

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

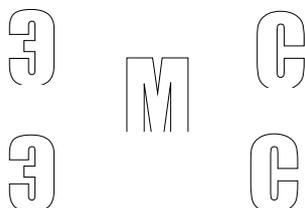
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра электромеханических систем и электроснабжения

## **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ПОДСТАНЦИИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к курсовому проектированию  
для студентов направления 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника»  
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 курсовому проектированию для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Н. В. Ситников, С. А. Горемыкин. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2022. 20 с.

Методические указания определяют цели, задачи и объем курсового проектирования. В разработке представлены методические рекомендации по расчету нагрузки, выбору трансформаторов, расчету режимов короткого замыкания, разработке главной схемы электрических соединений, выбору аппаратов, определению собственных нужд понизительной подстанции. Приводятся рекомендации по расчету заземления и методика расчета молниезащиты подстанции.

Предназначены для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электроснабжение») очной и заочной форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле МУ\_КП\_ЭСиП.pdf.

Ил. 4. Табл. 4. Библ.: 17 назв.

**УДК 621.3(07)**  
**ББК 31.2я7**

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

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

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	5
2. ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	5
3. РАСЧЕТ СУММАРНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРУЗОК НА ШИНАХ ВСЕХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОДСТАНЦИИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОДОВЫХ РАСХОДОВ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ.....	5
4. ВЫБОР ЧИСЛА И МОЩНОСТИ ГЛАВНЫХ ПОНИЗИТЕЛЬНЫХ ТРАНС ФОРМАТОРОВ.....	7
5. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ПОДСТАНЦИИ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ОТХОДЯЩИХ ЛИНИЙ ПО СЕКЦИЯМ И ТРАНСФОРМАТОРАМ.....	8
6. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ.....	9
7. ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ПРОВОДНИКОВ.....	10
8. ВЫБОР СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА И ИСТОЧНИКОВ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА.....	13
9. РАСЧЕТ НАГРУЗОК, ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРОВ И СХЕМЫ ПИТАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД.....	14
10. ВЫБОР ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ПОДСТАНЦИИ.....	15
11. РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ.....	15
12. РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИИ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ.....	16
13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ.....	18
14. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	19

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности, сельского хозяйства и в конечном итоге уровень жизни населения зависит от выработки и потребления электрической энергии. Выработка электрической энергии в России за 2021 год составила более миллиарда киловатт-часов. Наибольшая эффективность использования электроэнергии достигается в объединенной электроэнергетической системе. Электрические станции и подстанции составляют основу единой электроэнергетической системы. Поэтому при подготовке специалистов электроэнергетиков всех уровней уделяется большое внимание изучению электрической части электростанций и подстанций. Важным этапом успешного освоения студентами дисциплины «Электрические станции и подстанции» и подготовки к выполнению выпускной квалификационной работы является курсовое проектирование.

Учебными планами в объеме дисциплины «Электрические станции и подстанции» предусмотрено выполнение курсового проекта.

Курсовой проект «Силовая цепь районной трансформаторной подстанции» выполняется в рамках самостоятельной работы студентов.

Цель курсового проекта – познакомить студентов с основными проблемами проектирования понизительных подстанций, научить применять теоретические знания к решению конкретных инженерных задач, выработать навыки самостоятельной работы и квалифицированного принятия решений. При выполнении курсового проекта необходимо использовать учебно-методическую, справочную литературу и нормативную документацию.

Объектом учебного проектирования являются понизительные подстанции, осуществляющие электроснабжение промышленных и сельскохозяйственных районов.

Выполнение курсового проекта должно базироваться на современных достижениях в области электроэнергетики и электроаппаратостроения, ориентироваться на энергосберегающие технологии, отражать задачи повышения надежности и качества электроснабжения потребителей.

В расчетно-пояснительной записке должны быть разработаны и отражены следующие вопросы: введение, определение расчетных нагрузок подстанции, выбор числа и мощности источников питания, выбор и обоснование схемы электроустановки, расчет токов короткого замыкания, выбор электроаппаратов и токопроводов по условиям рабочего режима и проверка их по устойчивости к токам короткого замыкания, выбор трансформаторов собственных нужд и системы оперативного тока, выбор измерительных трансформаторов, приборов учета и контроля, выбор конструкций и компоновки РУ, заключение, список литературы.

Графическая часть курсового проекта должна содержать главную схему электрических соединений подстанции, план и разрез подстанции

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

1.1 Целью курсового проектирования является закрепление теоретических знаний, полученных при изучении курса “Электрические станции и подстанции”, а также приобретение практических навыков, связанных с проектированием пониженной подстанции, предназначенной для электроснабжения промышленных, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых потребителей.

1.2 Задачей курсового проектирования является решение обучающимися конкретных инженерных вопросов, связанных с определением расчетных нагрузок, выбором трансформаторов, электрических аппаратов силовой цепи, проводников и изоляторов, расчетом режимов короткого замыкания, разработкой главной схемы электрических соединений подстанции, конструированием распределительных устройств, расчетом параметров устройств заземления и молниезащиты, а также планировкой и компоновкой подстанции.

1.3 При выполнении проекта обучающиеся используют теоретические знания и практические навыки, полученные при освоении других, ранее изученных дисциплин (инженерная графика, теоретические основы электротехники, электрические машины, основы электроэнергетики и др.), а также знания и навыки, приобретенные при прохождении производственных практик.

