

Н.В. Дулесова

# ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ

Н.В. Дулесова

# ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ



Учебное пособие

Абакан  
ХТИ – филиал СФУ  
2019

УДК 621.311(07)

ББК 31.28я73

Д81

Рецензенты: *С. В. Швеи*, канд. техн. наук, доц. каф. программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем Инженерно-технологического института ФГБОУ ВО «Хакасский государственный университет им. Н. Ф. Катанова»; *А. Г. Никифоров*, канд. техн. наук, председатель совета директоров ООО «Компания Телецентр»

Автор: Дулесова Наталья Валериевна

Д81 Электроснабжение [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Н. В. Дулесова ; Сиб. федер. ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Электрон. текстовые, граф. дан. (2,4 МБ). – Абакан : ХТИ – филиал СФУ, 2019. – 1 файл. – Систем. требования : Internet Explorer 7 / Mozilla Firefox 3.5 / Opera 9 или выше ; скорости подключения к информ.-телекоммуникац. сетям – 10 Мбит/с ; надстройки к браузеру – Adobe Reader 9 / Foxit Reader 4.3.1.

ISBN 978-5-4278-0072-2

*Рассмотрены вопросы электроснабжения промышленных предприятий, городов, сельскохозяйственных объектов и электрических железных дорог. Приведены методы определения расчетных электрических нагрузок, графики электрических нагрузок и схемы электроснабжения.*

*Предназначено для бакалавров направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения.*

УДК 621.311(07)

ББК 31.28я73

Учебное электронное издание

Редактор Н. Я. Бодягина

Техническая подготовка материалов Н. Я. Бодягина

Подписано к использованию 22.04.2019 г.

Хакасский технический институт –

филиал ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»

655017, Абакан, ул. Щетинкина, 27, тел. (3902)22-53-55, e-mail ris\_khti@mail.ru

ISBN 978-5-4278-0072-2

© Дулесова Н. В., 2019

© ХТИ – филиал СФУ, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.....	7
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ.....	14
2.1. Основные понятия и определения.....	14
2.2. Особенности систем электроснабжения и основные требования к ним .....	17
2.3. Напряжения электрических сетей и область их применения .....	18
2.4. Режимы нейтрали электрических сетей.....	21
2.5. Виды заземления нейтрали в сетях до 1 кВ.....	26
2.6. Классификация помещений и наружных установок по окружающей среде .....	29
3. ПРИЕМНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ .	33
3.1. Классификация электроприемников .....	33
3.2. Электротехнологические и осветительные установки.....	36
3.3. Силовые общепромышленные установки и электродвигатели производственных механизмов .....	45
3.4. Режимы работы потребителей электрической энергии и энергосилового оборудования промышленных предприятий.....	46
3.5. Электрические нагрузки и их графики .....	49
3.6. Физические величины графиков нагрузки .....	56
3.7. Показатели, характеризующие приемники электрической энергии.....	57
4. УРОВНИ (СТУПЕНИ) СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК.....	63
4.1. Структура системы электроснабжения.....	63
4.2. Методы расчета электрических нагрузок .....	65
4.3. Расчет однофазных нагрузок .....	78
4.4. Расчет электрических нагрузок освещения .....	83
5. СХЕМЫ И ОСНОВНОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ГЛАВНЫХ ПониЗИТЕЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ .....	86
5.1. Главные понижительные подстанции промышленных предприятий.....	86
5.2. Схемы главных понижительных подстанций 35–220 кВ.....	87
5.3. Схемы цеховых электрических сетей .....	93
5.4. Картограмма нагрузок .....	97
5.5. Схемы питания осветительных установок .....	99
6. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ 6–110 КВ.....	106

