

**А. В. Куксин**

**ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Учебное пособие*

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 621.311

ББК 31.281

К89

Р е ц е н з е н т:

заведующая кафедрой электрооборудования Липецкого  
государственного технического университета  
доктор технических наук *В. И. Зацепина*

**Куксин, А. В.**

**К89** Электроснабжение промышленных предприятий :  
учебное пособие / А. В. Куксин. – Москва ; Вологда :  
Инфра-Инженерия, 2021. – 156 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0524-9

Приведена система электроснабжения промышленного предприятия. Описаны приемники электрической энергии промышленных предприятий, внутрицеховые электрические сети. Рассмотрены вопросы внутризаводского электроснабжения, компенсации реактивной мощности, а также короткого замыкания в системах электроснабжения.

Для студентов электроэнергетических направлений подготовки, а также специалистов в области электроэнергетики и электротехники.

УДК 621.311

ББК 31.281

ISBN 978-5-9729-0524-9 © Куксин А. В., 2021

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

## Содержание

Список основных сокращений .....	5
<b>Введение</b> .....	6
Термины и определения .....	7
<b>1. Система электроснабжения промышленного предприятия</b> .....	13
1.1. Особенности и основные требования к системам электроснабжения промышленных предприятий .....	14
1.2. Основные положения технико-экономических расчетов в электроснабжении .....	16
1.3. Напряжения электрических сетей и область их применения .....	18
1.4. Режимы нейтрали электрических сетей .....	22
<b>2. Приемники электрической энергии промышленных предприятий</b> .....	28
2.1. Характеристика электроприемников по надежности электроснабжения .....	28
2.2. Режимы работы электроприемников .....	30
2.3. Электрические нагрузки и их графики .....	35
2.4. Показатели, характеризующие приемники ЭЭ и их графики нагрузки .....	42
2.5. Методы расчета электрических нагрузок .....	47
2.6. Расчет однофазных нагрузок .....	50
<b>3. Внутрицеховые электрические сети</b> .....	53
3.1. Классификация помещений и наружных установок по окружающей среде .....	54
3.2. Структура цеховых электрических сетей .....	58
3.3. Основные схемы цеховых трансформаторных подстанций .....	62
3.4. Выбор числа и мощности цеховых трансформаторов .....	66

3.5. Конструктивное выполнение внутрицеховых электрических сетей .....	68
3.6. Основное электрооборудование цеховых сетей .....	74
3.7. Расчет и выбор сетей и аппаратов защиты напряжением до 1000 В .....	84
3.8. Расчет сетей осветительных электроустановок .....	94
<b>4. Внутризаводское электроснабжение .....</b>	<b>97</b>
4.1. Назначение и особенности электрических сетей внутризаводского электроснабжения .....	97
4.2. Схемы и основное электрооборудование главных понизительных подстанций .....	105
4.3. Картограмма нагрузок .....	113
<b>5. Компенсация реактивной мощности .....</b>	<b>115</b>
5.1. Средства компенсации реактивной мощности .....	120
5.2. Основные расчеты при компенсации реактивной мощности .....	126
5.3. Конструктивное выполнение и размещение компенсирующих устройств .....	129
<b>6. Короткие замыкания в системах электроснабжения .....</b>	<b>137</b>
6.1. Основные понятия и соотношения величин токов короткого замыкания .....	137
6.2. Электродинамическое и термическое действия токов короткого замыкания .....	145
<b>Заключение .....</b>	<b>148</b>
<b>Библиографический список .....</b>	<b>149</b>
<b>Приложение А. Коэффициенты использования и коэффициенты мощности некоторых электроприемников промышленных предприятий .....</b>	<b>151</b>
<b>Приложение Б. Коэффициент спроса по некоторым предприятиям .....</b>	<b>153</b>