## **2. ОБЪЕМ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

2.1 Курсовой проект включает в себя расчетно-пояснительную записку объемом до 50-ти страниц (формат А4) и графическую часть, выполненную на двух листах формата А1.

2.2 Пояснительная записка к курсовому проекту должна содержать все необходимые расчеты и обоснования по разделам указанным в задании на курсовое проектирование.

2.3 Графическая часть проекта включает в себя электрическую схему главных соединений, план и разрез подстанции.

**ПРИМЕЧАНИЕ:**

1. В отдельных случаях преподаватель может уточнить или скорректировать содержание проекта по пп. 2.2 и 2.3.

2. Текстовая и графическая части курсового проекта выполняются при строгом соблюдении действующих стандартов и нормативов.

## **3. РАСЧЕТ СУММАРНЫХ ЭЛЕКТРОНАГРУЗОК НА ШИНАХ ВСЕХ НАПРЯЖЕНИЙ ПОДСТАНЦИИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОДОВЫХ РАСХОДОВ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ**

В задании на курсовое проектирование указаны значения максимальной, активной мощности  $P_m$  и коэффициентов мощности  $\cos\varphi$  ( $\operatorname{tg}\varphi$ ) потребителей, получающих питание от проектируемой подстанции. Для определения токов нормального и послеаварийного режимов и выбора мощности трансформаторов производится расчет суммарных нагрузок на шинах всех напряжений: низшего напряже-

ния (НН), среднего напряжения (СН), высшего напряжения (ВН) и в целом по подстанции по форме (табл.1) с учетом коэффициента совмещения максимумов нагрузки  $K_{см}=0,85-0,95$  в зависимости от количества и состава потребителей.

Таблица 1

Расчет электрических нагрузок на шинах подстанции

Наименование потребителей	$P_{м1}$ , МВт	$tg\varphi$ / $cos\varphi$	$Q_{м1}$ , Мвар	$S_{м1}$ , МВ А	$P_{\Sigma}$ Мвар	$Q_{\Sigma}$ Мвар	$S_{\Sigma}$ МВА	$S_{\Sigma расч}$ МВА
Потребители НН								
1.	*	*	*	*				
2.	*	*	*	*				
Суммарная нагрузка на шинах НН $S_{\Sigma НН}$					*	*	*	
Потребители СН								
1.	*	*	*	*				
2.	*	*	*	*				
Суммарная нагрузка на шинах СН $S_{\Sigma СН}$					*	*	*	
Суммарная трансформируемая нагрузка НН и СН $S_{\Sigma тр}$					*	*	*	
Потребители ВН								
1.	*	*	*	*				
2.	*	*	*	*				
Суммарная нагрузка на шинах ВН $S_{\Sigma ВН}$					*	*	*	
Суммарная нагрузка подстанции $S_{\Sigma}$						*		
Суммарная расчетная нагрузка подстанции								*

Расчет нагрузок производится по формулам (3.1) и (3.2)

$$Q_{м1} = P_{м1} \cdot tg\varphi; \quad S_{м1} = \sqrt{P_{м1}^2 + Q_{м1}^2}; \quad (3.1)$$

$$P_{\Sigma} = \sum_{m=1}^N P_{м1}; \quad Q_{\Sigma} = \sum_{m=1}^N Q_{м1}, \quad (3.2)$$

где N - количество потребителей на шинах одного напряжения.

$$S = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + Q_{\Sigma}^2}; \quad (3.3)$$

$$S_{\Sigma расч} = K_{см} \cdot S_{\Sigma}. \quad (3.4)$$

Величина потребляемой электроэнергии определяется ориентировочно для каждого потребителя отдельно по форме (табл. 2).

Таблица 2

Расход электроэнергии потребителями РПП

Наименование потребителя	$P_m$ , МВт	$Q_m$ , Мвар	$T_{ма}$ , ч	$T_{мр}$ , ч	$W_a$ , МВт.ч	$W_p$ , Мвар.ч
--------------------------	-------------	--------------	--------------	--------------	---------------	----------------

Годовое число часов использования максимума нагрузки  $T_{ма}$  (активной) и  $T_{мр}$  (реактивной) для потребителей различных отраслей промышленности приведены в [14,15]. Если  $T_{мр}$  не указано, можно принять  $T_{мр} = 1,1 T_{ма}$ .

Расход активной и реактивной энергии определяется по формулам (3.5)

$$W_a = P_m \cdot T_{ма}; W_p = Q_m \cdot T_{мр} \quad (3.5)$$

#### 4. ВЫБОР ЧИСЛА И МОЩНОСТИ ГЛАВНЫХ Понижительных трансформаторов

На районных понижительных подстанциях число трансформаторов в большинстве случаев принимается равным двум. Одно трансформаторные подстанции могут применяться для питания неотчетственных потребителей, чаще всего в сельской местности, при возможности обеспечения после аварийного питания нагрузок первой категории по связям вторичного напряжения с соседних подстанций или других источников питания.

Подстанции с числом трансформаторов более двух применяются по условиям дальнейшего роста нагрузок или обеспечения высокой надежности питания особо ответственных потребителей с соответствующим технико-экономическим обоснованием.

Рекомендуется применять трехфазные трансформаторы. При очень большой мощности, на которую не выпускаются трехфазные трансформаторы, или если имеются ограничения при транспортировке, применяются группы из двух трехфазных или трех однофазных трансформаторов.

