электрические станции и подстанции:** методические указания к практическим занятиям для обучающихся направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение») всех форм обучения. / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Н. В. Ситников, С. А. Горемыкин. Воронеж: Изд-во ВГТУ. 2022. 41 с.

Содержат материалы, используемые при проведении практических занятий по дисциплине «Электрические станции и подстанции».

Предназначены для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение», всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле «Практика Эл. станции и подстанции.pdf».

Ил. 10. Табл. 13. Библиогр.: 8 назв.

**УДК 621.3(07)**  
**ББК 31.2я7**

**Рецензент – Ю. В. Писаревский, канд. техн. наук, доцент кафедры  
электромеханических систем и электроснабжения ВГТУ**

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ВЫБОР ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ РЕЖИМАМ РАБОТЫ.....	5
1. 1. РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ПРОВОДНИКОВ И АППАРАТОВ ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ РЕЖИМАМ РАБОТЫ....	5
1.2. ТИПЫ ПРОВОДНИКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....	8
1.3. РАСПРОСТРАНЕННЫЕ ТИПЫ ЖЕСТКИХ ШИН.....	10
1.4. ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ.....	11
1.5. ВЫБОР ШИН, ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И КАБЕЛЕЙ ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ РЕЖИМАМ РАБОТЫ.....	14
1.5.1. ВЫБОР ШИН, ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И КАБЕЛЕЙ ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ РЕЖИМАМ РАБОТЫ.....	14
1.5.2. НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ТОКА В ДЛИТЕЛЬНЫХ РЕЖИМАХ.....	15
1.5.3. ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ГИБКИХ ШИН И КАБЕЛЕЙ.....	19
2. ПРОВЕРКА ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И ШИН ПО УСЛОВИЯМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....	20
2.1. ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ПРОВОДНИКОВ.....	20
2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛА ДЖОУЛЯ.....	23
2.3. ДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ПРОВОДНИКОВ.....	27
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Токоведущие части предназначены для передачи электроэнергии между отдельными частями электроустановки, между отдельными электроустановками, между частями электроэнергетической системы, между отдельными электроэнергетическими системами. Такое обширное применение токоведущих частей определяет их многообразие по конструктивному исполнению. В настоящее время в цепях электростанций, подстанций используют жесткие ошиновки из проводников различных сечений: прямоугольных, трубчатых, коробчатых. Гибкие ошиновки выполняют из проводов марки АС и А. Наиболее мощные и важные цепи монтируют из пофазно-экранированных токопроводов. Находят применение и кабельные линии особенно в цепях вторичной коммутации.

В линиях электропередачи воздушного исполнения наиболее массово используются провода марки АС, в настоящее время для линий электропередачи напряжением до 35 кВ включительно все шире находят применение изолирование провода серии СИП. Кабельные линии электропередачи традиционно представлены кабелями с бумажно-масляной изоляцией, на смену которым приходят кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Всё представленное многообразие токоведущих частей нужно уметь правильно выбирать, соблюдая технические и экономические нормативы и параметры. Правила выбора и проверки токоведущих частей представлены в данной методической разработке. Представленные материалы используются при проведении практических занятий по дисциплине «Электрические станции и подстанции». Они также могут быть полезны и в самостоятельной работе при выполнении курсовых проектов и выпускной квалификационной работы.

# 1. ВЫБОР ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ РЕЖИМАМ РАБОТЫ

## 1.1. РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ВЫБОРА ПРОВОДНИКОВ И АППАРАТОВ ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ РЕЖИМАМ РАБОТЫ

**Продолжительный режим работы** электротехнического устройства - это режим, продолжающийся не менее чем необходимо для достижения установившейся температуры его частей при неизменной температуре охлаждающей среды.

Продолжительный режим работы электротехнического устройства имеет место, когда энергосистема или электроустановка находится в одном из следующих режимов: нормальный, ремонтный, послеаварийный.

**Нормальный режим** – это такой режим работы электротехнического устройства, при котором значения его параметров не выходят за пределы, допустимые при заданных условиях эксплуатации.

В нормальном режиме функционируют все элементы данной электроустановки, без вынужденных отключений и без перегрузок. Ток нагрузки в этом режиме может меняться в зависимости от графика нагрузки. Для выбора аппаратов и токоведущих частей следует принимать наибольший ток нормального режима.

**Ремонтный режим** – это режим плановых профилактических и капитальных ремонтов. В ремонтном режиме часть элементов электроустановки отключена, поэтому на оставшиеся в работе элементы ложится повышенная нагрузка. При выборе аппаратов и токоведущих частей необходимо учитывать это повышение нагрузки до  $I_{\text{рем max}}$ .

**Послеаварийный режим** — это режим, в котором часть элементов электроустановки вышла из строя или выведена в ремонт вследствие аварийного (непланового) отключения. При этом режиме возможна перегрузка оставшихся в работе элементов электроустановки током  $I_{\text{пав max}}$ ,

Из двух последних режимов выбирают наиболее тяжелый, когда в рассматриваемом элементе электроустановки проходит наибольший ток  $I_{\text{рmax}}$ .

Рассмотрим конкретные случаи определения расчетных токов для схем приведенных на рис. 1.1.

**Цепь генератора.** Наибольший ток нормального режима принимается при загрузке генератора до номинальной мощности  $P_{\text{ном}}$  номинальном напряжении и  $\cos \varphi_{\text{ном}}$

$$I_{\text{ном}} = I_{\text{ном,т}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}}}.$$

Наибольший ток послеаварийного или ремонтного режима определяется при условии работы генератора при снижении напряжения на 5 %:

$$I_{\text{max}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}} \cdot 0,95 \cos \varphi_{\text{ном}}}.$$

В конкретных условиях  $I_{\max}$  может быть определен при работе генератора с повышенной токовой нагрузкой за счет улучшения системы охлаждения (повышение давления водорода и др.).

**Цель двухобмоточного трансформатора.** Со стороны ВН и НН принимают:

$$I_{\text{ном}} = I_{\text{ном, т}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}},$$

где  $U_{\text{ном}}$  - номинальная мощность трансформатора.

Наибольший ток ремонтного или послеаварийного режима принимается при условии отключения параллельно работающего трансформатора, когда оставшийся в работе трансформатор может быть перегружен по правилам аварийных длительных или систематических перегрузок. Если неизвестны действительные возможные перегрузки, то в учебном проектировании можно принять:  $I_{\max} = 1,3 \div 1,4I_{\text{ном, т}}$ .

**Цель трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора на подстанции.** На стороне ВН расчетные токи определяются так же, как в цепи двухобмоточного трансформатора.

На стороне СН и НН при двух работающих трансформаторах (автотрансформаторах):

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{2 \cdot \sqrt{3}U_{\text{ном}}},$$

где  $S_{\text{нагр}}$  — наибольшая перспективная нагрузка на стороне СН или НН. При отключении одного трансформатора

$$I_{\max} = \frac{S_{\text{нагр}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}} = 2I_{\text{норм}}.$$

**Цель трехобмоточного трансформатора или автотрансформатора на электростанции.** Трехобмоточные трансформаторы широко применяются на ТЭЦ в качестве трансформаторов связи. В этом случае они работают как повышающие, передавая избыток мощности генераторов в сеть ВН и СН. Загрузка цепей ВН, СН и НН зависит от конкретных условий: графика нагрузки на НН, СН и схемы соединений электроустановки на НН. При блочном соединении генератора с трансформатором на стороне НН  $I_{\text{норм}}$ ,  $I_{\max}$  определяются так же, как в цепи генератора.

При поперечных связях между генераторами расчетные условия на стороне НН и ВН определяются по мощности трансформатора с учетом его перегрузки, т. е.:

$$I_{\text{норм}} = I_{\text{ном, т}}; \quad I_{\max} = (1,3 \div 1,4)I_{\text{ном, т}}$$

На стороне СН, если отсутствует связь с энергосистемой, расчетные условия принимаются так же, как на подстанции. Если к шинам СН присоединена энергосистема и возможны перетоки между ВН и СН, то

$$I_{\text{норм}} = I_{\text{ном, т}}; \quad I_{\text{max}} = (1,3 \div 1,4)I_{\text{ном, т}}.$$

Автотрансформаторы применяются на электростанциях для связи установок ВН и СН. В этом случае расчетные условия на стороне ВН и СН определяются по мощности автотрансформатора с учетом допустимой перегрузки.

**Цепь линии.** Если линия одиночная, радиальная, то  $I_{\text{норм}} = I_{\text{max}}$  определяется по наибольшей нагрузке линии.

Для двух параллельно работающих линий

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{2\sqrt{3}U_{\text{ном}}}; \quad I_{\text{max}} = 2I_{\text{норм}},$$

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

Для  $n$  параллельных линий

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{n\sqrt{3}U_{\text{ном}}}; \quad I_{\text{max}} = \frac{n}{n-1}I_{\text{норм}},$$

**Цепи секционных шиносоединительных выключателей, сборные шины.** Ток нормального режима определяется с учетом токораспределения по шинам при наиболее неблагоприятном эксплуатационном режиме. Такими режимами являются: отключение части генераторов, перевод отходящих линий на одну систему шин, а источников питания - на другую. Обычно ток, проходящий по сборным шинам, секционному и шиносоединительному выключателю, не превышает  $I_{\text{max}}$  самого мощного генератора или трансформатора, присоединенного к этим шинам.

**Цепь группового двоярного реактора.** В нормальном режиме ветви реактора загружены равномерно. Наибольший ток нормального режима определяется по нагрузке, присоединенных к ветви потребителей:

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{нагр}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}}.$$

В послеаварийном или ремонтном режиме при отключении одной из потребительских линий, присоединенных к ветви реактора, нагрузка другой ветви может соответственно возрасти, поэтому

$$I_{\text{max}} = \frac{n}{n-1}I_{\text{норм}},$$

где  $n$  - число линий, присоединенных к одной ветви реактора.

При правильно выбранном реакторе  $I_{\text{max}}$  не превышает номинального тока ветви реактора.

## 1.2. ТИПЫ ПРОВОДНИКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Основное электрическое оборудование электростанций и подстанций (генераторы, трансформаторы, синхронные компенсаторы) и аппараты в этих цепях (выключатели, разъединители и др.) соединяются между собой проводниками разного типа, которые образуют токоведущие части электрической установки.