## Список основных сокращений

ПУЭ – правила устройства электроустановок  
ЭЭ – электрическая энергия  
ЭУ – электроустановка  
ЭП – электроприемник  
ИП – источник питания  
РУ – распределительное устройство  
ОРУ – открытое распределительное устройство  
ЗРУ – закрытое распределительное устройство  
КРУ – комплектное распределительное устройство  
КРУН – КРУ наружной установки  
ТН – трансформатор напряжения  
СВ – секционный выключатель  
Р – разъединитель  
РП – распределительный пункт  
ГПП – главная понизительная подстанция  
ТП – трансформаторная подстанция  
РУНН – распределительное устройство низкого напряжения  
ШР – шкаф распределительный  
ТЭО – технико-экономическое обоснование  
ЭЭС – электроэнергетическая система  
СЭС – система электроснабжения  
ЭСПП – электроснабжение промышленных предприятий  
КТП – комплектная трансформаторная подстанция  
КТПН – КТП наружной установки  
ШМА – шинопровод магистральный алюминиевый  
ШРА – шинопровод распределительный алюминиевый  
ШОС – шинопровод осветительный  
ЦЭН – центр электрических нагрузок  
ИРМ – источник реактивной мощности  
ККУ – комплектная конденсаторная установка

## Введение

Динамичность технологических процессов и закономерное совершенствование производства требуют от системы электроснабжения современных промышленных предприятий гибкости, простоты и надежности. При этом промышленные объекты различных отраслей хозяйства имеют свои, зачастую уникальные требования к проектированию системы электроснабжения.

Учебный план подготовки бакалавров направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль подготовки: «Электроэнергетические системы и сети» содержит дисциплину «Электроснабжение».

Данное учебное пособие содержит основной материал, позволяющий получить минимальный набор теоретических знаний по электроснабжению. В учебном пособии рассматриваются: система электроснабжения промышленного предприятия, приемники электрической энергии промышленных предприятий, внутрицеховые электрические сети, внутризаводское электроснабжение, компенсация реактивной мощности, а также короткие замыкания в системах электроснабжения.

Студентам необходимо: овладеть методиками расчета электрических нагрузок на различных уровнях электроснабжения промышленных предприятий, расчета и выбора сетей и аппаратов защиты внутрицехового электроснабжения; знать схемы и основное электрооборудование внутризаводского электроснабжения, а также уметь решать вопросы по повышению надежности, безопасности и экономичности их работы.

Учебное пособие предназначено для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», и соответствует программе дисциплины «Электроснабжение».

## Основные термины и определения

Важнейшие термины, определения и сокращения установлены Федеральными законами, стандартами «Правилами устройства электроустановок» (ПУЭ) и обязательны для применения в документации всех видов научно-технической, учебной и справочной литературе, а также при выполнении расчетных заданий, курсовых работ и выпускных квалификационных работ в ВУЗах.

**Электроэнергетическая система** – электрическая часть энергосистемы и питающиеся от нее приемники электрической энергии (ЭЭ), объединенные общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

**Электроснабжение** – обеспечение потребителей электрической энергией.

**Система электроснабжения** – совокупность электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией.

**Централизованное электроснабжение** – электроснабжение потребителей ЭЭ от энергосистемы.

**Электрическая сеть** – совокупность электроустановок для передачи и распределения ЭЭ, состоящая из подстанций и распределительных устройств (РУ), соединенных линиями электропередачи (ЛЭП), и работающая на определенной территории.

**Электрическая сеть предприятия** объединяет понижительные и преобразовательные подстанции, распределительные пункты (РП), электроприемники (ЭП) и ЛЭП на территории предприятия.

**Распределительное устройство** – устройство, предназначенное для приема и распределения ЭЭ, содержащая коммутационные аппараты, сборные и соединительные шины, вспомогательные устройства (компрессорные, аккумуляторные и др.), а также устройства защиты, автоматики и измерительные прибо-

ры. РУ бывают: открытым (ОРУ), закрытым (ЗРУ) и комплексными (КРУ).