В зависимости от напряжений и мощности подключаемых потребителей применяются двухобмоточные трансформаторы (на два напряжения ВН/НН), трехобмоточные или автотрансформаторы (на три напряжения ВН/СН/НН)

Двухобмоточные трансформаторы мощностью выше 25 МВА выпускаются с расщепленной обмоткой НН.

Выбор номинальной мощности трансформатора производится с учетом его перегрузочной способности по соотношению (4.1)

$$S_{ном.т} \geq S_{расч.т} \quad (4.1)$$

где  $S_{ном.т}$  – номинальная мощность трансформатора;  
 $S_{расч.т}$  – расчетная мощность трансформатора.

$$S_{расч.т} = \frac{S_{тр.расч.т}}{K_{н.ав}} \quad (4.2)$$

где  $S_{тр.расч.т}$  - суммарная расчетная мощность, передаваемая через трансформаторы (трансформируемая);

$\kappa_{н.ав}$  - допускаемый коэффициент перегрузки трансформаторов в аварийном режиме.

При двухобмоточных трансформаторах  $S_{тр.расч.т}$  определяется суммарной нагрузкой потребителей низшего напряжения (НН). При трехобмоточных и автотрансформаторах - потребителей среднего и низшего напряжения (СН и НН).

В учебном проектировании допускаемый коэффициент перегрузки принимается  $\kappa_{н.ав} = 1,4$ . Такая перегрузка допустима не более 5 суток при условии, что длительность максимума нагрузки не более 6 часов в сутки.

При выборе автотрансформаторов следует иметь в виду, что мощность обмотки НН не может быть больше типовой мощности  $S_{мин}$ . Типовая мощность составляет часть номинальной мощности, которая определяется коэффициентом выгодности  $\kappa_{выг}$  (или коэффициентом типовой мощности  $\kappa_{мин}$ ).

$$K_{мин} = \kappa_{выг} = S_{мин} / S_{ном} = (U_{вн} - U_{сн}) / U_{вн} . \quad (4.3)$$

После выбора номинальной мощности трансформатора определяется фактический коэффициент загрузки в номинальном и аварийном режиме ( $\kappa_{в.н}$  и  $\kappa_{в.ав}$ ) и проверяется выполнение условия (4.5)

$$\begin{aligned} K_{ав} &\leq K_{нав}; \\ K_{в.н} &= S_{тр.расч} / (2 \cdot S_{ном.т}); \\ K_{в.ав} &= S_{тр.расч} / S_{ном.т}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Для автотрансформаторов дополнительно проверяется загрузка обмотки НН:

$$K_{з.н} = S_{\Sigma нн} / (2 \cdot S_{мин}); K_{з.ав} = S_{\Sigma нн} / S_{мин} . \quad (4.6)$$

В пояснительной записке приводятся основные паспортные данные выбранных трансформаторов по справочной литературе [10-15].

## **5. СОСТАВЛЕНИЕ СХЕМЫ ПОДСТАНЦИИ С РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ОТХОДЯЩИХ ЛИНИЙ ПО СЕКЦИЯМ И ТРАНСФОРМАТОРАМ**

Проектирование главной схемы электрических соединений включает в себя два последовательных этапа:

- 1) составление структурной схемы;
- 2) выбор схем электрических соединений распределительных устройств (РУ) всех напряжений подстанции.

В структурной схеме распределительное устройство одного напряжения изображается прямоугольником с соответствующей надписью внутри (например, РУ-220 кВ). В структурной схеме изображаются питающие линии, связывающие РУ

высшего напряжения с источником питания, а также отходящие линии к потребителям от РУ всех напряжений. На данной схеме изображаются трансформаторы или автотрансформаторы, а также линии, связывающие между собой РУ всех напряжений. Пример структурной схемы РПП представлен на рис. 1.

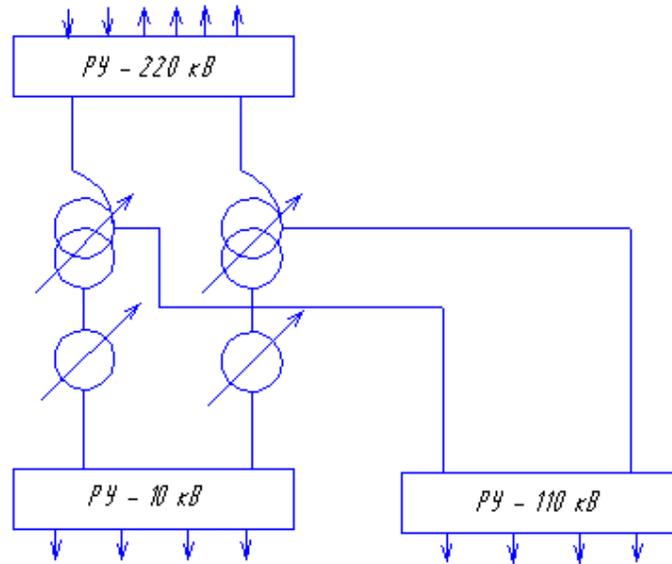


Рис.1. Структурная схема РПП

Выбор схем распределительных устройств всех напряжений осуществляется в соответствии с рекомендациями [16, 17]. Следует иметь в виду, что на данном этапе выбираются только схемы РУ ВН и РУ СН. Распределительное устройство НН, как правило, выполняется всегда по схеме одиночной секционированной системы сборных шин (или двух секционированных систем шин, если главные трансформаторы имеют расщепленные вторичные обмотки). Окончательно формирование РУ НН осуществляется в соответствии со схемами первичной коммутации ячеек КРУ после выбора последних в разделе 7.