6.1. Построение сети 6–10 кВ .....	106
6.2. Построение сети 35, 110 (150) кВ.....	108
6.3. Сетевое резервирование .....	112
6.4. Требования к надежности электроснабжения потребителей.....	113
6.5. Пропускная способность электрической сети.....	117
7. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ .....	119
7.1. Основные принципы построения системы электроснабжения города.....	119
7.2. Структурная схема электроснабжения города .....	120
7.3. Выбор схем построения электрических сетей напряжением 0,38–20 кВ.....	124
8. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА.....	128
8.1. Выбор и расчет схем электрических сетей внешнего электроснабжения.....	128
8.2. Выбор и расчет схем электрических сетей внешнего электроснабжения.....	128
8.3. Схемы электроснабжения .....	132
8.4. Энергоэффективность в сельском хозяйстве .....	135
9. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ .....	139
9.1. Структура потребления электрической энергии на железной дороге .....	139
9.2. Системы тягового электроснабжения железных дорог.....	141
9.3. Система тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ .....	143
9.4. Система тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц .....	146
9.5. Схема внешнего электроснабжения тяговых подстанций для систем электрической тяги постоянного и переменного тока .....	148
9.6. Схемы присоединения тяговых подстанций к линиям электропередачи.....	150
9.7. Особенности схем питания тяговой сети однофазного тока промышленной частоты .....	151
9.8. Система электроснабжения наземного электрического транспорта.....	154
9.9. Электроснабжение нетяговых потребителей .....	156
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	159
СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ .....	162

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение качества содержания промышленных комплексов и зданий обусловило широкое использование источников электроэнергии и сопутствующей инфраструктуры. На современных предприятиях функции систем энергоснабжения предполагают наибольшую ответственность, поскольку малейший сбой в питании оборудования может повлечь нарушение производственных процессов. И это лишь часть рисков, которые необходимо минимизировать еще на стадии разработки проекта системы электроснабжения. Не менее значимы вопросы оптимизации данной инфраструктуры, поскольку затраты на энергетические ресурсы становятся наиболее дорогостоящим пунктом в смете по содержанию предприятий [2].

Комплекс электроснабжения можно представить в виде трехсоставной системы. Это непосредственно источник питания, распределяющая инфраструктура и средства подачи электроэнергии. Для взаимосвязи между этими компонентами устройство системы электроснабжения предусматривает широкий перечень оборудования и вспомогательных элементов:

- линии электропередачи (обеспечивают передачу энергии к приемникам);
- понизительные подстанции (осуществляют первичное преобразование энергии от ее источников);
- распределительные станции (выполняют важную функцию сетевого распределения энергии для снабжения нескольких потребителей);
- преобразовательные установки (осуществляют подготовку электрического потока для конечного использования);
- воздушные линии и кабели (связующие элементы, которые формируют сеть в инфраструктуре электроснабжения);
- токопроводы (обеспечивают конечный подвод энергии ее приемникам).

В процессе создания модели будущей системы электроснабжения требуется выполнение нескольких этапов, в числе которых разработка плана силовой электрики, трассировка, определение местоположения и параметров

оборудования. Современное проектирование систем электроснабжения включает следующие работы:

- создание плана размещения оборудования;
- составление схем питающих и распределительных сетей;
- подборка кабелей, расчетные работы относительно их параметров;
- создание кабельной отчетности;
- трассировка проводов;
- разработка спецификации;
- подготовка схемы расположения электропроводки и сопутствующего оборудования.

При выполнении большинства проектировочных операций специалисты должны определять электрические нагрузки и вести расчет электросети, которая будет служить для распределения электроэнергии между ее приемниками. Также берутся во внимание коэффициенты спроса и установленная мощность.

Ответственность систем, обеспечивающих питание энергоресурсами предприятий, обуславливает необходимость поддержания достаточных показателей их работоспособности. В связи с этим обслуживание снабжающих установок строится на следующих принципах:

- обеспечение бесперебойной работы генераторов, сетей и сопутствующих компонентов электроснабжения (надежность систем электроснабжения является одной из первостепенных оценок ее качества, как и ремонтпригодность с долговечностью);
- стабильность выполнения плана по выработке электроэнергии и последующего ее распределения с охватом требуемых максимумов по нагрузкам потребителей;
- сохранение качества энергии, поставляемой приемникам (она должна соответствовать запросам питающего электрооборудования по частоте и напряжению).