**Источник питания (ИП)** – РУ генераторного напряжения электростанции или РУ вторичного напряжения понизительной подстанции энергосистемы или подстанции глубокого ввода 35–220 кВ промышленного предприятия, его узловая распределительная подстанция, главная понизительная подстанция (ГПП), собственная теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), к которым присоединены распределительные сети предприятия.

**Подстанция** – электроустановка, служащая для распределения и преобразования ЭЭ, состоящее из трансформаторов или других преобразователей энергии, распределительных устройств, устройств управления и вспомогательных сооружений. Подстанции бывают трансформаторными, преобразовательными, распределительными в зависимости от преобладания той или иной функции.

**Узловая распределительная подстанция** – центральная подстанция предприятия на напряжение 35–220 кВ, получающая энергию от энергосистемы и распределяющая ее на том же напряжении по главным понизительным подстанциям или подстанциям глубокого ввода на территории предприятия.

**Главная понизительная подстанция** – трансформаторная подстанция, получающая питание непосредственно от энергосистемы на напряжениях 35 кВ и выше, и распределяющая энергию на более низком напряжении по всему предприятию или отдельно его району.

**Глубокий ввод** – система электроснабжения с приближением высшего напряжения (35–220 кВ) к электроустановкам потребителей с минимальным количеством ступеней промежуточной трансформации и аппаратов.

**Подстанции глубокого ввода** размещаются на территории предприятия рядом с наиболее крупными объектами потребле-



ния ЭЭ и получают питание от энергосистемы, узловой распределительной подстанции, ГПП или ТЭЦ предприятия, и выполняются по упрощенным схемам первичной коммутации.

**Распределительный пункт** – распределительное устройство, предназначенное для приема и распределения ЭЭ на напряжение 6–20 кВ. РП может совмещаться с трансформаторной или преобразовательной подстанцией, обслуживающей приходящих к нему потребителей.

**Цеховая трансформаторная подстанция (ТП)** – подстанция, преобразующая ЭЭ на пониженное напряжение (до 1000 В) и непосредственно питающая ЭП одного или нескольких прилегающих цехов, либо части большого цеха. В ряде случаев от этих же подстанций питаются близкорасположенные потребители высшего напряжения.

**Пристроенная подстанция** – подстанция, непосредственно приходящая к основному зданию.

**Встроенная подстанция** – закрытая подстанция, вписанная в контур основного здания.

**Внутрицеховая подстанция** – подстанция, расположенная внутри производственного здания, открыто или в отдельном закрытом помещении.

**Отдельностоящая подстанция** – подстанция, расположенная отдельно от основных зданий.

**Столбовая (мачтовая) трансформаторная подстанция** – открытая ТП, все оборудование которой установлено на конструкциях или опорах воздушных линий (ВЛ) на высоте, не требующей ее ограждения.

**Электроустановка (ЭУ)** – совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования, предназначенных для производства, преобразования, передачи, накопления, распределения ЭЭ и преобразования ее в другие виды энергии

(электрическая подстанция, ЛЭП, распределительная подстанция, конденсаторная батарея и др.).

**Приемник электроэнергии (ЭП)** – устройство, аппарат, агрегат, механизм, в котором происходит преобразование ЭЭ в другой вид энергии для ее использования (электродвигатели, электропечи, установки электроосвещения, электростатического и электромагнитного поля и др.).

**Потребитель электроэнергии** – электроприемник или их группа, объединенные технологическим процессом и размещающиеся на определенной территории.

**Нормальный режим потребителя ЭЭ** – режим, при котором обеспечиваются заданные значения параметров его работы.

**Послеаварийный режим** – режим, в котором находится потребитель электроэнергии в результате нарушения в системе его электроснабжения до установления нормального режима после локализации отказа.