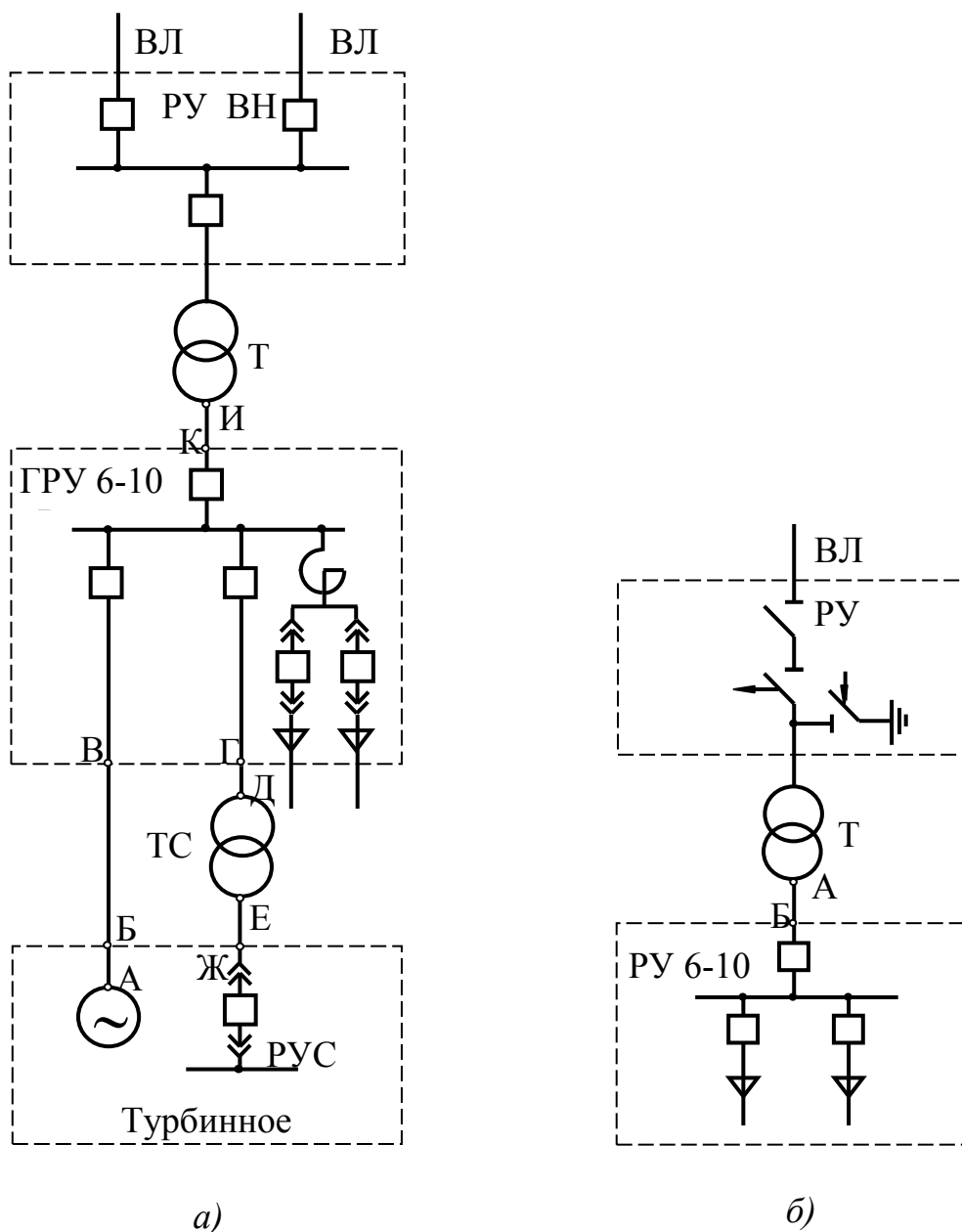


Рис. 1.1. К выбору типа проводников в основных электрических цепях электроустановок: а – элемент схемы ТЭЦ; б – элемент схемы подстанции



Рассмотрим типы проводников, применяемых на электростанциях и подстанциях. На рис. 1.1 упрощенно, без разъединителей, показаны элементы схем ТЭЦ, КЭС и подстанции.

Цепь генератора на ТЭЦ (рис. 1.1, *a*). В пределах турбинного отделения от выводов генератора до фасадной стены (участок *АБ*) токоведущие части выполняются в виде шинного моста из жестких алюминиевых шин или комплектным пофазноэкранированным токопроводом (в цепях генераторов мощностью 60 МВт и выше). На участке *БВ* между турбинным отделением и главным распределительным устройством (ГРУ) соединение выполняется шинным мостом или гибким подвесным токопроводом. Все соединения внутри закрытого РУ 6-10 кВ, включая сборные шины, выполняются жесткими голыми алюминиевыми шинами прямоугольного или коробчатого сечения. Соединение от ГРУ до выводов трансформатора связи (участок *ИК*) осуществляется шинным мостом или гибким подвесным токопроводом.

Токоведущие части в РУ 35 кВ и выше обычно выполняются сталеалюминиевыми проводами АС или АСО. В некоторых конструкциях ОРУ часть или вся ошиновка может выполняться алюминиевыми трубами.

Цепь трансформатора собственных нужд (рис. 1.1, *a*). От стены ГРУ до выводов ТСН, установленного вблизи ГРУ, соединение выполняется жесткими алюминиевыми шинами. Если трансформатор собственных нужд устанавливается у фасадной стены главного корпуса, то участок *ГД* выполняется гибким токопроводом. От трансформатора до распределительного устройства собственных нужд (участок *ЕЖ*) применяется кабельное соединение.

В цепях линий 6-10 кВ вся ошиновка до реактора и за ним, а также в шкафах КРУ выполнена прямоугольными алюминиевыми шинами. Непосредственно к потребителю отходят кабельные линии.

В блоке генератор - трансформатор на КЭС участок *АБ* и отпайка к трансформатору собственных нужд *ВГ* выполняются комплектным пофазноэкранированным токопроводом.

Для участка *ЕД* от ТСН до распределительного устройства собственных нужд применяется закрытый токопровод 6 кВ.

В цепи резервного трансформатора собственных нужд участок *ЖЗ* может быть выполнен кабелем или гибким проводом. Выбор того или другого способа соединения зависит от взаимного расположения ОРУ, главного корпуса и резервного ТСН. Так же как на ТЭЦ, вся ошиновка в РУ-35 кВ и выше выполняется проводами АС или АСО.

На подстанциях, в открытой части, могут применяться провода АС или жесткая ошиновка алюминиевыми трубами. Соединение трансформатора с закрытым РУ 6-10 кВ или с КРУ 6-10 кВ осуществляется гибким подвесным токопроводом, шинным мостом или закрытым комплектным токопроводом. В РУ 6-10 кВ применяется жесткая ошиновка.

### 1.3. РАСПРОСТРАНЕННЫЕ ТИПЫ ЖЕСТКИХ ШИН

В закрытых РУ 6-10 кВ ошиновка и сборные шины выполняются жесткими алюминиевыми шинами. Медные шины из-за высокой их стоимости не применяются даже при больших токовых нагрузках. При токах до 3000 А применяются одно- и двухполосные шины. При больших токах рекомендуются шины коробчатого сечения. Наиболее распространенные формы поперечного сечения шин приведены на рис. 1.2.

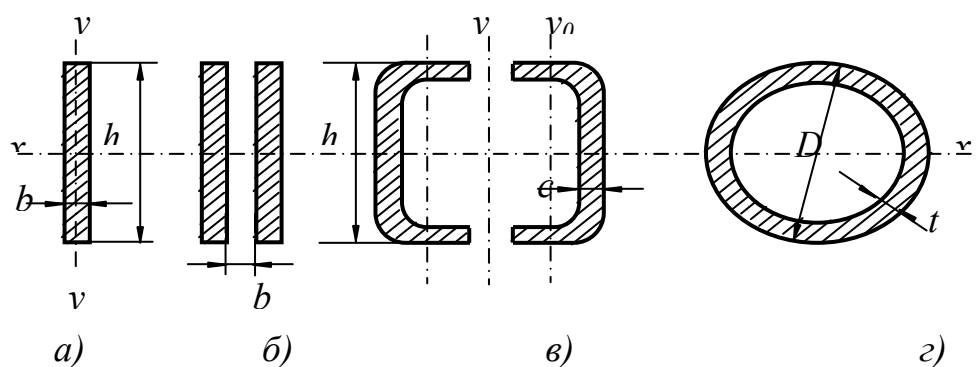


Рис. 1.2. Типовые формы поперечного сечения шин

Простейшая форма поперечного сечения шины – прямоугольная с отношением сторон  $b/h$  от 1/8 до 1/12 (рис. 1.2, а). Это так называемые плоские шины. Они обеспечивают хороший отвод тепла в окружающую среду, поскольку отношение поверхности охлаждения к объему здесь больше, чем в шинах любой другой формы. Момент сопротивления изгибу относительно оси  $x$  во много раз больше, чем относительно оси  $y$ . Следовательно, при расположении проводников трех фаз в плоскости  $y - y$  плоские шины способны противостоять значительным электрическим силам при КЗ.

Плоские шины изготавливают с поперечным сечением до  $120 \times 10 = 1200 \text{ мм}^2$ . Допустимый продолжительный ток таких шин из алюминия при нормированной температуре воздуха  $25^\circ\text{C}$  равен 2070 А. При большем рабочем токе можно применить составные проводники из двух полос с зазорами между ними (рис. 1.2, б). Допустимый ток при этом увеличится соответственно до 3200 А, т.е. далеко не пропорционально числу полос. Это объясняется поверхностным эффектом – вытеснением переменного тока на поверхность составного проводника.

Недостаток составных проводников заключается также в сложности монтажа и недостаточной механической прочности. Последнее объясняется взаимодействием полос при КЗ. Поскольку токи в полосах направлены одинаково, они стремятся сблизиться. Чтобы исключить смыкание полос при КЗ, необходимы дистанционные прокладки между ними с соответствующим креплением. Проводники из трех и четырех полос, безусловно, нецелесообразны при переменном токе. Ограниченное применение имеют проводники из двух полос.

При больших рабочих токах применяются составные шины из двух корытных проводников (рис. 1.2, в). Здесь также необходимы дистанционные прокладки между корытами.

Наиболее совершенной формой поперечного сечения шины при рабочем токе свыше 2000 А является круглое кольцевое (рис. 1.2, г). При правильно выбранном отношении толщины стенки к диаметру трубы обеспечивается хороший отвод тепла, а также механическая прочность. Момент сопротивления изгибу одинаков в любом направлении. Применение получили трубы с наружным диаметром до 250 мм и толщиной стенки до 12 мм.

#### 1.4. ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЭФФЕКТ

Активное сопротивление проводника при переменном токе равно:

$$R_a = K_{\Pi} \cdot K_{\delta} \cdot R = K_{\text{дп}} \cdot R,$$

где  $K_{\Pi}$  - коэффициент поверхностного эффекта;

$K_{\delta}$  - коэффициент эффекта близости;

$K_{\text{дп}}$  - коэффициент добавочных потерь;

$R$  - омическое сопротивление, т. е. сопротивление проводника на постоянном токе.

Коэффициент поверхностного эффекта равен отношению активного сопротивления уединенного проводника к его омическому сопротивлению

$$K_{\Pi} = \frac{R_{\text{а.уед}}}{R}.$$

Коэффициент эффекта близости равен отношению активного сопротивления проводника при наличии вблизи него других проводников с током к активному сопротивлению уединенного проводника

$$K_{\delta} = \frac{R_a}{K_{\Pi} R}.$$

В электроустановках расстояния между проводниками обычно значительно больше их геометрических размеров. При этом  $K_{\delta}=1$ .

Коэффициент поверхностного эффекта обратно пропорционален глубине проникновения  $Z_0$  электромагнитного поля в проводник

$$K_{\Pi} \sim \frac{1}{Z_0}$$

На глубине  $Z_0$  напряженности электрического и магнитного полей, а также плотность тока в  $e$  раз меньше, чем на поверхности проводника.

Глубина проникновения определяется выражением

$$Z_0 = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0 \gamma}},$$

где  $\omega = 2\pi f$  - угловая частота;

$\mu$  - относительная магнитная проницаемость проводника;

$\mu_0$  - магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума);

$\gamma$  - удельная проводимость материала проводника на постоянном токе;

Поэтому

$$K_{\text{п}} \sim \sqrt{\frac{f}{R}}.$$

Зависимости  $K_{\text{п}}$  от этого параметра для шин приведены на рис. 1.3.