## 1. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

**Структура электроэнергетики как большой системы.** Отличительной особенностью электроэнергетики является неразрывность и практически полное совпадение во времени процессов производства, распределения и потребления электрической энергии. Производство электроэнергии возможно только в том случае, если предварительно обеспечено соединение генераторов энергии с ее приемниками в единую электрическую схему.

Традиционно электроэнергетика включает производство, передачу электрической энергии, оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике, сбыт и потребление электрической энергии с использованием производственных и иных имущественных объектов. Электроэнергетику как *большую открытую систему* следует рассматривать гораздо шире ([рис. 1.1](#)).



Рис. 1.1. Структурирование электроэнергетики как большой системы

В настоящее время производство электроэнергии целесообразно осуществлять на высокотехнологичных установках, соединенных между собой

и работающих в общей электрической сети. Такое административно-техническое образование называется электроэнергетической системой, которую при электроснабжении потребителей называют централизованным источником электроэнергии. В электроэнергетической системе, обслуживающей большие территории электрифицированной жизнедеятельности человека, невозможно обойтись без преобразования электрической энергии на разных уровнях напряжения для ее передачи на относительно большие расстояния. Это позволяет повысить предел передаваемой мощности и снизить потери электроэнергии в линиях электропередачи.

Зачастую в этих условиях доведение электроэнергии до электрических приемников возлагается на систему электроснабжения (СЭС), которая по определенным причинам находится в собственности потребителя.

В системе электроснабжения объектов можно выделить три вида электроустановок:

- по производству электрической энергии: электрические станции (на предприятиях со значительной тепловой нагрузкой);
- по передаче, преобразованию и распределению электроэнергии: электрические сети и подстанции;
- по потреблению электрической энергии в производственных и бытовых нуждах: приемники электрической энергии.

Приведенная взаимосвязанная сфера жизнедеятельности человека, направленная на производство электроэнергии в больших количествах, ее преобразование, передачу и распределение среди электрических приемников, называется электроэнергетикой. Ее структурная схема представлена на [рис. 1.2](#).

Таким образом, от электроэнергетической системы получают электроэнергию множество систем электроснабжения, преобразующих, передающих и распределяющих ее среди электроприемников разнообразных структур электрифицированной жизнедеятельности человека, таких как промышленные предприятия, сельское хозяйство, жилищно-коммунальное хозяйство, транспорт, нефтегазодобыча и т. д.