После составления схемы подстанции целесообразно рассмотреть возможные нормальные, аварийные и послеаварийные режимы, положение коммутационных аппаратов в разных режимах. На основании такого анализа выбираются расчетные режимы для определения токов короткого замыкания и выбора оборудования.

На этапе выбора схем целесообразно также решить вопрос о том, какого типа (открытого или закрытого) будут выполнены РУ всех напряжений подстанции. Хотя этот вопрос и относится к разделу конструктивного выполнения, он во многом предопределяет выбор аппаратов и ошиновки подстанции.

## 6. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Расчет токов короткого замыкания в курсовом проекте производится для выбора проверки выбранных аппаратов, проводов, шин и кабелей на термическую и электродинамическую стойкость. Поэтому расчетным является наиболее тяжелый эксплуатационный режим (форсированный, максимальный рабочий). Наиболее полно методика расчета токов КЗ изложена в [3,4,15].

Нагрузки в расчете токов КЗ не учитываются, т.к. они значительно электрически удалены от расчетных точек короткого замыкания и не оказывают существенного влияния на уровень токов КЗ.

Для выбора аппаратов и проводников в качестве расчетных точек КЗ принимаются: сборные шины ВН или вводы трансформаторов со стороны ВН, сборные шины СН и НН.

Для выбора аппаратов и проводников рассчитываются:

а)  $I_{n0}$  - действующее значение периодической составляющей начального (сверхпереходного) тока трехфазного короткого замыкания;

б)  $i_y$  - ударный ток,

$$i_y = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot K_y, \quad (6.1)$$

где  $K_y$  - ударный коэффициент [3];

в)  $i_{a,t}$  - действующее значение аperiodической составляющей тока КЗ в момент начала расхождений дугогасительных контактов выключателя. На данном этапе этот расчет выполняется ориентировочно по данным об усредненных значениях собственного времени отключения выключателей и корректируется после выбора выключателей в разделе 7:

$$i_{a,t} = \sqrt{2} \cdot I_{n0} \cdot e^{-t/T_a}, \quad (6.2)$$

где  $T_a$  - постоянная времени затухания аperiodической составляющей [3];

г)  $B_k$  - интеграл Джоуля,

$$B_k = (I_{n0})^2 \cdot (t_{отк} + T_a), \quad (6.3)$$

где  $t_{отк}$  - время отключения тока КЗ;

$$t_{отк} = t_{p.z} + t_{отк.в}, \quad (6.4)$$

где  $t_{p.z}$  - время действия основной релейной защиты;

$t_{отк.в}$  - полное время отключения выключателя.

Время действия релейной защиты задается преподавателем для конкретной схемы. Расчет окончательно уточняется после выбора выключателей. Результаты расчета токов короткого замыкания сводятся в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчета токов КЗ

Расчетная точка КЗ	$I_{n0}, \text{кА}$	$i_y, \text{кА}$	$i_{a,t}, \text{кА}$	$B_k, \text{кА}^2 \text{с}$
--------------------	---------------------	------------------	----------------------	-----------------------------

## 7. ВЫБОР ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ПРОВОДНИКОВ

Аппараты и проводники РУ всех напряжений подстанций выбираются по условиям продолжительного режима работы и проверяются по режиму короткого замыкания.

Расчетными токами продолжительного режима являются:

$I_{норм}$  - наибольший ток нормального режима и  $I_{max}$  - наибольший ток ремонтного или после аварийного (форсированного) режима.

Для конкретных цепей (присоединений) они рассчитываются по формулам:

1) Цепь двухобмоточного трансформатора. На стороне ВН и НН

$$I_{\max} = (K_{n.ав} \cdot S_{ном.т}) / (\sqrt{3} \cdot U_{ном}); \quad (7.1)$$

$$I_{норм} = I_{\max} / 2. \quad (7.2)$$

2) Цепь двухобмоточного трансформатора с расщепленной обмоткой НН. На стороне ВН расчетные токи определяются по формулам (7.1, 7.2). На стороне НН

$$I_{\max} = (K_{n.ав} \cdot S_{ном.т}) / (2 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}); \quad (7.3)$$

$$I_{норм} = I_{\max} / 2. \quad (7.4)$$

3) Цепь трехобмоточного трансформатора. На стороне ВН расчетные токи определяются по (7.1, 7.2). На стороне СН

$$I_{\max} = S_{\Sigma СН} (\sqrt{3} \cdot U_{ном}); \quad (7.5)$$

$$I_{норм} = I_{\max} / 2. \quad (7.6)$$

Аналогично определяются расчетные токи на стороне НН с заменой нагрузок СН на нагрузки НН.

4) Цепь автотрансформатора. На стороне ВН и СН расчетные токи определяются по (7.1, 7.2), т.к. автотрансформатор может быть использован для связи двух систем и перетоков мощности как из ВН в СН, так и в обратном направлении. На стороне НН расчетные токи определяются по формулам (7.5, 7.6) и нагрузке  $S_{\Sigma НН}$ .

5) Цепь линии к потребителю.

а) Если линия одиночная, то

$$I_{\max} = I_{норм} = S_{м1} / (\sqrt{3} \cdot U_{ном}), \quad (7.7)$$

где  $S_{м1}$  - мощность нагрузки единичного потребителя из табл.1.