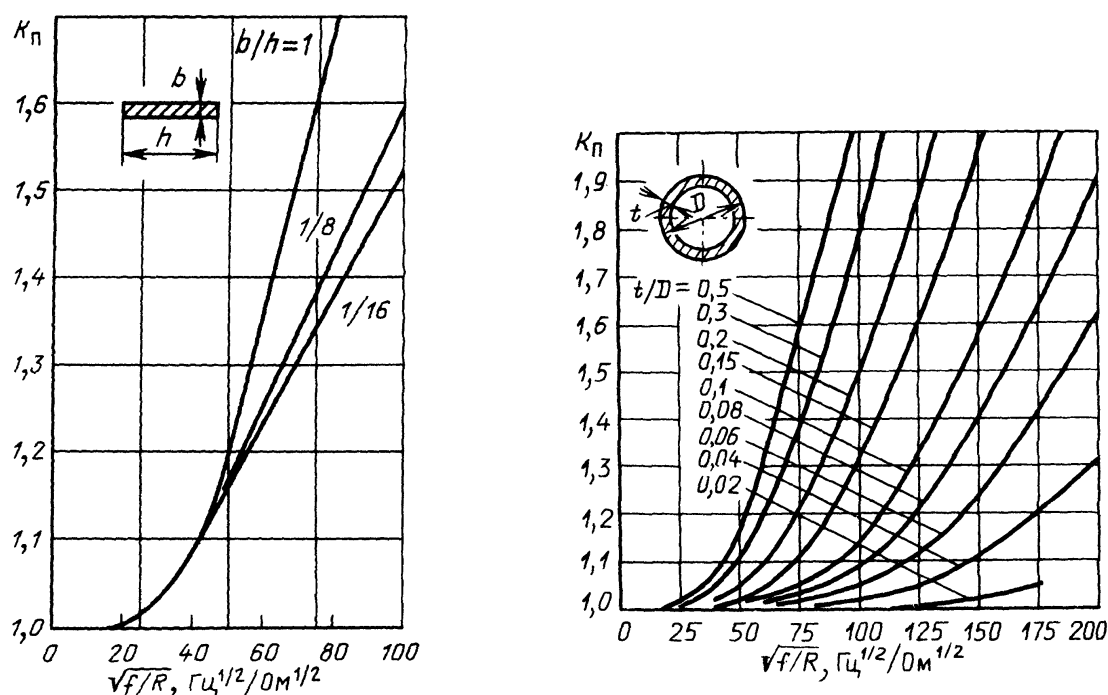


Рис. 1.3. Кривые для определения коэффициента поверхностного эффекта шин прямоугольного и трубчатого сечения

В электроустановках промышленной частоты в качестве проводниковых материалов обычно используют медь и алюминий, основные усредненные характеристики которых приведены в табл. 1.1.

Форму и геометрические размеры проводников на большие токи выбирают с учетом того, что увеличение толщины сплошного проводника или толщины стенки полого проводника сверх так называемой критической толщины ( $t_{\text{кр}} \approx 1,5Z_0$ ) технически и экономически нецелесообразно, так как связано с увеличением расхода проводникового материала, но не приводит к существенному снижению активного сопротивления проводника.

Таблица 1.1

Материал	Параметры проводниковых материалов при 20 °С			
	$\rho$ , Ом мм <sup>2</sup> /м	$\gamma$ , м/(Ом·мм <sup>2</sup> )	$d$ , г/см <sup>3</sup>	$Z_0$ , мм
Медь	0,0175	57	8,93	9,5
Алюминий	0,029	34,5	2,7	12,2

Зависимость активного сопротивления алюминиевых труб диаметром от 50 до 500 мм от толщины стенки показана на рис. 1.4.

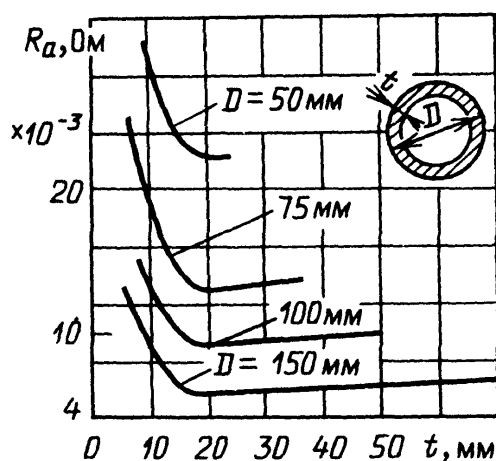


Рис. 1.4. Зависимость активного сопротивления алюминиевых труб от толщины стенки

По мере увеличения толщины стенки, начиная от очень малого значения, сечение трубы увеличивается, а сопротивление ее быстро уменьшается, пока не достигнет некоторого минимума. При дальнейшем увеличении толщины стенки сечение трубы продолжает увеличиваться, однако ее активное сопротивление не только не уменьшается, но даже несколько увеличивается вследствие быстрого увеличения коэффициента поверхностного эффекта. Критическая толщина стенки трубы, соответствующая минимуму активного сопротивления, зависит не от диаметра, а только от удельного сопротивления материала и частоты. Для алюминиевых труб круглого сечения при частоте 50 Гц критическая толщина стенки составляет около 20 мм, а для медных труб около 14 мм.

**Пример 1.1.** Сравнить электрическое сопротивление переменному току алюминиевых шин.

Трубчатой  $D = 80$  мм;  $d = 72$  мм

Прямоугольной  $100 \times 10$

Решение:

Площадь поперечного сечения

$$q_{\text{т}} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \frac{\pi(64 - 51,8)}{4} = 960 \text{ мм}^2;$$

$$q_{\text{п}} = 1000 \text{ мм}^2.$$

Электрическое сопротивление на 1000 м длины

$$R_{\Gamma} = \frac{\rho l}{q} = \frac{0,029 \cdot 1000}{960} = 0,0302 \text{ Ом};$$

$$R_{\Pi} = 0,029 \text{ Ом.}$$

Расчетные параметры

$$\text{для трубы} \quad \sqrt{\frac{f}{R}} = \sqrt{\frac{50}{0,0302}} = 40,7 \frac{\Gamma_{\text{ц}}^{\frac{1}{2}}}{\text{Ом}^{\frac{1}{2}}};$$

$$\text{для прямоугольной шины} \quad \sqrt{\frac{f}{R}} = 41,5.$$

Коэффициент поверхностного эффекта определяем по рис. 1.3:

$$\text{для трубы} \quad \frac{t}{D} = 0,05, \quad K_{\Pi} \approx 1,0;$$

$$\text{для прямоугольной шины} \quad \frac{b}{h} = \frac{1}{10}, \quad K_{\Pi} = 1,09.$$

Сопротивление переменному току прямоугольной шины

$$R_a = K_{\Pi} R = 1,09 \times 0,029 = 0,0316 \text{ Ом},$$

т.е. на 4,7 % больше чем сопротивление шины трубчатого сечения.

## 1.5. ВЫБОР ШИН, ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И КАБЕЛЕЙ ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫМ РЕЖИМАМ РАБОТЫ

### 1.5.1. Выбор проводников и шин по условию экономичности

Выбор сечения ошиновки производится по экономической плотности тока и определяется выражением

$$q_3 = \frac{I_{\text{норм}}}{j_3},$$

где  $I_{\text{норм}}$  – ток нормального режима (без перегрузок);

$j_3$  – нормированная экономическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>.

**Экономическим** называется такое сечение проводников, при котором обеспечиваются наименьшие расчетные приведенные затраты.

Найденное сечение округляется. При этом принимается ближайшее меньшее стандартное сечение, если оно не отличается от экономического значения больше чем на 15 %. В противном случае принимается ближайшее большее стандартное сечение.

Следует учесть, что по экономической плотности тока не выбираются:

- сборные шины всех напряжений, так как нагрузка по длине шин неравномерна и на многих ее участках меньше рабочего тока;

- ошиновка и кабели резервных линий и резервных трансформаторов с.н., так как они включаются эпизодически;

- токоведущие части всех временных устройств.

В табл. 1.2 указаны величины экономической плотности тока проводов, шин и кабелей в зависимости от времени использования максимальной нагрузки.

При всей простоте выбора проводников и шин по экономической плотности тока следует отметить недостатки метода, связанные с тем, что сечения изменяются дискретно. А также стоимости проводниковых материалов, конструктивных элементов шин и потерь электроэнергии со времени составления табл. 1.2  $j$ , претерпели существенные изменения.

Таблица 1.2

Проводник	Экономическая плотность тока, А/мм <sup>2</sup>		
	$T_{\max}$ , ч		
	1000 - 3000	3000 - 5000	Свыше 5000
Неизолированные провода и шины: медные	2,5	2,1	1,8
	алюминиевые	1,3	1,1
Кабели с бумажной и провода с резиновой изоляцией с жилами: медными	3,0	2,5	2,0
	алюминиевыми	1,6	1,4
Кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией с жилами: медными	3,9	3,1	2,7
	алюминиевыми	1,9	1,7

Метод экономических интервалов, предложенный В. А. Вениковым и Ю. Н. Астаховым позволяет учитывать указанные факторы и имеет теоретическое обоснование [3].

1.5.2. Нагрев проводников и определение допустимого тока в длительных режимах

Нагрев проводника (или другого элемента электрической цепи) при прохождении по нему переменного тока описывается уравнением:

$$Q = \Phi dt = I^2 R_a dt = cG dv + (\Phi_l + \Phi_k) dt,$$

где  $I$  – ток, А;  
 $R_a$  – активное сопротивление, Ом;  
 $Q$  – тепловая энергия, Дж;  
 $\Phi$  – тепловой поток, Вт;

- $c$  – удельная теплоемкость, Вт·с/(г·°С);
- $G$  – масса проводника, г;
- $\Phi_{\text{л}}$  – теплоотдача лучеиспусканием, Вт;
- $\Phi_{\text{к}}$  – теплоотдача конвекцией, Вт.

Для установившегося режима уравнение упрощается:

$$I^2 R_a = \Phi_{\text{л}} + \Phi_{\text{к}} = \Phi,$$

где  $R_a$ , и  $\Phi$  являются функциями температуры проводника и окружающей среды.

Допускаемые температуры для проводников и кабелей в нормальном режиме приведены в табл. 1.3.

Номинальные значения температуры окружающей среды, °С, в табл. 1.4.

Таблица 1.3

### Допустимые температуры проводников

Вид и материал проводника	Длительно допустимая температура жил $t_{\text{ж, дл}}$ , °С
Шины и голые провода:	
медные;	70
алюминиевые;	70
стальные, непосредственно не соединенные с аппаратами;	70
то же, непосредственно соединенные с аппаратами	70
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией напряжением, кВ:	
до 3	80
6	65
10	60
20	50
35	50
Кабели и провода с резиновой изоляцией:	
обычной	55
теплостойкой	65
Провода с поливинилхлоридной изоляцией	70

При известных нормативных значениях температуры проводника и воздуха можно определить допустимый ток

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{\Phi}{R_a}}$$



## Расчетная температура окружающей среды для проводников и аппаратов

Проводники и аппараты	Среда	Температура $t_p, ^\circ\text{C}$
Проводники: провода, шины, кабели	Воздух	25
	Земля	15
	Вода	15
Аппараты	Воздух	35

Аналитическое определение допустимых токов связано с определением теплового потока с поверхности проводника. Эта задача чрезвычайно сложна в особенности при наружной установке с учетом солнечной радиации и ветра. Поэтому допустимые токи определяют экспериментально с большой точностью. Допустимые токи для стандартных сечений проводников, медных и алюминиевых, сведены в таблицы [7,8].

При составлении таблиц принималось, что допустимая температура шин при длительных режимах  $70^\circ\text{C}$ , а расчетная температура окружающего воздуха  $25^\circ\text{C}$ , соответственно  $\theta_{\text{норм}} = 45^\circ\text{C}$ .