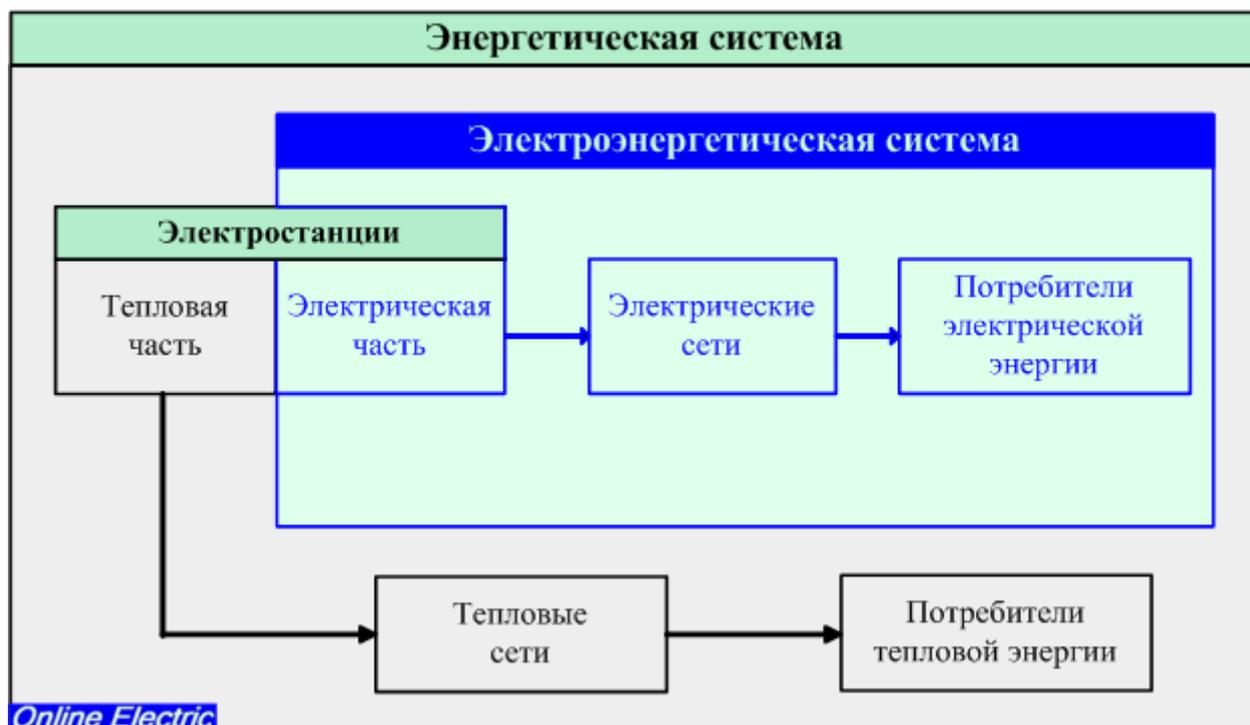


Рис. 1.2. Структурная схема электроэнергетической системы

В такой структуре электроэнергетики на электроэнергетическую систему возлагается задача обеспечения потенциальной способности производства электроэнергии тогда, когда это условие создаст потребитель.

Следовательно, в рассмотренных условиях систему электроснабжения можно определить как совокупность электротехнических устройств (трансформаторов, линий электропередачи, электрических аппаратов, сборных шин), предназначенных для преобразования, передачи и распределения электроэнергии среди электроприемников электрифицированной жизнедеятельности человека.

Иногда совокупность электротехнических устройств, относящихся к системе электроснабжения потребителя, называют системой внутреннего электроснабжения, а часть сети энергосистемы, обеспечивающую передачу электроэнергии к центру электрического питания системы электроснабжения от точки присоединения к электроэнергетической системе, – системой внешнего электроснабжения.

По способу использования системы электроснабжения относятся к непрерывно работающим. Это сложные динамичные системы, характеризующиеся многообразием внешних и внутренних связей.

Режимы производства, передачи и распределения электроэнергии в системах электроснабжения неразрывно связаны с режимами питающих энергосистем. Потребители задают режим нагрузок и формируют график нагрузки питающей энергосистемы. Энергосистема оказывает влияние на систему электроснабжения изменением располагаемой мощности источников питания, уровнями напряжения и частоты, величинами токов короткого замыкания, требованиями устойчивости и надежности.

Техническое и ремонтное обслуживание систем электроснабжения представляет комплекс работ, направленных на поддержание исправности или работоспособности оборудования и линий электропередачи. Оно в значительной степени определяет уровень эксплуатационной надежности электроснабжения [8].

**Инновационная деятельность в электроэнергетике.** Рост потребностей электрической энергии наблюдается практически во всех регионах РФ, что является необходимым условием для успешного технологического совершенствования. В Федеральном Законе № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» электроэнергетика признана основой функционирования экономики и жизнеобеспечения страны [18]. В настоящее время многие отрасли экономики России находятся в стадии реформирования. Такие энергопотребители, как объекты ЖКХ, промышленности, требуют новых подходов к бесперебойному и качественному обеспечению электрической энергией.

От состояния и перспектив развития электроэнергетики во многом зависит качество жизни населения и конкурентоспособность предприятий промышленного производства и сферы услуг. В современных условиях обеспечение технологической и экономической безопасности должно стать первоочередной задачей, поэтому важным этапом является активизация инновационной и инвестиционной деятельности в электроэнергетике (рис. 1.3) [9].