б) Если потребитель имеет 2,4,6 и т.д. ( $n$ ) линии, подключенных симметрично к двум секциям сборных шин ВН, СН или НН подстанции, то

$$I_{\max} = S_{м1} / [(n/2) \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}]; \quad (7.8)$$

$$I_{ном} = I_{\max} / 2, \quad (7.9)$$

что соответствует режиму вывода из работы одной секции.

При нечетном количестве параллельных линий к потребителю за расчетный форсированный режим принимается наиболее неблагоприятный режим отключения секции с наибольшим количеством присоединений. При этом

$$I_{\max} = S_{м1} / (n' \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}); \quad (7.10)$$

$$I_{норм} = S_{м1} / n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}, \quad (7.11)$$

где  $n'$  - количество линий, подключенных к оставшейся в работе секции.

в) Если потребитель имеет  $n$  параллельных линий, подключенных к РУ ВН или СН по схеме с двумя рабочими системами сборных шин, то

$$I_{max} = S_{M1} / [(n-1) \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}]; \quad (7.12)$$

$$I_{ном} = S_{M1} / (n \cdot \sqrt{3} \cdot U_{ном}). \quad (7.13)$$

б) Цепь питающей линии. Расчетные токи определяются по формулам (7.7 - 7.13) с заменой в них мощности единичного потребителя на суммарную мощность подстанции  $S_{\Sigma расч}$  с учетом передаваемого транзита мощности.

7) Цепи секционных, шиносоединительных выключателей. В нормальном режиме они чаще всего отключены. Через включенный шиносоединительный выключатель в нормальном режиме ток незначителен и обусловлен неравномерностью распределения нагрузки по двум системам сборных. Максимальный расчетный ток определяется для самого неблагоприятного режима, когда все отходящие линии переведены на одну секцию или систему сборных шин, а питающие линии – на другую.

8) Сборные шины. Для них расчетным также является наиболее неблагоприятный режим, и расчетный максимальный ток определяется в соответствии с пунктом 7.

Следует отметить, что приведенные формулы расчета  $I_{ном}$  и  $I_{max}$  справедливы для наиболее распространенных двух трансформаторных подстанций. В случае одно- и трех трансформаторных подстанций в формулы должны быть внесены изменения с учетом фактического режима работы трансформаторов.

Условия выбора и проверки аппаратов и проводников приведены в учебной и справочной литературе [3,4,10 – 15]. Рекомендации по выбору типов аппаратов указаны в нормах технологического проектирования подстанций [17].

Данный этап проектирования рекомендуется выполнять в следующей последовательности:

а) выбор аппаратов РУ ВН, СН. Результаты сводятся в таблицы по форме табл.4.

Выбираются следующие аппараты: выключатели, разъединители, трансформаторы тока и напряжения, предохранители, ограничители перенапряжений.

Таблица 4

Выбор аппаратов ВН

Наименование и тип аппарата	Условие выбора	Расчетные данные	Технические параметры	Проверка условия
-----------------------------	----------------	------------------	-----------------------	------------------

б) выбор ячеек КРУ 6-10 кВ и проверка аппаратов, входящих в комплект ячеек выбранного типа. Результаты проверки сводятся в аналогичную таблицу;

в) выбор питающих линий;

г) выбор отходящих линий последовательно: по стороне ВН, по стороне СН и по стороне НН;

д) выбор ошиновки РУ ВН, СН;

е) выбор ошиновки НН трансформатора до вводных ячеек РУ 6 - 10 кВ.

Выбор ошиновки включает в себя и выбор изоляторов (подвесных, опорных, проходных, маслонаполненных вводов).

При выборе трансформаторов тока следует иметь в виду, что они могут быть встроены в вводы выключателей или трансформаторов.

Проверка измерительных трансформаторов тока и напряжения по допустимой величине сопротивления  $r_2$  или мощности вторичной обмотки  $S_a$  (приборов учета электроэнергии и измерения электрических параметров) в данном разделе может быть выполнена со ссылкой на результаты раздела 13 или может быть перенесена в раздел 13.

## **8. ВЫБОР СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА И ИСТОЧНИКОВ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА**

Питание оперативных цепей управления, защиты, автоматики, телемеханики и сигнализации, а также включающих отключающих устройств коммутационных аппаратов осуществляется от специальных источников оперативного тока. Оперативный ток используется также для аварийного освещения при нарушениях нормальной работы подстанции.

К постоянно включенным электроприемникам оперативного тока относятся сигнальные лампы, катушки реле, постоянно включенная часть аварийного освещения и т.п.

Временная нагрузка полностью включенного аварийного освещения потребляется в течение 0,5 - 1 часа до ликвидации аварии.

Кроме длительного тока нагрузки сети оперативного тока имеют место кратковременные (не более 5 секунд) пиковые нагрузки, потребляемые катушками электромагнитных приводов аппаратов. Эта мощность может быть значительна.

На подстанциях применяют следующие системы оперативного тока:

- постоянный оперативный ток от аккумуляторных батарей (СОПТ);
- переменный оперативный ток от, измерительных трансформаторов тока и напряжения, трансформаторов собственных нужд;
- выпрямленный оперативный ток от блоков питания или выпрямительных силовых устройств;
- смешанный, использующий разные системы оперативного тока (постоянный и выпрямленный, переменный и выпрямленный).