Чтобы температура проводника не превышала допустимого значения, наибольший рабочий ток присоединения не должен превышать допустимого значения

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{раб.нб}},$$

где  $I_{\text{раб.нб}}$  – наибольший рабочий ток присоединения.

Для шин прямоугольного сечения шириной до 60 мм, расположенных плашмя допустимый ток снижается по сравнению с табличным значением на 5 %, а шириной более 60 мм – на 8 %.

В тех случаях, когда температура воздуха  $t_B$  (окружающей среды) отличается от номинальной расчетной  $t_{B, \text{ном}}$  зависимость между током, температурой, превышением температуры проводника и температурой воздуха может быть представлена следующим приближенным равенством, вытекающим из допущения, что теплоотдача пропорциональна превышению температуры:

$$\left( \frac{I_{\text{доп}}}{I_{\text{доп.ном}}} \right)^2 \approx \frac{\theta}{\theta_{\text{ном}}} = \frac{t_{\text{п.ном}} - t_B}{t_{\text{п.ном}} - t_{B, \text{ном}}},$$

где  $I_{\text{доп.ном}}$  и  $I_{\text{доп}}$  – допустимые токи при температурах воздуха  $t_{B, \text{ном}}$  и  $t_B$ , откуда

$$v = v_B + (v_{\text{НОМ}} - v_{\text{В.НОМ}}) \left( \frac{I_{\text{ДОП}}}{I_{\text{ДОП.НОМ}}} \right)^2 \quad \text{и}$$

$$I_{\text{ДОП}} = I_{\text{ДОП.НОМ}} \sqrt{\frac{v_{\text{П}} - v_{\text{В}}}{v_{\text{П.НОМ}} - v_{\text{В.НОМ}}}}$$

**Пример 1.2.** Определить длительно допустимый ток для алюминиевой шины 80×6 мм при температуре воздуха в помещении  $\vartheta_{\text{В}}=35^{\circ}\text{C}$ .

*Решение:*

По [7,8] определяем длительный ток при номинальной температуре воздуха  $I_{\text{ДОП}} = 1150 \text{ А}$ .

Допустимый ток для  $\vartheta_{\text{В}}=35^{\circ}\text{C}$

$$I_{\text{ДОП}} = I_{\text{Д.НОМ}} \sqrt{\frac{v_{\text{П}} - v_{\text{В}}}{v_{\text{П}} - v_{\text{В}}}} = 1150 \sqrt{\frac{70 - 35}{70 - 25}} = 1150 \cdot 0,88 = 1012 \text{ А}.$$

**Пример 1.3.** Выбрать токоведущие части в цепи трансформатора ТРДН 25000 на стороне 10,5 кВ. Допустимая перегрузка трансформатора 45%. Температура окружающей среды  $30^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{МАХ}}=4500 \text{ ч}$ .

*Решение.* Расчетный ток номинального режима

$$I_{\text{НОМ}} = \frac{S_{\text{НОМ.Т}}}{2\sqrt{3} U_{\text{НОМ}}} = \frac{25000}{2\sqrt{3} \cdot 10,5} = 687 \text{ А}.$$

Наибольший рабочий ток

$$I_{\text{МАХ}} = 1,45 \cdot 687 = 996 \text{ А}.$$

Расчетное экономическое сечение для алюминиевых шин

$$q_{\text{э}} = \frac{I_{\text{НОМ}}}{j_{\text{э}}} = \frac{687}{1,1} = 624 \text{ мм}^2.$$

Выбираем шины прямоугольного сечения 100×8,  $q = 800 \text{ мм}^2$ ,  $I_{\text{ДОП.НОМ}} = 1625 \text{ А}$ .

$$I_{\text{ДОП}} = I_{\text{ДОП.НОМ}} \sqrt{\frac{\theta_{\text{РАС}}}{\theta_{\text{НОМ}}}} = 1625 \sqrt{\frac{40}{45}} = 1527,5 \text{ А}.$$

Проверка по допустимому току нагрева:

$$I_{\max p}=1405 \text{ A} < 1527,5 = I_{\text{доп.}}$$

Условие выполняется. По условиям продолжительных режимов выбираются алюминиевые шины сечением 100×8 мм.

### 1.5.3. Особенности выбора гибких шин и кабелей

В РУ 35 кВ и выше наряду с жесткими шинами применяют гибкие многопроволочные сталеалюминиевые провода, а также пучки из двух, трех и четырех проводов в фазе с дистанционными распорками между ними. Такая конструкция проводника позволяет увеличить рабочий ток и исключить коронирование. В РУ 500 кВ и выше применяют полые алюминиевые провода марок ПА 500 и ПА 640.

Сечение проводов и их число в фазе выбирают в соответствии с рабочим током присоединения, а также номинальным напряжением для исключения коронирования.

Выбор осуществляется также как и для жестких шин:  
по экономической плотности тока

$$q_3 = \frac{I_{\text{норм}}}{j_3};$$

по длительно допустимому току

$$I_{\max} \leq I_{\text{доп.}}$$

При проверке на корону принимают во внимание, что расстояния между проводниками фаз в РУ меньше чем у воздушных ЛЭП.

Минимальные сечения одиночных проводов и проводов в пучках, исключающие коронирование, для РУ с номинальным напряжением от 110 до 330 кВ, а также допустимые рабочие токи приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Номинальное напряжение, кВ	Марка проводов	Диаметр проводов, мм	Допустимый ток, А
110	1×АС120/19	15,2	380
150	1×АС240/39	21,6	610
220	1×АС240/72	33,2	1050
	3×АС150/24	3×17,1	1335
330	2×АС240/39	2×21,6	1220
	3×АС300/66	3×24,5	2070

Допустимые токи для кабелей приведены в [7,8]. Табличные значения допустимых токов составлены в расчете на одиночный кабель, проложенный в земле при температуре почвы 15°С или на воздухе при температуре 25°С. При

других условиях прокладки кабеля допустимый ток определяется с учетом поправочных коэффициентов на температуру почвы или воздуха ( $K_1$ ), на число параллельно проложенных кабелей и расстояние между ними ( $K_2$ ), коэффициент  $K_3$  позволяет учитывать удельное сопротивление земли, при прокладке кабелей в земле.

$$I'_{\text{доп}} = K_1 K_2 K_3 I_{\text{доп}}.$$

При прокладке кабелей в блоках допустимый ток определяется с учетом поправочных коэффициентов от напряжения кабеля, средней загрузки всего блока, номера кабеля в блоке и сечения кабеля [4].

## **2. ПРОВЕРКА ТОКОВЕДУЩИХ ЧАСТЕЙ И ШИН ПО УСЛОВИЯМ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ**

### **2.1. ТЕРМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ПРОВОДНИКОВ**

Продолжительность КЗ составляет обычно доли секунды и, как исключение, может достигнуть нескольких секунд. В течение этого короткого промежутка времени выделение тепла настолько велико, что температура проводников и аппаратов выходит за пределы, установленные для нормального режима. Процесс нагревания прекращается в момент автоматического отключения поврежденного участка системы, после чего происходит относительно медленное остывание.

Свойство (способность) аппарата и проводника противостоять кратковременному тепловому действию тока КЗ без повреждений, препятствующих дальнейшей исправной работе, называется термической стойкостью. Критерием термической стойкости является конечная температура, которая ограничивается механической прочностью металлов, деформациями частей аппаратов, а также нагревостойкостью изоляции. Допустимые конечные температуры для аппаратов и проводников (табл. 2.1) установлены на основании опыта. Они выше допустимых температур при нормальной работе, поскольку изменение механических свойств металлов и износ изоляции определяются не только температурой, но также продолжительностью нагревания, которая в рассматриваемых условиях мала. Как видно из табл. 2.1, допустимые конечные температуры при КЗ лежат в пределах от 120 до 300°C, в то время как допустимые температуры при нормальной работе, как правило, не превышают 60 – 80°C.

При проверке на термическую стойкость пренебрегают теплоотдачей, что не вносит заметной ошибки.

Таким образом, процесс нагрева при КЗ определяется уравнениями:

$$I_{\text{кт}}^2 r_v dt = G C_v dv, \tag{2.1}$$

где  $r_v$ ,  $c_v$  - соответственно, сопротивление и теплоемкость проводника для температуры  $v$ ;

$G$  – масса проводника.

## Допустимые конечные температуры проводников и аппаратов при КЗ

Наименование проводников, частей аппаратов	Конечная температура, °С
Неизолированные медные и латунные проводники, части аппаратов	300
Неизолированные алюминиевые проводники, части аппаратов	200
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией до 10 кВ с медными и алюминиевыми жилами	200
Кабели 20 – 220 кВ	125
Кабели и провода с поливинилхлоридной изоляцией, с медными и алюминиевыми жилами	150
То же, но, с полиэтиленовой изоляцией	120

После подстановки  $G$ ,  $r_v$  и разделения переменных:

$$\frac{1}{q^2} I_{кт}^2 dt = \frac{\gamma C_v}{\rho_v} dv; \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{q^2} \int_0^{t_{отк}} I_{кт}^2 dt = \int_{v_v}^{v_k} \gamma \frac{C_v}{f_v} dv,$$

где  $\gamma$ ,  $q$  – удельная проводимость и площадь поперечного сечения проводника.

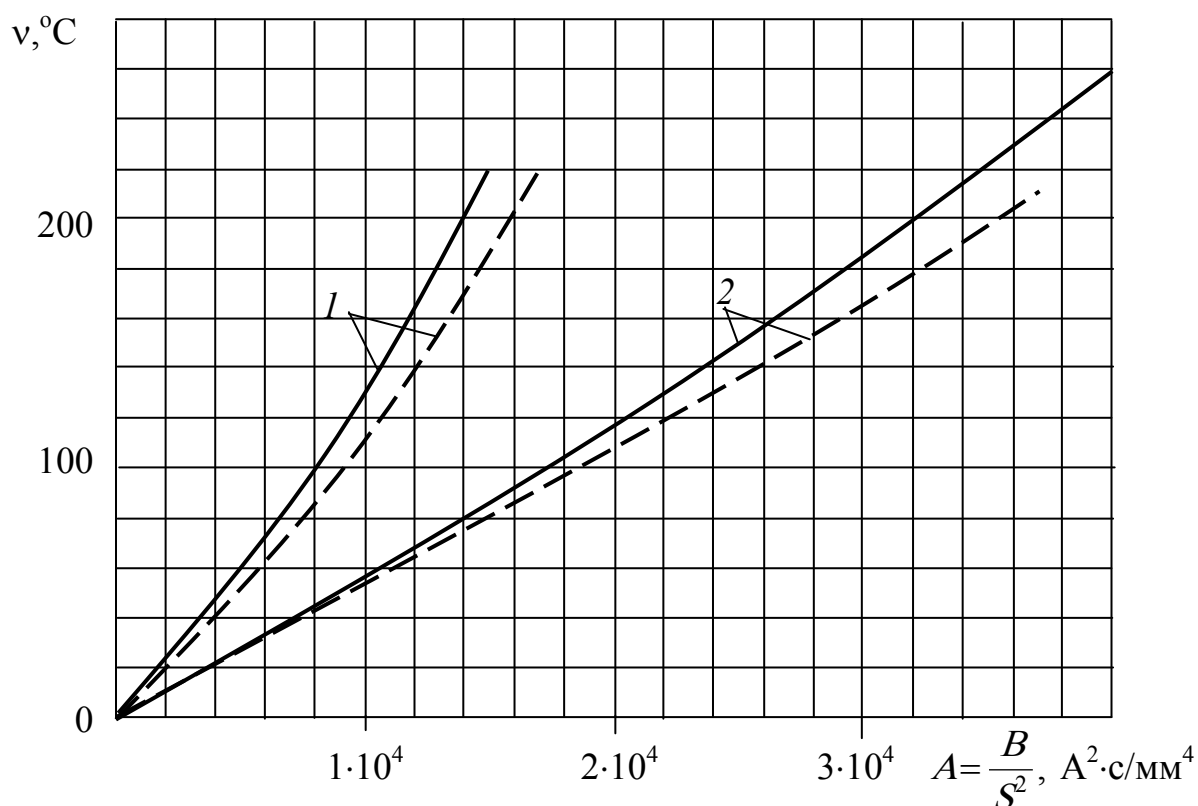


Рис. 2.1. Кривые для определения конечной температуры шин и кабелей при КЗ: сплошные линии относятся к шинам; пунктирные – к кабелям с многопроволочными жилами; 1 – алюминий; 2 – медь

Для неизолированных проводников при номинальных условиях  $\nu_{нач}=70^{\circ}\text{C}$ .  
При этом

$$A_k = A_{нач} + \frac{B_k}{q^2}. \quad (2.4)$$

По значению  $A_k$  и рис. 2.1 определяется температура  $\nu_k$  в конце короткого замыкания.