Рис. 1.3. Уровень инновационного развития электроэнергетики

Курс на инновационное развитие всех отраслей, включая электроэнергетику, намечен целым рядом нормативно-правовых документов федерального уровня. Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2030 года предполагает [22]:

- занятие существенной доли на рынках высокотехнологичных и интеллектуальных услуг;
- повышение в два раза доли высокотехнологичного сектора в ВВП;
- увеличение доли инновационной продукции в выпуске промышленности;
- увеличение доли инновационно-активных предприятий в 4–5 раз (с 9,4 до 40–50 %), что невозможно без соответствующего развития более совершенных источников энергии.

Стратегические приоритеты инновационного развития российской электроэнергетики могут быть определены следующим образом:

– *повышение качества энергоснабжения*, под которым будем понимать обеспечение всех групп потребителей, включая население, а также предприятия различных отраслей промышленности и сферы услуг, электрической энергией в необходимом объеме в любое время при условии соблюдения надежности, стабильности технических условий работы электрооборудования всех этапов технологического цикла энергоснабжения и энергопотребления;

– *повышение эффективности энергоснабжения*, под которым будем понимать достижение наилучшего сочетания использования всех видов ресурсов, технологий и оборудования при производстве, передаче, распределении и потреблении электроэнергии и полученного экономического, экологического и социального эффектов, а также оценки риска;

– *повышение экологичности энергоснабжения*, под которым будем понимать расширение использования возобновляемых ресурсов и снижение негативного воздействия на окружающую среду при производстве, передаче, распределении и потреблении электрической энергии.

В настоящее время Россия является участником большого количества международных проектов, направленных на повышение энергоэффективности. Это реализованные проекты:

– «Создание потенциала для устранения основных препятствий повышения энергоэффективности в жилых зданиях и теплоснабжении на территории РФ»;

– «Экономически эффективные энергосберегающие мероприятия в российском образовательном секторе».

Они стали основой для разработки комплексной программы, нацеленной на снижение затрат на выработку и использование ресурсов, повышение показателей финансовой самокупаемости и эффективности использования потенциала энергетического сектора. Одним из элементов этой программы,

реализуемым сегодня в России, является программа Организации Объединённых Наций по промышленному развитию (ЮНИДО) и Европейского банка реконструкции и развития по переходу к использованию инновационных технологий в отраслях с повышенным уровнем выбросов парниковых газов.

В сфере электроэнергетики существуют специфические особенности, обусловленные большой социальной значимостью отрасли, значительной степенью ее влияния на экологию территории, наличием определенного круга участников разработки и осуществления инновационных проектов и другими факторами.

#### **Контрольные вопросы**

1. Выделите три вида электроустановок в СЭС.
2. Приведите пример структурной схемы электроэнергетической системы.
3. Что понимают под системой внутреннего и внешнего электроснабжения?
4. В чем суть инновационной политики в электроэнергетике?

## 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

### 2.1. Основные понятия и определения

Электрическая энергия производится, передается и распределяется потребителям по специально созданным структурам, которые называются электрическими системами (электрическими сетями). Рассмотрим основные понятия, относящиеся к электрическим системам, и дадим определения установкам, которые их составляют.

Энергетическая система – совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической энергии и теплоты при общем управлении этим режимом.

Электроэнергетической системой называется совокупность электроустановок электрических станций и электрических сетей энергосистемы и питающихся от нее приёмников электрической энергии, объединённых общностью процесса производства, передачи, распределения и потребления электрической энергии.

Состояние электрической системы в некотором интервале времени называется режимом, который характеризуется определенными показателями – параметрами режима, изменяющимися при изменении режима. К параметрам режима относятся напряжения в точках электроэнергетической системы, токи, активные и реактивные мощности, протекающие по ее элементам.

Различают четыре вида режимов работы электрических систем:

– нормальный установившийся режим, при котором его параметры постоянны (в общем случае их отклонение от номинального значения незначительно);

– режим перегрузки, при котором его параметры значительно отличаются от номинальных, но не достигают критических значений;

– аварийный режим, при котором его параметры превышают критические значения;

– послеаварийный режим – это режим, при котором могут достигать критических значений.