Аккумуляторные батареи являются независимыми от режима работы и состояния первичных цепей подстанции источниками питания. Трансформаторы тока и напряжения, трансформаторы собственных нужд, обеспечивающие питание систем переменного и выпрямленного оперативного тока, являются зависимыми источниками. Поэтому они дополняются источниками питания импульсного действия - предварительно заряженными конденсаторами или индукционными накопителями, обеспечивавшими отключение коммутационных аппаратов при исчезновении на подстанции переменного напряжения.

В соответствии с рекомендациями [14,17] область применения той или иной системы оперативного тока определяется типом подстанции по способу её присоединения к питающим линиям электропередачи.

**ПЕРЕМЕННЫЙ** оперативный ТОК применяется:

на подстанциях 35/6-10 кВ которые по способу присоединения к питающим линиям являются ответвительными или тупиковыми.

На всех остальных вновь сооружаемых подстанциях должна применяться СИСТЕМА ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА (СОПТ), питаемая от аккумуляторных батарей [17].

## 9. РАСЧЕТ НАГРУЗОК, ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРА И СХЕМЫ ПИТАНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД

Потребителями собственных нужд районной подстанции могут быть:

- электроосвещение (зданий и наружных площадок);
- вентиляторы охлаждения силовых трансформаторов;
- подогрев масла и приводов открыто установленных выключателей, разъединителей отделителей и короткозамыкателей;
- отопление и вентиляция закрытых помещений;
- подогрев шкафов КРУН, КРУ, релейных шкафов;
- зарядные и подзарядные агрегаты;
- масляное хозяйство;
- компрессорное хозяйство и т.п.

Мощность потребителей собственных нужд подстанций невелика (от 50 до 300 кВт), поэтому они питаются от сети 380/220 В. Для их питания, предусматривается установка двух трансформаторов собственных нужд (ТСН), мощность которых выбирается в соответствии с нагрузкой с учетом допускаемой перегрузки при отказах и ремонтах одного из трансформаторов.

В курсовом проекте нагрузку собственных нужд допустимо оценивать ориентировочно на основании данных таблиц П 6.1, П 6.2 [4]. В таблицах приведена мощность  $P_{уст}$  потребителей собственных нужд. Приняв для двигательной нагрузки  $\cos\varphi = 0,85$ , а для остальных потребителей  $\cos\varphi = 1$ , определяет  $Q_{уст}$ . Суммарная расчетная нагрузка потребителей собственных нужд определяется по формуле (9.1)

$$S_{расчТСН} = \kappa_c * \sqrt{(\sum P_{уст.1})^2 + (\sum Q_{уст.1})^2}, \quad (9.1)$$

где  $\kappa_c$  - коэффициент спроса, учитывавший коэффициенты загрузки и одновременности. В ориентировочных расчетах принимается  $\kappa_c = 0,8$ .

Выбор трансформатора собственных нужд проводится по условию (9.2)

$$S_{номТСН} \geq S_{расчТСН} \quad (9.2)$$

При выборе ТСН следует учитывать рекомендации [17] которые указывают, что на вновь сооружаемых подстанциях для собственных нужд должны применяться, как правило, сухие трансформаторы с литой изоляцией воздушного охлаждения.

Присоединение ТСН к сети зависят от системы оперативного тока. На подстанциях 35 кВ с переменным оперативным током ТСН присоединяются через предохранители к вводам 6-10 кВ главных трансформаторов до выключателей вводов в РУ 6-10 кВ. На подстанциях с постоянным оперативным током ТСН присое-

диняются через предохранители или выключатели к шинам РУ 6-35 кВ или к выводам 6-35 кВ автотрансформаторов.

Трансформаторы ТСН небольшой мощности (до 63-100 кВА) устанавливаются непосредственно в шкафах КРУ (КРУН) 6-10 кВ. Если рассчитанная мощность ТСН превышает указанные значения, трансформаторы размещаются, открыто вне РУ 6-10 кВ. Для их подключения предусматриваются ячейки с предохранителями (выключателями) и кабельными выводами.

Вторичным напряжением 380/220 В от ТСН записывается щит собственных нужд, выполняемый по схеме одиночной системы сборных шин, секционированной автоматическим выключателем (автоматом).

Щит собственных нужд устанавливается в закрытом помещении обще подстанционного пункта управления (ОПУ).

## **10. ВЫБОР ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ПО ПОДСТАНЦИИ**

В курсовом проекте должны быть рассмотрены следующие вопросы конструктивного выполнения подстанции:

- выбор типов выполнения распределительных устройств, всех напряжений (открытого типа - ОРУ или закрытого типа ЗРУ);
- компоновка площади подстанции с размещением на плане РУ всех напряжений и трансформаторов, ТСН, вспомогательных зданий и сооружений (ОПУ, компрессорной, маслохозяйства и т.д.);
- компоновка РУ всех напряжений с размещением на плане аппаратов;
- выбор конструкций для размещения аппаратов и ошиновки (сборных шин и связей между аппаратами);
- размещение на плане ремонтных площадок, подъездных автомобильных дорог и железнодорожных путей к трансформаторам и отдельным аппаратам;
- выбор способов и приспособлений для прокладки силовых и контрольных кабелей.

Компоновка, конструктивное выполнение подстанции, и ее отдельных распределительных устройств должны обеспечивать удобство и безопасность обслуживания, пожарную безопасность, экономичность сооружения и эксплуатации. Основные требования к конструктивному выполнению РПП приводятся в Правилах [1,2] и Нормах технологического проектирования [17]. Варианты и примеры компоновок и конструкций ОРУ и ЗРУ достаточно полно рассматриваются в учебной литературе [3, 4 5, 8, 9, 12, 14, 15], а также на информационных порталах заводов изготовителей электроэнергетического оборудования.