Проводник термически устойчив, если  $\nu_k \leq \nu_{доп}$  (табл. 2.1).

Часто определяют термическую стойкость шин и кабелей по минимально допустимой площади сечения:

$$q_{\min \text{ доп}} = \sqrt{\frac{B_k}{A_{к \text{ доп}} - A_n}} = \frac{\sqrt{B_k}}{C}. \quad (2.5)$$

Значения коэффициентов  $C \left( \frac{\text{A} \cdot \text{C}^{1/2}}{\text{мм}^2} \right)$  приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Допустимые температуры и соответствующие им коэффициенты  $C$   
для шин и кабелей

	$\theta_{к. доп}, ^{\circ}\text{C}$	$C$
Шины:		
из меди	300	170
из алюминия	200	90
из стали, не соединенные непосредственно с аппаратом	400	65
из стали, соединенные непосредственно с аппаратом	300	60
Кабель до 10 кВ с бумажной изоляцией и жилами:		
из меди	200	160
из алюминия	200	90

Условия термической стойкости при этом определяется выражением

$$q_{\min \text{ доп}} \leq q_{\text{расч}},$$

где  $q_{\text{расч}}$  – площадь сечения проводника выбранная по условиям рабочего режима.

## 2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛА ДЖОУЛЯ

Количество выделившегося тепла в проводнике определяется интегралом Джоуля (импульсом квадратичного тока)

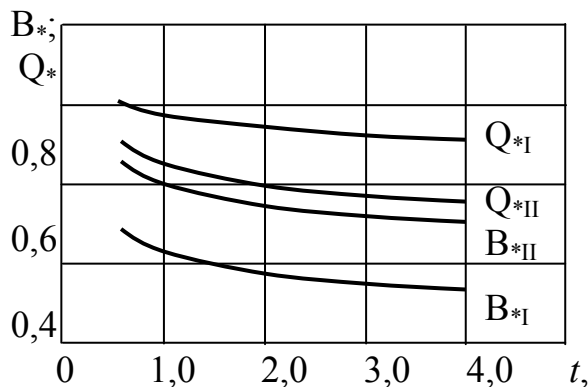
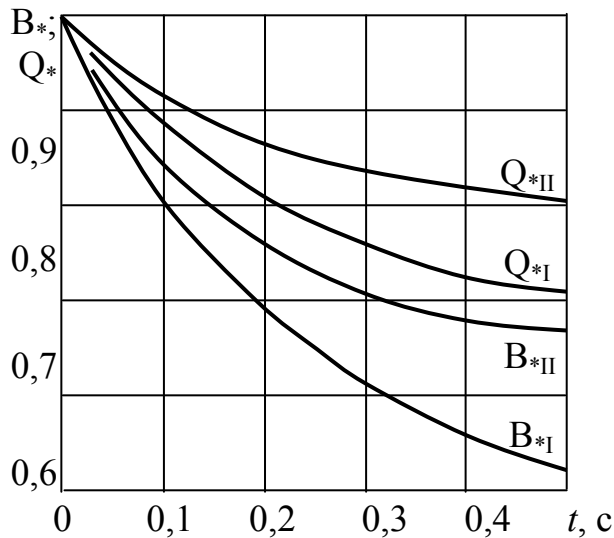
$$B_k = \int_0^{t_k} i^2 dt = \int_0^{t_k} (i_n + i_a)^2 dt. \quad (2.6)$$

Для электрически удаленного КЗ импульс квадратического тока определяют по выражению (2.7)

$$B_k = I_{n0}^2 (t_{отк} + T_a), \quad (2.7)$$

где  $t_{отк} = t_3 + t_b$ ,  $t_3$  – время действия основной релейной защиты,  $t_b$  – полное время отключения выключателя;  $T_a$  – постоянная времени цепи КЗ.

В двухлучевой схеме вида "генератор-система" для расчета импульса от периодической составляющей тока КЗ используют кривые относительных импульсов – токовых  $Q^*$  и квадратичных токовых  $B^*$  (рис. 2.2). Относительный импульс – это отношение импульса от затухающего периодического тока КЗ генератора к импульсу от незатухающего тока. При использовании относительных импульсов выражение для расчета  $B_n$  получит вид:



I – турбогенераторы  
(кроме ТВВ-800) и  
синхронные  
компенсаторы (кроме  
КСВ-100)

II – гидрогенераторы и

Рис. 2.2. Кривые для определения относительных интегралов  $B^*$  и  $Q^*$

$$B_{\text{п}} = t_{\text{отк}} (I_{\text{п.с}}^2 + 2I_{\text{п.с}} I_{\text{пг0}} Q_* + I_{\text{пг0}}^2 B_*) . \quad (2.8)$$

Импульс от апериодической составляющей тока в месте КЗ вычисляют следующим образом:

$$B_{\text{а}} = I_{\text{п.с}}^2 T_{\text{а.с}} + I_{\text{пг0}}^2 T_{\text{аг}} + \frac{4I_{\text{п.с}} I_{\text{пг0}}}{\frac{1}{T_{\text{п.с}}} + \frac{1}{T_{\text{аг}}}} . \quad (2.9)$$

Значения постоянных времени затухания апериодической составляющей КЗ для элементов электрической системы приведены в табл. 2.3.

Термический импульс короткого замыкания

$$B_{\text{КЗ}} = B_{\text{п}} + B_{\text{а}} . \quad (2.10)$$

При КЗ вблизи группы электродвигателей она заменяется эквивалентным двигателем. Для двухлучевой схемы вида "двигатель – система" также тепловые импульсы определяются отдельно от периодической и апериодической составляющих тока.

$$B_{\text{п}} \approx I_{\text{пос}}^2 t_{\text{откл}} + 0,5 I_{\text{под}}^2 T_{\text{д}} + 2 I_{\text{пос}} I_{\text{под}} T_{\text{пд}} , \quad (2.11)$$

где  $I_{\text{пос}}$ ,  $I_{\text{под}}$  – соответственно сверхпереходной ток КЗ от системы и эквивалентного двигателя;

$T_{\text{пд}}$  – постоянная времени затухания периодической составляющей эквивалентного двигателя (0,07 с).

Импульс квадратичных составляющих от апериодических составляющих токов системы и эквивалентного двигателя

$$B_{\text{ка}} \approx (I_{\text{пос}} + I_{\text{под}}) T_{\text{асх}} , \quad (2.12)$$

где  $T_{\text{асх}}$  – расчетная постоянная времени изменения апериодического тока для схемы.

$$T_{\text{асх}} = \frac{T_{\text{ас}} I_{\text{пос}} + T_{\text{ад}} I_{\text{под}}}{I_{\text{пос}} + I_{\text{под}}} . \quad (2.13)$$

Постоянная времени системы  $T_{\text{ас}}$  определяется по табл. 2.2, а постоянная времени апериодической составляющей эквивалентного двигателя можно принимать  $T_{\text{ад}} = 0,04$  с.

Следует отметить, что во многих случаях токоведущие части имеют значительные запасы по термической стойкости. Поэтому допускается выполнять расчет термического импульса по выражению  $B_{\text{к}} = I_{\text{по}}^2 (t_{\text{отк}} + T_{\text{а}})$ , дающему несколько завышенный результат, и, в случае необходимости, можно уточнить значение импульса по формулам для схемы "двухлучевая звезда".



### Пример 2.1

Определить минимальное термически стойкое сечение для шин РУ-10 кВ подстанции с трансформаторами ТДТН-40000 кВ·А,  $U_{кВН}=22\%$ . К секции шин подключены высоковольтные электродвигатели  $S_{\Sigma}=12$  МВ·А. Ток КЗ в распредустройстве 220 кВ  $I_{по}=4,8$  кВ. Пусковой ток эквивалентного электродвигателя  $I_{*п}=5,6$ . Время отключения КЗ  $t_{отк}=t_{пз} + t_{ов}=1+1,1=1,1$  с.

*Решение:*

Определим токи КЗ в РУ-6 кВ

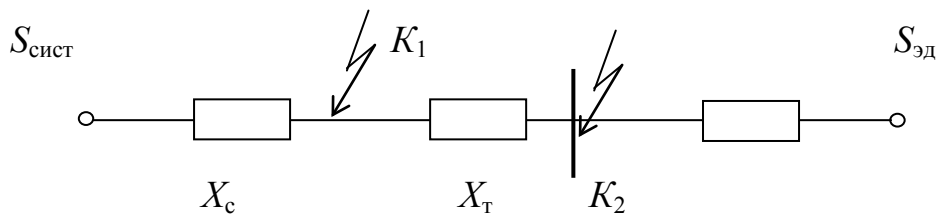
$$S_6=100 \text{ мВ}; U_6=6,3 \text{ кА}; I_{66}=9,18 \text{ кА}; I_{6220} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 230} 0,25 \text{ кА}.$$

Сопротивление системы

$$X_{*с} = \frac{I_{6220}}{I_{по}^{к1}} = \frac{0,25}{4,8} = 0,0521.$$

Таблица 2.3

Электрическая система, элемент системы	$T_a, \text{ с}$	$k_y$
Турбогенераторы мощностью, МВт: 12 – 60 100-1000	0,16 – 0,25 0,4 – 0,54	1,940 – 1,955 1,975 – 1,980
Блок турбогенератор (60 МВт) – трансформатор при номинальном напряжении генератора, кВ: 6,3 10,5	0,20 0,15	1,95 1,935
Блок турбогенератор – повышающий трансформатор при мощности генератора, МВт: 100 – 200 300 500 800	0,26 0,32 0,35 0,30	1,965 1,977 1,983 1,967
Система, связанная с шинами, где рассматривается КЗ, воздушными линиями напряжением, кВ: 35 110 – 150 220 – 330 500 - 750	0,02 0,02 – 0,03 0,03 – 0,04 0,06 – 0,08	1,61 1,61 – 1,72 1,72 – 1,78 1,85 – 1,89
Система, связанная со сборными шинами 6 – 10 кВ через трансформаторы единичной мощностью, МВ·А: 80 и выше 32 – 80 32 и ниже	0,06 – 0,15 0,05 – 0,1 0,045 – 0,07	1,85 – 1,935 1,82 – 1,90 1,80 – 1,85
Ветви, защищенные реактором с номинальным током, А: 1000 и выше 630 и ниже РУ 6 – 10 кВ	0,23 0,10 0,01	1,956 1,90 1,37



Сопротивление трансформатора

$$X_{*T} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_{\Pi}} = \frac{22}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,55.$$