Нормальный режим – это режим, при котором обеспечивается снабжение электроэнергией всех потребителей с поддержанием её качества в установленных пределах.

Электроснабжение – обеспечение потребителей электрической энергией.

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

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

Подстанция – это электроустановка, служащая для распределения и преобразования электроэнергии, состоящая 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 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 отдельному району.

Подстанции глубокого ввода размещаются на территории предприятия рядом с наиболее крупными объектами потребления электроэнергии и получают питание от энергосистемы, узловой распределительной подстанции, ГПП или ТЭЦ.

Электроустановками называется совокупность машин, аппаратов, линий и вспомогательного оборудования (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенных для производства, преобразования, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другой вид энергии.

Электроприемник как составляющая часть электрического хозяйства предприятия, организации, любого электрифицированного объекта представляет собой аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии. Это, например, электродвигатель, электрический источник света, нагревательный элемент.

Электрический приемник (ЭП) или группу электроприемников, объединенных технологическим процессом и размещенных на определенной территории, например станок, цех, предприятие, называют потребителем электрической энергии.

Электрической сетью называется совокупность электроустановок для передачи и распределения электроэнергии, состоящая из подстанций, линий электропередачи, токопроводов, аппаратуры присоединения, защиты и управления.

Под линией электропередачи понимается устройство, предназначенное для передачи и распределения или только для передачи электроэнергии на расстояние.

## 2.2. Особенности систем электроснабжения и основные требования к ним

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

Первая особенность – процессы производства, распределения и потребления электрической энергии полностью совпадают во времени и неразрывны, т. е. выполняется баланс:

$$P_{\Gamma} = P_{\text{пот}} + P_{\text{с.н}} + \Delta P,$$

$$Q_{\Gamma} = Q_{\text{пот}} + Q_{\text{с.н}} + \Delta Q,$$

где  $P_{\Gamma}$ ,  $Q_{\Gamma}$  – вырабатываемая источником питания активная и реактивная мощности;  $P_{\text{пот}}$ ,  $Q_{\text{пот}}$  – потребленная активная и реактивная мощности;  $P_{\text{с.н}}$ ,  $Q_{\text{с.н}}$  – потребленная активная и реактивная мощность на собственные нужды;  $\Delta P$ ,  $\Delta Q$  – 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, включениями и отключениями, изменениями электрической нагрузки, нарушениями устойчивости в энергосистеме.

Третья особенность – обеспечение электроэнергией всех отраслей промышленности, отличающихся технологией производства, способами преобразования электроэнергии в другие виды энергии, многообразием электрических приемников.

Особенности энергетики обуславливают особые требования к системе электроснабжения:

1) быстрота протекания переходных процессов требует обязательного применения специальных автоматических устройств, основное назначение

которых – передача электроэнергии от источника питания к месту потребления в необходимом количестве и соответствующего качества;

2) технологические особенности промышленных предприятий различных отраслей промышленности обуславливают различия в применении проектных решений по схеме электроснабжения;

3) высокая гибкость СЭС, так как современные промышленные предприятия характеризуются динамичностью технологического процесса, введением новых технологий.

При проектировании и эксплуатации современных систем электроснабжения должны обеспечиваться такие требования, как:

1) безопасность работ электротехнического и неэлектротехнического персонала;

2) надежность электроснабжения;

3) качество электроэнергии;

4) экономичность;

5) возможность модернизации процесса технологии производства и развития предприятия;

6) отсутствие вредного влияния на окружающую среду.