При проектировании рекомендуется использовать типовые компоновки, унифицированные конструкции и строительные блоки или модули (КТПБ), (КТПМ), (КТПБМ).

## **11. РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ**

На РПП предусматривается защитное заземление «обеспечивающее защиту обслуживающего персонала от опасных напряжений прикосновения к металличе-

ским частям, которые нормально не находятся под напряжением, но могут оказаться под напряжением из-за повреждения изоляции. В расчете заземления не учитываются естественные заземлители, которые на РПП, как правило, отсутствуют. Поэтому расчет осуществляется только для заземлений, выполняемых искусственно.

Искусственное заземляющее устройство может выполняться из прутковой или полосовой стали в виде сетки на глубине 0,5-0,7 м, к которой присоединяется заземляемое оборудование.

Расстояние между полосами сетки должно быть не более 6 м. Граница заземляющего устройства должна находиться на территории подстанции на расстоянии не менее 3 м от ограждения.

Если сопротивление сетки превышает допускаемое по нормам ПЭУ, то к сетке добавляют вертикальные электроды длиной 3-5 м. Расстояние между электродами принимается не менее их длины.

Для закрытых РУ заземление выполняется в виде контура из горизонтального проводника или контура с вертикальными электродами по периметру здания на расстоянии 0,8 - 1,0 м от фундамента.

Расчет заземляющего устройства РПП осуществляется в соответствии с рекомендациями [4,6], исходя из условия, что в любое время года его сопротивление  $R_z$  не должно превышать допустимого значения.

## 12. РАСЧЕТ ЗАЩИТЫ ПОДСТАНЦИИ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ

Защита от грозовых перенапряжений открытых распределительных устройств РПП осуществляется стержневыми молниеотводами. Небольшие подстанции 35/6-10 кВ могут быть защищены одним молниеотводом. На высоте  $h_x$  защищаемого объекта (наиболее выступающих элементов ОРУ) радиус действия  $r_x$  молниеотвода определяется по формуле (12.1)

$$r_x = h_a [1.6 / (1 + (h_x / h) * p)], \quad (12.1)$$

где  $h$  - высота молниеотвода;

$h$  - активная высота молниеотвода;

$p$  - коэффициент, равный:

$p=1$  для молниеотводов при  $h < 30$  м;

$p=5,8$  для молниеотводов при  $h > 30$  м.

$$h_a = h - h_x \quad (12.2)$$

Пользуясь формулой (12.1), подбирают высоту  $h$  молниеотвода так, чтобы зона его действия (круг площадью  $\pi r_x^2$ ) полностью закрывала площадь подстанции на высоте  $h_x$ .

На подстанциях, имеющих ОРУ 110 кВ и выше, применяют два, три и большее число молниеотводов. При этом рекомендуется следующая последовательность расчета: намечается к установке минимальное количество молниеотводов (2, 3 или 4), строится общая зона действия молниеотводов и проверяется условие за-

щищенности всей площади ОРУ. Если не удастся добиться этого условия даже при увеличении высоты молниеотводов, то принимают большее количество молниеотводов, заново строят общую зону защиты и т.д. Не следует идти по пути максимального увеличения высоты молниеотводов. Лучше установить больше молниеотводов средней высоты, что проще при монтаже и эксплуатации.

Общая зона действия двух стержневых молниеотводов показана на рис.2.

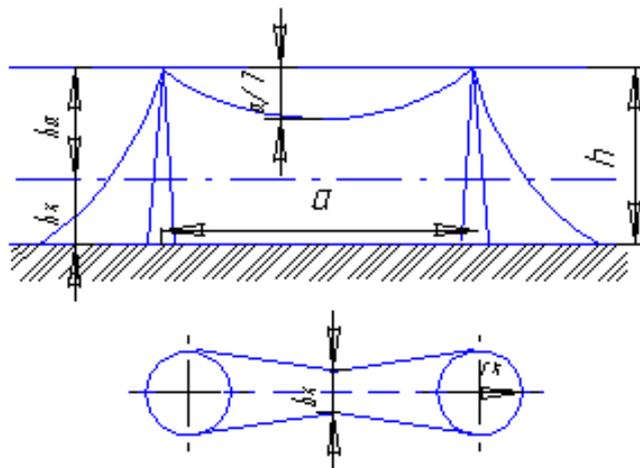


Рис. 2. Зона защиты двух стержневых молниеотводов

Радиус действия  $r_x$  определяется по формуле (12.1), а  $b_x$  - по формуле (12.3)

$$b_x = 4 * r_x [(7 * h_a - a) / (14 * h_a - a)] \quad (12.3)$$

Зона действия трех и четырех молниеотводов показана на рис.3 и 4.