Ток короткого замыкания от системы в РУ-6 кВ

$$I_{\text{пос}}^{к2} = \frac{I_{66}}{X_{*c} + X_{*T}} = \frac{9,18}{0,602} = 15,25 \text{ кА.}$$

Начальное значение тока КЗ от эквивалентного электродвигателя

$$I_{\text{пд}} = I_{*\text{пд}} \cdot I_{\text{нд}} = 5,6 \cdot \frac{12}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 6,27 \text{ кА.}$$

Определим термический импульс короткого замыкания в РУ-6 кВ.

$$B_{\text{кп}} = I_{\text{пос}}^2 t_{\text{откл}} + 0,5 I_{\text{под}}^2 T_{\text{пд}} + 2 I_{\text{пос}} I_{\text{под}} T_{\text{пд}} = 15,25^2 \cdot 1,1 + 0,5 \cdot 6,17^2 \cdot 0,07 +$$

$$+ 2 \cdot 15,25 \cdot 6,17 \cdot 0,07 = 255,82 + 1,33 + 13,17 = 270,3 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$B_{\text{ка}} = (15,25 + 6,17)^2 T_{\text{асх}} = 21,42^2 \cdot 0,069 = 31,66 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$T_{\text{асх}} = \frac{T_{\text{ас}} I_{\text{пос}} + T_{\text{ад}} I_{\text{под}}}{I_{\text{пос}} + I_{\text{под}}} = \frac{15,25 \cdot 0,08 + 6,17 \cdot 0,04}{21,42} = 0,069 \text{ с};$$

$$B_{\text{к}} = 302 \text{ кА}^2 \cdot \text{с} = 302 \cdot 10^6 \text{ А}^2 \cdot \text{с}.$$

Минимальное термически стойкое сечение алюминиевых шин

$$q_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{c} = \frac{\sqrt{302 \cdot 10^6}}{90} = \frac{17,4 \cdot 10^3}{90} = 193,3 \text{ мм}^2.$$

При определении  $B_{\text{к}}$  без учета затухания тока электродвигателей

$$B_{\text{к}} = 21,52^2 \cdot 1,1 = 504 \text{ кА}^2 \cdot \text{с};$$

$$q_{\min} = \frac{\sqrt{504 \cdot 10^6}}{90} = \frac{2,25 \cdot 10^4}{90} = 250 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, расчет по упрощенному выражению завышает сечение почти на 30 %, но при этом для расчетной схемы оно значительно меньше выбранного сечения шины по условиям длительного режима.

### 2.3. ДИНАМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ ПРОВОДНИКОВ

Жесткие шины, укрепленные на изоляторах, представляют собой динамическую колебательную систему, находящуюся под воздействием электродинамических сил. В такой системе возникают колебания, частота которых зависит от массы и жесткости конструкций. Электродинамические силы, возникающие при КЗ, имеют составляющие, которые изменяются с частотой 50 и 100 Гц. Если собственные частоты колебательной системы шины — изоляторы совпадут с этими значениями, то нагрузки на шины и изоляторы возрастут. Если собственные частоты меньше 30 и больше 200 Гц, то механического резонанса не возникает. В большинстве практически применяемых конструкций шин эти условия соблюдаются, поэтому ПУЭ не требуют проверки на электродинамическую стойкость с учетом механических колебаний. В частных случаях, например при проектировании новых конструкций РУ с жесткими шинами, производится определение частоты собственных колебаний для алюминиевых шин:

$$f_0 = \frac{173,2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{q}}, \quad (2.14)$$

для медных шин

$$f_0 = \frac{125,2}{l^2} \sqrt{\frac{J}{q}}, \quad (2.15)$$

где  $l$  - длина пролета между изоляторами, м;  $J$  - момент инерции поперечного сечения шины относительно оси, перпендикулярной направлению изгибающей силы, см<sup>4</sup>;  $q$  - поперечное сечение шины, см<sup>2</sup>.

Изменяя длину пролета и форму сечения шин, добиваются того, чтобы механический резонанс был исключен, т. е.  $f_0 > 200$  Гц. В этом случае проверка шин на электродинамическую стойкость производится в предположении, что

шины и изоляторы являются статической системой с нагрузкой, равной максимальной электродинамической силе, возникающей при КЗ.

Наибольшие электродинамические усилия возникают обычно при трехфазном коротком замыкании. Поэтому в дальнейших расчетах на динамическую стойкость учитывается ударный ток трехфазного КЗ.

Равномерно распределенная сила  $f$  создает изгибающий момент, Н/м (шина рассматривается как многопролетная балка, свободно лежащая на опорах)

$$M = \frac{fl^2}{10},$$

где  $l$  – длина пролета между опорными изоляторами шинной конструкции, м.

При расположении шин в плоскости наибольшие динамические нагрузки возникают в средней фазе. Максимальное распределенное усилие на единицу длины средней фазы при трехфазном КЗ

$$f_{\max} = 1,76 \frac{i_y^2}{a} \cdot 10^{-7}, \quad (2.16)$$

где  $i_y$  – ударный ток КЗ, А,  $a$  – расстояние между осями смежных фаз, м.

Напряжение в материале шины, возникающее при воздействии изгибающего момента, Мпа,

$$\sigma_{\text{расч}} = \frac{M}{W} = \frac{fl^2}{10W} = \sqrt{3} \cdot 10^{-8} \frac{i_y^2 l^2}{Wa}, \quad (2.17)$$

где  $W$  – момент сопротивления шины относительно оси, перпендикулярной действию усилия, см<sup>3</sup> (табл. 2.4). Шины механически прочны, если

$$\sigma_{\text{расч}} \leq \sigma_{\text{доп}}, \quad (2.18)$$

где  $\sigma_{\text{доп}}$  – допустимое механическое напряжение в материале шин (табл. 2.5).

Таблица 2.4

## Момент сопротивления и инерции характерных профилей шин

Расположение шин	Момент инерции	Момент сопротивления
	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{bh^2}{6}$
	$\frac{hb^3}{12}$	$\frac{hb^2}{6}$
	$\frac{bh^3}{6}$	$\frac{bh^2}{3}$
	$\frac{hb^3}{6}$	$\frac{hb^2}{3}$
	$0,72b^3h$	$1,44b^2h$
	$\frac{\pi d^4}{64}$	$\frac{\pi d^3}{32}$
	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$	$\frac{\pi(D^4 - d^4)}{32D}$

Таблица 2.5

## Допустимое механическое напряжение в материале шин

Материал	Марка	$\sigma_{\text{доп}}$ , МПа	Модуль упругости E, $10^4$ МПа
Алюминий	АО, А1	82,3	7
	АДО	41,2 - 48	-
Алюминиевый сплав	АД31Т	89,2	-
	АД31Т1	137,2	-
Медь	МГМ	171,5 - 178,4	10
	МГТ	171,5 - 205,8	10
Сталь	Ст. 3	260,7 - 322,4	20

Расстояние  $a$  принимается в соответствии с типовыми конструкциями РУ 6-10 кВ в пределах 40-80 см, а пролет в пределах  $l=1,5\div 2$  м, обычно принимают равным или кратным шагу ячейки.

**Механический расчет двухполосных шин.** Если каждая фаза выполняется из двух полос (рис. 2.3), то возникают усилия между полосами и между фазами. Усилие между полосами не должно приводить к их соприкосновению. Для того чтобы уменьшить это усилие, в пролете между полосами устанавливаются прокладки. Пролет между прокладками  $l_{\text{п}}$  выбирается таким образом, чтобы электродинамические силы, возникающие при КЗ, не вызывали соприкосновения полос:

$$l_{\text{п}} < 0,216 \sqrt{\frac{a_{\text{п}}}{l_{\text{у}}^3}} \sqrt[4]{\frac{EJ_{\text{п}}}{k_{\text{ф}}}}, \quad (2.19)$$

где  $a_{\text{п}}$  – расстояние между осями полос, см;

$k_{\text{ф}}$  – коэффициент формы шин (рис. 2.4), учитывающий влияние поперечных размеров проводника на силы взаимодействия.

Чтобы не происходило резкого увеличения усилий в полосах в результате механического резонанса, частота собственных колебаний системы должна быть больше 200 Гц. Исходя из этого  $l_{\text{п}}$  выбирается еще по одному условию:

$$l_{\text{п}} < 1,33 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{EJ_{\text{п}}}{m_{\text{п}}}}, \quad (2.20)$$

где  $m_{\text{п}}$  – масса полосы на единицу длины, кг/м.

Силу взаимодействия между полосами в пакете из двух полос можно определить

$$f_{\text{п}} = 2k_{\text{ф}} \cdot \frac{(0,5i_{\text{у}})^2}{2b} \cdot 10^{-7} = 0,25k_{\text{ф}} \cdot \frac{i_{\text{у}}^2}{b} \cdot 10^{-7}. \quad (2.21)$$

Напряжение в материале шин от взаимодействия полос рассматриваются как балки с равномерно распределенной нагрузкой и заземленными концами, МПа,

$$\sigma_{\text{п}} = \frac{f_{\text{п}} l_{\text{п}}^2}{12 W_{\text{п}}}, \quad (2.22)$$

где  $W_{\text{п}}$  – момент сопротивления одной полосы, см<sup>3</sup>;  $l_{\text{п}}$  – расстояние между прокладками, м.

Условия механической прочности имеет вид

$$\sigma_{\text{расч}} = \sigma_{\text{ф}} + \sigma_{\text{п}} \leq \sigma_{\text{доп}}. \quad (2.23)$$

Если это условие не соблюдается, то следует уменьшить  $\sigma_{\text{ф}}$  или  $\sigma_{\text{п}}$ , что можно сделать, уменьшив  $l_{\text{ф}}$  или  $l_{\text{п}}$  или увеличив  $a$  или  $W_{\text{ф}}$ .

Решив уравнение для  $\sigma_{\Pi}$  относительно  $l_{\Pi}$ , можно определить максимально допустимое расстояние между прокладками

$$l_{\Pi \max} = \sqrt{12(\sigma_{\text{доп}} - \sigma_{\phi}) \frac{W_{\Pi}}{f_{\Pi}}}. \quad (2.24)$$

Длину  $l_{\Pi}$  из конструктивных соображений принимают кратной  $l_{\phi}$ .

При определении сил взаимодействия между швеллерами составляющими шину коробчатого сечения, принимают  $k_{\phi}=1$ ; расстояние между осями проводников берут равными размеру  $h$ , и тогда

$$f_{\Pi} = 0,5 \cdot \frac{I_y^2}{h} \cdot 10^{-7}. \quad (2.25)$$

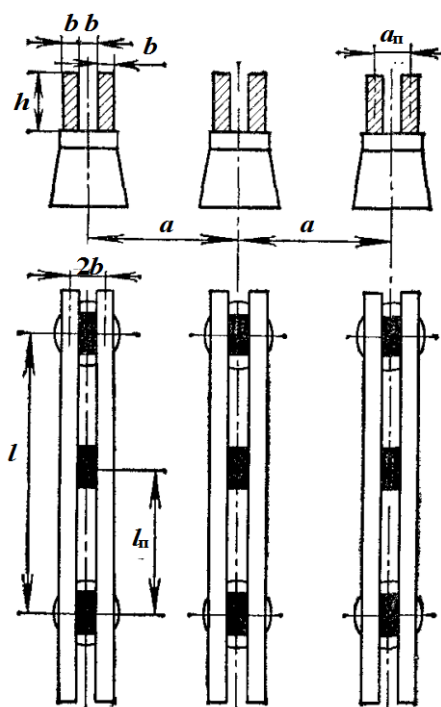


Рис. 2.3. Эскиз расположения двухполосных шин

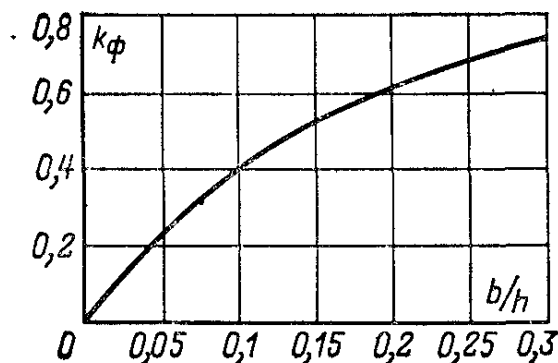


Рис. 2.4. Кривые для определения коэффициента  $k_{\phi}$  для двухполосных шин при  $a_{\Pi} = 2b$

Расчетный момент сопротивления  $W_{\Pi} = W_{y-y}$ , а расчетное сопротивление в материале от взаимодействия между швеллерами  $\sigma_{\Pi} = \frac{f_{\Pi} f_{\Pi}^2}{12 W_{\Pi}}$ .