**Независимый источник питания** – ИП, на котором сохраняется напряжение в послеаварийном режиме в регламентированных пределах при исчезновении его на другом или других источниках питания. К числу независимых ИП относятся две секции или системы шин одной или двух электростанций и подстанций при одновременном соблюдении следующих условий:

1. Каждая из секций или систем шин в свою очередь имеет питание от независимого ИП;

2. Секции (системы) шин не связаны между собой или имеют связь, автоматически отключающуюся при нарушении нормальной работы одной из секций (систем) шин.

**Токоспровод** – устройство для подачи и распределения электроэнергии, состоящее из неизолированных и изолированных проводников и относящихся к ним изоляторов, защитных оболочек, ответвительных устройств, поддерживающих и опорных конструкций.

**Шинопровод** – жесткий токопровод до 1000 В, поставляемый комплектными секциями.

**Кабельная линия (КЛ)** – линия для передачи ЭЭ, состоящая из одного или нескольких параллельных кабелей с соединительными, стопорными муфтами (заделками) и крепежными деталями.

**Кабельное сооружение** – сооружение, предназначенное для размещения кабельных линий: кабельные тоннели, каналы, короба, блоки, шахты, этажи, двойные полы, эстакады, галереи, камеры и т.д.

**Воздушные линии** – устройства для передачи ЭЭ по проводам, расположенным на открытом воздухе и прикрепленных с помощью изоляторов, и арматуры к опорам или кронштейнам и стойкам на инженерных сооружениях (мостах, путепроводах и т. п.).

**Электропроводка** – совокупность проводов и кабелей с относящимися к ним креплениями, поддерживающими защитными конструкциями и деталями.

**Распределительное устройство низкого напряжения (РУНН)** – совокупность конструкций, аппаратов и приборов, предназначенных для приема и распределения ЭЭ напряжением до 1000 В переменного тока и 1500 В постоянного тока.

**Вводное устройство** – совокупность конструкций, аппаратов и приборов, устанавливаемых на вводе питающей линии в здание или его обособленную часть. Вводное устройство, включающее в себя так же аппараты и приборы отходящих линий, называется вводным распределительным устройством.

**Главный распределительный щит** – распределительный щит, через который снабжается электроэнергией все здание или его обособленная часть.

**Шкаф распределительный (ШР)** – устройство напряжением до 1000 В, в котором установлены аппараты защиты и коммутационные аппараты (или только аппараты защиты) для отдельных ЭП или их группы (электродвигателей, групповых щитков).

**Групповой щиток** – устройство, в котором устанавливаем аппараты защиты и коммутационные аппараты (или только коммутационные аппараты) для отдельных групп светильников, штепсельных розеток и стационарных электроприемников.

# 1. Система электроснабжения промышленного предприятия

Системой электроснабжения (СЭС) называют совокупность взаимосвязанных электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией.

Согласно ПУЭ, потребителем электроэнергии (ЭЭ) называется электроприемник или их группа, объединенные технологическим процессом и размещающиеся на определенной территории. К потребителям электроэнергии относятся предприятия, организации, территориально обособленные цеха, строительные площадки, квартиры и т. д. (по ГОСТ 13109-97).

Систему электроснабжения промышленных предприятий (ЭСПП) условно разделяют на три подсистемы (рис. 1.1).