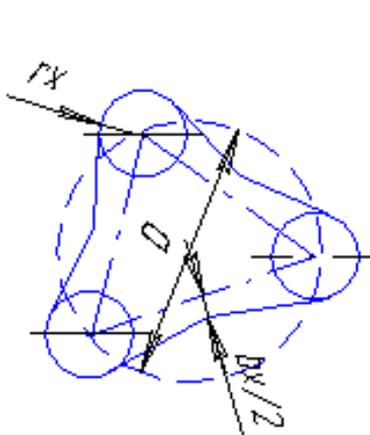


Рис. 3. Зона защиты трех стержневых молниеотводов

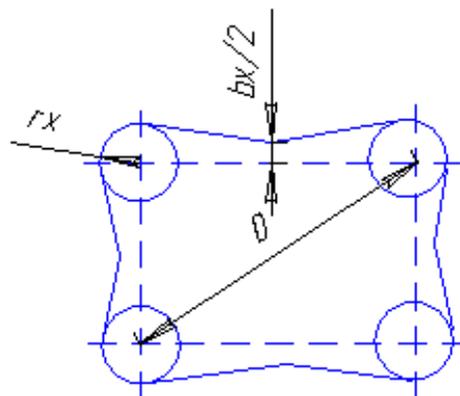


Рис. 4. Зона защиты четырех стержневых молниеотводов

Внешние области зоны действия трех и четырех молниеотводов  $r_x$  и  $b_x$  определяются по формулам (12.1) и (12.3).

Объект высотой  $h_x$  внутри зоны защиты будет защищен, если выполняется условие

$$D \leq 8 * h_a * p, \quad (12.4)$$

где  $D$  – диаметр окружности, проходящей через вершины треугольника, соединяющего основания молниеотводов (рис.3) или диагональ прямоугольника (рис.4).

Стержневые молниеотводы устанавливаются, как правило, на конструкциях ОРУ. Высота молниеотвода при этом определяется с учетом высоты несущих конструкций. При необходимости используются отдельно стоящие молниеотводы. На трансформаторных порталах молниеотводы могут быть установлены при соблюдении некоторых условий [7,8].

Токопроводящий спуск молниеотвода соединяется с заземляющим устройством ОРУ, если молниеотвод установлен на конструкции ОРУ. При этом должно быть установлено два - три или один - два вертикальных электрода длиной 3 - 5 м соответственно на таком же расстоянии от стойки с молниеотводом. Отдельно стоящие молниеотводы могут иметь собственные заземлители.

Защита зданий ЗРУ и закрытых подстанций, имеющих металлические покрытия кровли или железобетонные конструкции кровли, осуществляется заземлением этих покрытий или конструкции. Если такая защита невозможна, устанавливаются стержневые молниеотводы на крыше и заземляются.

### **13. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

В курсовом проекте должны быть рассмотрены следующие вопросы измерений и учета:

- определение необходимого объема измерений и учета;
- выбор типов и классов измерительных приборов;
- размещение приборов системы измерений и учета в схеме.

Необходимый объем измерений, а также состав приборов системы учета и измерений на основных присоединениях РПП представлены в [3,4,8], основные технические характеристики приборов [13,14], а также на информационных порталах заводов изготовителей электроаппаратной продукции.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Правила устройства электроустановок – СПб.: Издательство ДЕАН, 2004. – 648 с.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – М.: Изд-во НУ ЭНАС, 2004. – 80 с.
3. Рожкова Л. Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций : учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Л. Д. Рожкова, Л. К. Карнеева, Т. В. Чиркова. — 10-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2013. — 448 с.
4. Рожкова Л.Д., Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. - М.: Энергоатомиздат, 1987.-648 с.
5. Двоскин Л.И. Схемы и конструкции распределительных устройств. - М.: Энергоатомиздат, 1985.- 220 с.
6. Рябкова Е.Я. Заземления в установках высокого напряжения. М.: Энергия, 1978.- 220 с.
7. Юриков П.А. Защита электростанций и подстанций 3-500 кВ от прямых ударов молнии. – М.: Энергоиздат, 1982.- 88 с.
8. Гук Ю.Б., Кантан В.В., Петрова С.С. Проектирование электрической части станций и подстанций. – Л.:Энергоатомиздат 1985.- 312 с.
9. Ополева Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения: Справочник: учеб. пособие / Г.Н. Ополева. – М.: ФОРУМ: ИНФРА – М, 2006. – 480 с.
10. Электротехнический справочник.: Т. 2, 3 / Под ред. профессоров МЭИ. В.Г. Герасимова (гл. ред.) и др., 9-е изд. МЭИ, 2003,2004.
11. Ситников, Н.В. Электроснабжение [Электронный ресурс] : Справочные материалы: Учеб. пособие. - Электрон. текстовые, граф. дан. ( 5,0 Мб ). - Воронеж: ФГБОУ ВПО "Воронежский государственный технический университет", 2013.
12. Справочник по проектированию электрических сетей / Под ред. С.С. Файбисовича. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2012.- 320 с.
13. Электрическая часть станций и подстанций (справочные материалы) / Под ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Энергоиздат. 1989. - 402 с.
14. Макаров Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4-35 кВ и 110-1500 кВ. – М.: Папирус Про, 2005. – 624 с.
15. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования / Под. ред. Б.Н. Неклепаева. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002. – 152 с.
16. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения. М.: Энергосетьпроект, 2008.-132 с.
17. Нормы технологического проектирования ПС переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ. - М.: Энергосетьпроект, 2017.- 135 с.

# **ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ И ПОДСТАНЦИИ**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к курсовому проектированию  
для студентов направления 13.03.02  
«Электроэнергетика и электротехника»  
всех форм обучения

### **Составители:**

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

Компьютерный набор Н. В. Ситникова

Издается в авторской редакции

Подписано к изданию 15.01.2022.

Уч.-изд. л. 1,3.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84