Для шин коробчатого сечения при взаимодействии фаз напряжение в материале шин определяется с учетом вектора приложения силы.

Если шины расположены горизонтально (рис. 2.5а) и шины соединены между собой жестко, то

$$W_{\Phi} = W_{y_0-y_0}$$

При отсутствии жесткого соединения

$$W_{\Phi} = 2W_{y-y}$$

Для вертикального расположения шин (рис. 2.5б)

$$W_{\Phi} = 2W_{x-x}$$

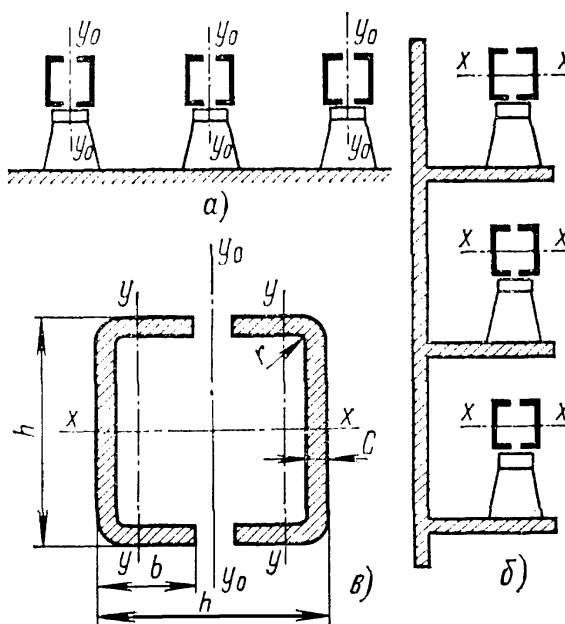


Рис. 2.5. К механическому расчету шин коробчатого сечения:  
 а — горизонтальное расположение; б — вертикальное расположение,  
 в — сечение коробчатой шины

Если шины расположены по вершинам треугольника, то механический расчет выполняется по формулам, приведенным в табл. 2.6.

**Выбор изоляторов.** В распределительных устройствах шины крепятся на опорных, проходных и подвесных изоляторах. Жесткие шины крепятся на опорных изоляторах, выбор которых производится по следующим условиям:



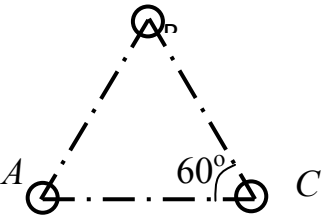
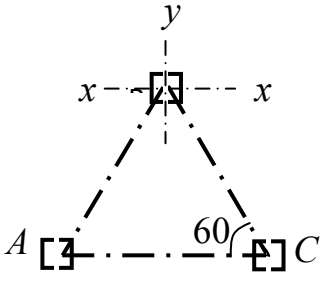
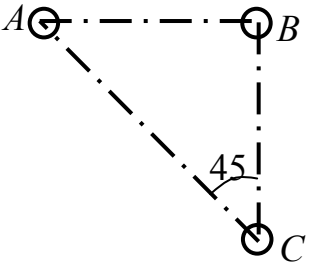
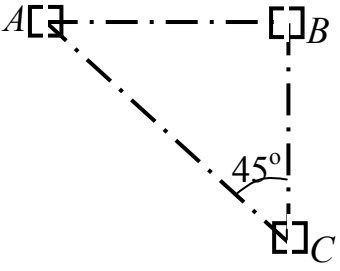
по номинальному напряжению  $U_{уст} \leq U_{ном}$ ;  
 по допустимой нагрузке  $F_{расч} \leq F_{доп}$ ,  
 где  $F_{расч}$  - сила, действующая на изолятор;  
 $F_{доп}$  - допустимая нагрузка на головку изолятора.

$$F_{доп} = 0,6 F_{разр},$$

где  $F_{разр}$  - разрушающая нагрузка на изгиб.

Таблица 2.6

Формулы для механического расчета шин, расположенных  
 в вершинах треугольника

Эскиз расположения шин	Напряжение в материале шин от взаимодействия между фазами, МПа
	$\sigma_{\phi, \max} = \sqrt{3} \frac{i_y^2 I^2}{a W_{\phi}} \cdot 10^{-8}$
	$\sigma_{\phi, \max} = 2,5 \frac{i_y^2 I^2}{a W_{y0-y0}} \cdot 10^{-8}$
	$\sigma_{\phi, \max} = 1,64 \frac{i_y^2 I^2}{a W} \cdot 10^{-8}$
	$\sigma_{\phi, \max} = 2,2 \frac{i_y^2 I^2}{a W_{y0-y0}} \cdot 10^{-8}$

При горизонтальном или вертикальном расположении изоляторов всех фаз расчетная сила,  $H$ ,

$$F_{\text{расч}} = \sqrt{3} \frac{I_y^2}{a} \cdot I k_{\Pi} \cdot 10^{-7} = f_{\phi} I k_{\Pi}, \quad (2.26)$$

где  $k_{\Pi}$  – поправочный коэффициент на высоту шины, если она расположена «на ребро» (рис. 2.6):

$$k_{\Pi} = \frac{H}{H_{\text{из}}}; \quad H = H_{\text{из}} + b + \frac{h}{2}, \quad (2.27)$$

где  $H_{\text{из}}$  – высота изолятора.

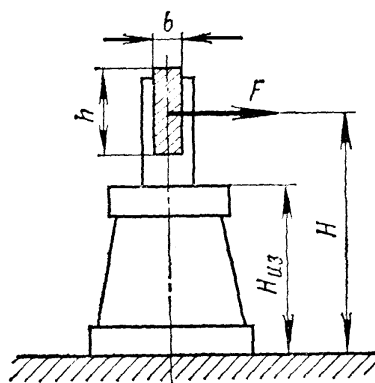


Рис. 2.6. К определению расчетной нагрузки на изолятор

При расположении шин в вершинах треугольника

$$F_{\text{расч}} = k_{\Pi} F_{\text{и}},$$

где  $F_{\text{и}}$  – изгибающая сила определяется по табл. 2.6.

Разрушающая нагрузка для опорных изоляторов приведена в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Тип изолятора	$F_{\text{и}}, \text{Н}$
ОФ-6-375, ОФ-10-375, ОФ-20-375, ОФ-35-375	3 750
ОФ-6-750, ОФ-10-750, ОФ-20-750, ОФ-35-750	7 500
ОФ-10-1250	12 500
ОФ-10-2000, ОФ-20-2000	20 000
ОФ-20-3000	30 000

Проходные изоляторы выбираются:

по напряжению  $U_{\text{уст}} \leq U_{\text{ном}}$ ;

по номинальному току  $I_{\max} \leq I_{\text{ном}}$ ;  
 по допустимой нагрузке  $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{доп}}$ .

При этом расчетная сила для проходных изоляторов определяется по выражению  $F_{\text{расч}} = 0,5f_{\phi}l$ .

### Пример 2.2

Выбрать сборные шины 10,5 ГРУ ТЭЦ и опорные изоляторы к ним для следующих данных:

- температура наиболее жаркого месяца  $30^{\circ}\text{C}$ ;
- токи продолжительных режимов  $I_{\text{ном}} = 4130 \text{ A}$ ;  $I_{\text{max p}} = 4350 \text{ A}$ ;
- расстояние между фазами  $a = 0,8 \text{ м}$ ;
- длина пролета  $l = 2,0 \text{ м}$ ;
- токи короткого замыкания на шинах  $I_{\text{по г}} = 28,2 \text{ кА}$ ;  $I_{\text{по с}} = 32,3 \text{ кА}$ ;
- время отключения КЗ  $t_{\text{отк}} = 2 \text{ с}$ .

*Решение:*

Сборные шины по экономической плотности тока не выбираются, поэтому сечение выбираем по допустимому току. Принимаем шины коробчатого сечения, алюминиевые  $2(125 \times 55 \times 6,5) \text{ мм}$ , высота  $h = 123 \text{ мм}$ ; ширина полки  $b = 55 \text{ мм}$ ; толщина шины  $c = 6,5 \text{ мм}$ ; сечение  $(2 \times 1370) \text{ мм}^2$ ;  $W_{y0-y0} = 100 \text{ см}^3$ ;  $W_{y-y} = 9,5 \text{ см}^3$ ;  $I_{\text{доп}} = 4640 \text{ A}$ .

Допустимый ток с учетом поправки на температуру окружающей среды:

$$I'_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} \sqrt{\frac{v_{\text{доп}} - v_{\text{о.ф}}}{v_{\text{доп}} - v_{\text{о.н}}}} = 4640 \sqrt{\frac{40}{45}} = 4640 \cdot 0,94 = 4362 \text{ A}.$$

Проверка на термическую стойкость.

Определяется термический импульс короткого замыкания по (2.8), (2.9):

$$B_{\text{п}} = t_{\text{откл}} (I_{\text{пос}}^2 + 2I_{\text{пос}} I_{\text{пог}} Q_* + I_{\text{пог}}^2 B_*) = \\ = 2(32,3^2 + 2 \cdot 32,3 \cdot 28,2 \cdot 0,6 + 28,2^2 \cdot 0,36) \cdot 10^6 = 2422,6 \cdot 10^6 (\text{A}^2 \cdot \text{с});$$

$$B_{\text{а}} = I_{\text{пос}}^2 T_{\text{ас}} + I_{\text{пог}}^2 T_{\text{ар}} + \frac{4I_{\text{пос}} \cdot I_{\text{пог}}}{1/T_{\text{ас}} + 1/T_{\text{ар}}} = \\ = \left( 32,3^2 \cdot 0,1 + 28,2^2 \cdot 0,25 + \frac{4 \cdot 32,3 \cdot 28,2}{1/0,1 + 1/0,25} \right) \cdot 10^6 = 563,3 \cdot 10^6 (\text{A}^2 \cdot \text{с});$$

$$B_{\text{к}} = B_{\text{п}} + B_{\text{а}} = 2986 \cdot 10^6 (\text{A}^2 \cdot \text{с}).$$

Минимальное термически стойкое сечение шин по выражению (2.5)

$$q_{\text{мин доп}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{C} = \frac{\sqrt{2986}}{90} \cdot 10^3 = 605,6 \text{ мм}^2,$$

где  $c = 90$

$605,6 > 2 \cdot 1370$ , термическая стойкость шин обеспечивается.

Частота собственных колебаний шинной конструкции по (2.14)

$$f_0 = \frac{173,2}{2^2} \sqrt{\frac{625}{2 \cdot 13,7}} = 206,5 \text{ Гц.}$$

Т.к.  $f_0 > 200$  Гц, то расчет можно вести по формулам для статической системы.