### **2.3. Напряжения электрических сетей и область их применения**

По уровню номинального напряжения электрические сети иногда делят на сети низкого (до 1 кВ), среднего (от 1 до 35 кВ включительно), высокого (110–220 кВ), сверхвысокого (330–750 кВ) и ультравысокого (выше 1000 кВ) напряжений. Напряжение приемников электроэнергии, генераторов и трансформаторов, при котором они нормально и наиболее экономично работают, называют номинальным. Это напряжение указывают в паспорте электрической машины или аппарата. В установках трехфазного тока номинальным принято считать значение междуфазного напряжения. Поэтому, если номи-

нальное напряжение линии 35 кВ, ее фазное напряжение будет в  $\sqrt{3}$  раз меньше, т. е. 20,2 кВ.

Номинальные напряжения электрических сетей и присоединяемых к ним источников и приемников электроэнергии устанавливаются ГОСТ 29322–92. «Стандартные напряжения».

Шкала номинальных напряжений для сетей переменного тока частотой 50 Гц:

- до 1000 В: 12, 24, 36, 42, 127, 220, 380;
- выше 1000 В: 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1150 кВ.

Для электрических сетей трехфазного переменного тока напряжением до 1000 В и присоединенных к ним источников и приемников электроэнергии ГОСТ 721–77 «Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В» устанавливает следующие значения номинальных напряжений:

- сети и приемники: 380/220 В, 660/380 В;
- источники: 400/230 В, 690/400 В.

Номинальное напряжение генераторов с целью компенсации потери напряжения в питаемой ими сети принимается на 5 % больше номинального напряжения этой сети. Номинальные напряжения первичных обмоток повышающих трансформаторов, присоединяемых к генераторам, приняты также на 5 % больше номинальных напряжений подключаемых к ним линий.

Первичные обмотки понижающих трансформаторов имеют номинальные напряжения, равные номинальным напряжениям питающих их линий.

Выбор стандартного напряжения определяет построение всей системы электроснабжения. Для внутрицеховых электрических сетей наиболее распространено напряжение 380/220 В, основным преимуществом которого является возможность совместного питания силовых и осветительных электроприемников. Наибольшая единичная мощность трехфазных электроприемников 380/220 В не должна превышать 200–250 кВт, при этом допускается при-

менение коммутирующей аппаратуры на ток до 630 А. Увеличение электрических нагрузок потребителей, их числа и единичной мощности привели к введению повышенного напряжения 660 В.

Использование класса напряжения 660 В целесообразно:

- На предприятиях, где, согласно планировке цехового оборудования, нет возможности приблизить цеховые ТП к электроприемникам. Это имеет место в угольных шахтах, в карьерах, в нефтедобывающей и химической промышленности. Поскольку расстояние до электрических приемников увеличивается, увеличиваются и потери электрической энергии в питающих линиях. Для снижения этих потерь электроэнергии применяют повышенное напряжение распределительной сети 660 В.

- На предприятиях с высокой удельной плотностью электрических нагрузок и большим числом электродвигателей в диапазоне мощностей 200–600 кВт.

К достоинству применения класса напряжения 660 В можно отнести:

- 1) увеличение радиуса действия цеховых трансформаторных подстанций примерно в два раза;

- 2) повышение единичной мощности трансформаторов, сокращение числа цеховых ТП, линий и аппаратов напряжением выше 1000 В;

- 3) снижение в два раза расхода цветных металлов;

- 4) увеличение пропускной способности сети 660/380 В в  $\sqrt{3}$  раз.

К недостаткам использования класса напряжения 660 В можно отнести:

- 1) необходимость отдельного питания силовых и осветительных электроприемников;

- 2) повышенную степень опасности поражения электрическим током.

Напряжения до 42 В (24 или 36 В) применяются в помещениях с повышенной опасностью для стационарного местного освещения и ручных переносных ламп.

Напряжение 12 В применяется только при особо неблагоприятных условиях в отношении опасности поражения электрическим током. Напри-

мер, при работе в котлах или других металлических резервуарах, для питания ручных переносных светильников.

В зависимости от установленной мощности промышленные предприятия подразделяются на 3 вида:

- малой мощности (1–5 МВт);
- средней мощности (5–75 МВт);
- большой мощности (более 75 МВт).