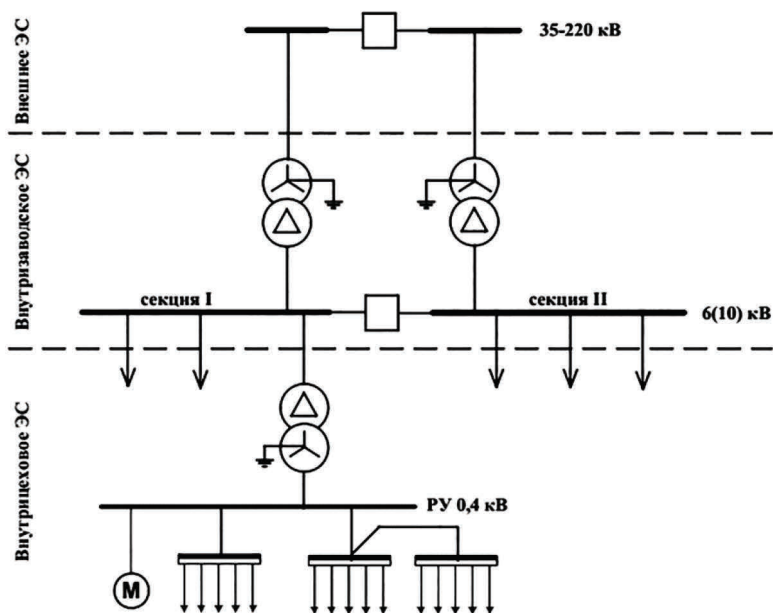


Рис. 1.1. Подсистемы электроснабжения промышленного предприятия

1. Внешнее электроснабжение – это электрические сети и питающие линии напряжением 35–220 кВ, соединяющие ТП энергосистемы с приемными подстанциями предприятия (например, ГПП).

2. Внутривозовское электроснабжение – это приемная подстанция предприятия, собственная ТЭЦ и комплекс электрических распределительных сетей, расположенных на территории предприятия и осуществляющих прием, распределение и передачу ЭЭ к пунктам питания (РП, ТП) на низшем напряжении приемных подстанций предприятия – 6–10 кВ.

3. Внутривозовское электроснабжение – это комплекс внутривозовских ТП, распределительных сетей, пунктов питания (РП или ШР) и сетей непосредственного питания ЭП напряжением до 1000 В.

### **1.1. Особенности и основные требования к системам электроснабжения промышленных предприятий**

Система ЭСПП, как часть энергосистемы, в энергетическом плане более простая (более низкие напряжения, меньшая мощность и протяженность линий, отсутствие замкнутых контуров и др.) и более сложная в плане использования и преобразования ЭЭ в технологических целях промышленного производства. Электроприемники как электрическая часть технологических агрегатов входят неотъемлемыми элементами в систему ЭСПП и во многом определяют работу этой системы и ее параметры.

Электроэнергетика как жизнеобеспечивающая отрасль промышленности обладает рядом особенностей, выделяющих ее из других отраслей промышленности.

**Первая особенность электроэнергетики** – неразрывность и практически полное совпадение во времени процессов

производства, распределения и потребления, т. е. выполняется баланс:

$$P_{Г} = P_{\text{ПОТР}} + P_{\text{С.Н.}} = \Delta P, \quad (1.1)$$

$$Q_{Г} = Q_{\text{ПОТР}} + Q_{\text{С.Н.}} = \Delta Q, \quad (1.2)$$

где  $P_{Г}$ ,  $Q_{Г}$  – вырабатываемая источником питания (ИП) активная и реактивная мощности;

$P_{\text{ПОТР}}$ ,  $Q_{\text{ПОТР}}$  – потребленная активная и реактивная мощности;

$P_{\text{С.Н.}}$ ,  $Q_{\text{С.Н.}}$  – потребленная активная и реактивная мощность на собственные нужды ИП;

$\Delta P$ ,  $\Delta Q$  – потери активной и реактивной мощности во всех звеньях энергосистемы.

Вторая особенность – это относительная быстрота протекания переходных процессов в ней. Волновые процессы совершаются в тысячные доли секунды. Это процессы, связанные с короткими замыканиями (КЗ), включениями и отключениями, изменениями нагрузки, нарушениями устойчивости в системе.

Третья особенность – обеспечение ЭЭ всех отраслей промышленности, отличающихся технологией производства, способами преобразования ЭЭ в другие виды энергии, многообразием ЭП.

Особенности энергетики обуславливают особые требования к системе ЭСПП:

1. Быстрота протекания переходных процессов требует обязательного применения в системе ЭСПП специальных автоматических устройств, основное назначение которых – обеспечение функционирования системы ЭСПП, заключающееся в передаче ЭЭ от ИП к месту потребления в необходимом количестве и соответствующего качества;