Момент сопротивления сечения для двух сращенных шин  $W_{y0-y0}=100 \text{ см}^3$ , тогда

$$\sigma_{\phi \max} = 1,76 \cdot \frac{i_y^2 l^2}{a W_{y0-y0}} \cdot 10^{-8} = 1,76 \cdot \frac{161,7^2 \cdot 2^2 \cdot 10^{-2}}{0,8 \cdot 100} = 23,01 \text{ МПа,}$$

$$\text{где } i_{y\Sigma} = \sqrt{2} K_{yc} I_{\text{пос}} + \sqrt{2} K_{yt} I_{\text{пог}} = \sqrt{2}(1,82 \cdot 32,3 + 1,955 \cdot 28,2) = 161,7 \text{ кА.}$$

Сила взаимодействия между швеллерами

$$f_{\Pi} = 0,5 \cdot \frac{i_y^2}{h} \cdot 10^{-7} = 0,5 \cdot \frac{26147}{0,125} \cdot 10^{-1} = 10459 \text{ Н/м.}$$

Максимальное расстояние между местами сварки швеллеров:

$$l_{\Pi \max} = \sqrt{\frac{12(\sigma_{\text{доп}} - \sigma_{\phi}) W_{\Pi}}{f_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{12(82,3 - 23,01)9,5}{10459}} = 0,8 \text{ м,}$$

где  $W_{\Pi} = W_{y-y}=9,5 \text{ см}^3$  и  $\sigma_{\text{доп}} = 82,3 \text{ МПа}$ .

Выбор изоляторов.

Предварительно выбираем ОФ-10-2000. Максимальная сила, действующая на изгиб

$$F_{\text{и}} = 1,76 \cdot \frac{i_y l}{a} \cdot 10^{-7} = 1,76 \cdot \frac{161,7^2 \cdot 10^6 \cdot 2}{0,8} \cdot 10^{-7} = 11504 \text{ Н.}$$

Поправка на высоту коробчатых шин

$$k_h = \frac{H}{H_{\text{из}}} = \frac{H_{\text{из}} + c + \frac{h}{2}}{H_{\text{из}}} = \frac{235 + 6,5 + \frac{125}{2}}{235} = 1,29;$$

$$F_{\text{расч}} = k_h F_{\text{и}} = 1,29 \cdot 11504 = 14841 \text{ Н;}$$

$$F_{\text{расч}} = 14841 > 0,6 F_{\text{разр}} = 0,6 \cdot 20000 = 12000 \text{ Н.}$$

Изолятор ОФ-10-2000 не проходит по механической прочности.

Выбираем ОФ-10-3000, тогда

$$F_{\text{расч}} = 14841 < 18000 \text{ Н.}$$

### Выбор гибких шин и токопроводов

В РУ 35 кВ и выше применяются гибкие шины, выполненные проводами АС. Гибкие токопроводы применяются также для соединения трансформаторов с РУ 6-10 кВ. Они выполняются пучком проводов, закрепленных по окружности в кольцах-обоймах. Два провода из пучка - сталеалюминиевые - несут в основном механическую нагрузку от собственного веса, гололеда и ветра. Остальные провода - алюминиевые - являются только токоведущими. Сечение отдельных проводов в пучке рекомендуется выбирать возможно большими (500, 600 мм<sup>2</sup>), так как это уменьшает число проводов и стоимость токопровода.

Условия выбора гибких проводников и кабелей по длительным режимам приведены в п. 1.5.3.

По режиму КЗ, согласно ПУЭ, должны проверяться воздушные линии электропередачи при ударном токе КЗ 50 кА и более для предупреждения схлестывания проводов при динамическом действии токов КЗ. Импульсы силы, действующие на гибкие проводники и поддерживающие их изоляторы, выводы и конструкции, рассчитываются по среднеквадратичному току двухфазного замыкания между соседними фазами. При расщепленных проводах и гибких токопроводах взаимодействие токов КЗ в проводниках одной и той же фазы определяется по действующему значению тока трехфазного КЗ.

Гибкие шины РУ должны проверяться на электродинамическое действие тока КЗ при мощности большей или равной значений приведенных в табл. 2.8.

Таблица 2.8

Номинальное напряжение, кВ	110	220	330
Мощность КЗ, МВ·А	4000	8000	12000

При этом определяется сближение гибких токопроводов при протекании токов КЗ и по диаграммам [5,6] сравнивается с допустимыми значениями. Наименьшие допустимые расстояния в свету между соседними фазами в момент их наибольшего сближения приведены ниже. Для токопроводов генераторного напряжения  $a_{\text{доп}} = 0,2$  м; для ОРУ 110 кВ – 0,45 м; 220 кВ – 0,95 м; 330 кВ – 1,4 м.

Согласно ПУЭ на термическую стойкость не требуется проверять провода воздушных линий за исключением случаев, когда они оборудованы устройствами быстродействующего АПВ.

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

### Пример 2.3

На подстанции 110 кВ выбрать сборные шины ОРУ. Проверить возможность применения жестких трубчатых шин. Данные:  $S_{\max}=300$  МВ·А;  $I_{\text{п0}}=25$  кА;  $l_{\text{пр}}=5$  м; междуфазные расстояния для жестких шин  $a_{\text{ф}}=1,4$  м.

*Решение:*

Максимальный ток нагрузки

$$I_{\text{м.нагр}} = \frac{S_{\max}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{н}}} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 110} = 1,57 \text{ кА.}$$

Предварительно выбираем трубчатую алюминиевую шину 74/80 ( $D=80$ ,  $d=74$ )  $I_{\text{доп}}=1770$  А.

Сборные шины по экономической плотности тока не выбираются.

Проверка на динамическую стойкость:

$$J = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = 53,86 \text{ см}^4;$$

$$q = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi d^2}{4} = 7,25 \text{ см}^2;$$

$$v = \frac{173,2}{I_{\text{пр}}^2} \sqrt{\frac{J}{q}} = \frac{173,2}{52} \sqrt{\frac{53,8}{7,25}} = 18,87;$$

$$i_y = \sqrt{2} K_y I_{\text{п0}} = \sqrt{2} \cdot 1,7 \cdot 25 = 60,35 \text{ кА};$$

$$f_{\max} = 1,76 \cdot \frac{i_y^2}{a_{\text{ф}}} \cdot 10^{-7} = 1,76 \cdot \frac{60,35^2 \cdot 10^6}{1,4} \cdot 10^{-7} = 457,9 \text{ Н/м};$$

$$W = 0,1 \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} = 0,1 \cdot \frac{8^4 - 7,4^4}{8} = 13,72 \text{ см}^3;$$

$$\sigma_{\text{ресч}} = \frac{M}{W} = \frac{1145}{13,72} = 83,43 \text{ МПа.}$$

Условие проверки

$$\sigma_{\text{ресч}} \leq \sigma_{\text{доп}}; \quad 83,43 > 82,3 \text{ МПа.}$$

Шина не проходит по динамической стойкости.

Выбираем гибкие шины проводниками  $2 \times \text{АС-500/336}$

$$I_{\text{доп}} = 2 \times 945 = 1890 \text{ А.}$$

Мощность КЗ в РУ-110 кВ

$$S_{\text{КЗ}} = \sqrt{3} I_{\text{п0}} U_{\text{н}} = \sqrt{3} \cdot 25 \cdot 110 = 4757 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$$

Требуется дополнительные проверки на схлестывание, т.к.

$$S_{\text{КЗ}} = 4757 \text{ МВ} \cdot \text{А} > 4000.$$

### Пример 2.4

Выбрать кабель в цепи отходящей линии 10 кВ для следующих исходных данных. Кабель проложен в жиле (песок влажностью более 9 %). Температура окружающей среды  $t=20^{\circ}$ . Параллельно проложены два кабеля,  $l=150$  мм. Нагрузка составляет в нормальном режиме  $S_{\text{норм}}=2,5$  МВ·А; в утяжеленном режиме  $S_{\text{утяж}}=4,0$  МВ·А,  $T_{\text{max}}=6000$  ч. Время отключения КЗ  $t_{\text{КЗ}}=1,3$  с.

Решение:

$$I_{\text{норм}} = \frac{S_{\text{норм}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{2,5}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,138 \text{ кА}$$

$$I_{\text{утяж}} = \frac{S_{\text{утяж}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{4,0}{\sqrt{3} \cdot 10} = 0,231.$$

При  $T_{\text{max}}=6000$  ч  $j_{\text{эк}}=1,2$  для алюминиевых кабелей с бумажной изоляцией

$$q_{\text{расч}} = \frac{I_{\text{норм}}}{j_{\text{эк}}} = \frac{138}{1,2} = 115 \text{ мм}^2.$$

Предварительно выбираем сечение  $q=120 \text{ см}^2$ . Длительно допустимый ток при прокладке в земле  $t_3=15^{\circ}\text{C}$ ;  $I_{\text{доп}}=240$  А.

Поправочный коэффициент на температуру окружающей среды  $t_{\text{окр}}=20^{\circ}$   $K_1=0,96$ .

Поправочный коэффициент на количество параллельно проложенных кабелей  $K_2=0,91$ .

Поправочный коэффициент на вид почвы (песок влажности более 9 %)  $K_3=1,05$ .

$$I'_{\text{доп}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot I_{\text{доп}} = 0,96 \cdot 0,91 \cdot 1,05 \cdot 240 = 220,1.$$

Термический импульс короткого замыкания

$$B_{\text{к}} = I_{\text{п0}}^2 t_{\text{КЗ}} = (18 \cdot 10^3)^2 \cdot 1,3 = 421,2 \cdot 10^6 \text{ А}^2\text{с}.$$

Минимальное термически стойкое сечение

$$q_{\text{min}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{c} = \frac{20,5 \cdot 10^3}{90} = 228 \text{ мм}^2.$$

Ближайшее большее сечение, удовлетворяющее термической стойкости  $q=240 \text{ мм}^2$ .

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электрическая часть станций и подстанций: учебник для вузов / А. А. Васильев, И. П. Крючков, Е. Ф. Наяшкова и др.; Под ред. А. А. Васильева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1990. – 576 с.
2. Рожкова Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. - М.: Академия, 2013. – 448 с.
3. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей вузов: учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей вузов, 2-е изд., перераб. и доп. / В. М. Блок, Г. К. Обушев, Л. Б. Панерно и др.: Под ред В. М. Блок. – М.: Высшая школа, 1990. – 383 с.
4. Правила устройства электроустановок. – СПб.: Издательство ДЕАН, 2003. – 928 с.
5. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под. ред. Б. Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
6. Гук Ю. Б., Кантан В. В., Петров С. С. Проектирование электрической части станций и подстанций. –Л.: Энергоатомиздат, 1985. –312 с.
7. Ситников Н. В. Электроснабжение: справочные материалы: учеб. пособие / Н. В. Ситников, С. А. Горемыкин. - Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. - 88 с.
8. Киреева Э. А. Полный справочник по электрооборудованию и электротехнике (с примерами расчетов): справочное издание/ Э. А. Киреева, С. Н. Шерстнев; под общ. ред. С. Н. Шерстнева. – 2-е изд., стер. – М.: КНОРУС, 2013. – 864 с.



# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ПОДСТАНЦИИ**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям  
для обучающихся направления 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника»  
(профиль «Электроснабжение»)  
всех форм обучения

### **Составители:**

**Ситников Николай Васильевич**  
**Горемыкин Сергей Александрович**

Компьютерный набор Н. В. Ситникова

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 17.01.2022.

Уч.-изд. л. 2,6.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»

394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84