Напряжения 6 и 10 кВ используются для питания предприятия малой мощности и во внутризаводских распределительных сетях. Напряжение 10 кВ является предпочтительным. Напряжение 6 кВ целесообразно тогда, когда нагрузки и ТП предприятия получают питание от шин генераторов собственной ТЭЦ или при наличии значительного числа электроприемников на номинальное напряжение 6 кВ.

Напряжение 35 кВ используется при создании центров питания предприятий средней мощности, если 1) распределительные сети выполняются на напряжение 6–10 кВ; 2) для электроснабжения крупных предприятий при расстоянии до электроприемников до 20 км; 3) в схемах глубокого ввода.

Напряжение 110 кВ используется в качестве питающего напряжения на предприятиях средней мощности и в качестве распределительного по схеме глубокого ввода на крупных предприятиях.

Напряжение 220 кВ применяется для питания крупных энергоемких предприятий от трансформаторных подстанций районных энергосистем и для распределения электрической энергии на уровнях (ступенях) схемы электроснабжения.

## **2.4. Режимы нейтрали электрических сетей**

Производство, преобразование, транспортировка, распределение и потребление электрической энергии осуществляется по симметричной трехфазной системе проводов. Симметричность системы достигается равенством

фазных и линейных напряжений, равномерной загрузкой всех фаз по току, одинаковым сдвигом фаз напряжений и токов.

Однако в процессе эксплуатации неизбежны нарушения симметрии трехфазной системы, которые могут быть вызваны: обрывом провода, пробоем изоляции, перекрытием на посторонние предметы, непереключением фаз коммутационных аппаратов и пр.

В любом случае несимметрия ведет к появлению токов обратной и нулевой последовательности, а также апериодической составляющей токов, которые могут быть опасны для сохранности оборудования. Поэтому несимметрия должна быть устранена как можно быстрее. На быстрдействие релейной защиты при неполнофазных режимах значительное влияние имеет режим работы нейтрали сети.

В зависимости от режима нейтрали электрические сети разделяют на четыре группы [12]:

- с незаземленными (изолированными) нейтральями;
- с резонансно заземленными (компенсированными) нейтральями;
- с эффективно заземленными нейтральями;
- с глухозаземленными нейтральями.

Выбор способа заземления нейтрали определяется безопасностью обслуживания сети, надежностью электроснабжения и экономичностью. При повреждениях фазной изоляции способ заземления нейтрали оказывает большое влияние на ток замыкания на землю и определяет требования в отношении заземляющих устройств электроустановок и релейной защиты от замыканий на землю.

В России к первой и второй группам относятся сети напряжением 3–35 кВ, нейтрали трансформаторов или генераторов которых изолированы от земли или заземлены через заземляющие реакторы.

Сети с эффективно-заземленными нейтральями применяют на напряжение выше 1 кВ. В них коэффициент замыкания на землю не превышает 1,4. Коэффициентом замыкания на землю называют отношение разности потенциалов

между неповрежденной фазой и землей в точке замыкания на землю поврежденной фазы к разности потенциалов между фазой и землей в этой точке до замыкания. В соответствии с рекомендациями Международного электротехнического комитета (МЭК) к эффективно заземленным сетям относят сети высокого и сверхвысокого напряжения, нейтрали которых соединены с землей непосредственно или через небольшое активное сопротивление.

К четвертой группе относятся сети напряжением 220, 380 и 660 В.

Режим работы нейтрали определяет ток замыкания на землю. Сети, в которых ток однофазного замыкания на землю менее 500 А, называют сетями с малыми токами замыкания на землю (в основном это сети с незаземленными и резонансно заземленными нейтралью). Токи более 500 А соответствуют сетям с большими токами замыкания на землю (это сети с эффективно заземленными нейтралью).

При напряжении до 1000 В получили распространение в нашей стране две схемы трехфазных сетей: четырехпроводная с глухозаземленной нейтралью и трехпроводная с изолированной нейтралью. Схема трехфазной четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью представлена на [рис. 2.1](#), а трехпроводная сеть с изолированной нейтралью – на [рис. 2.2](#).

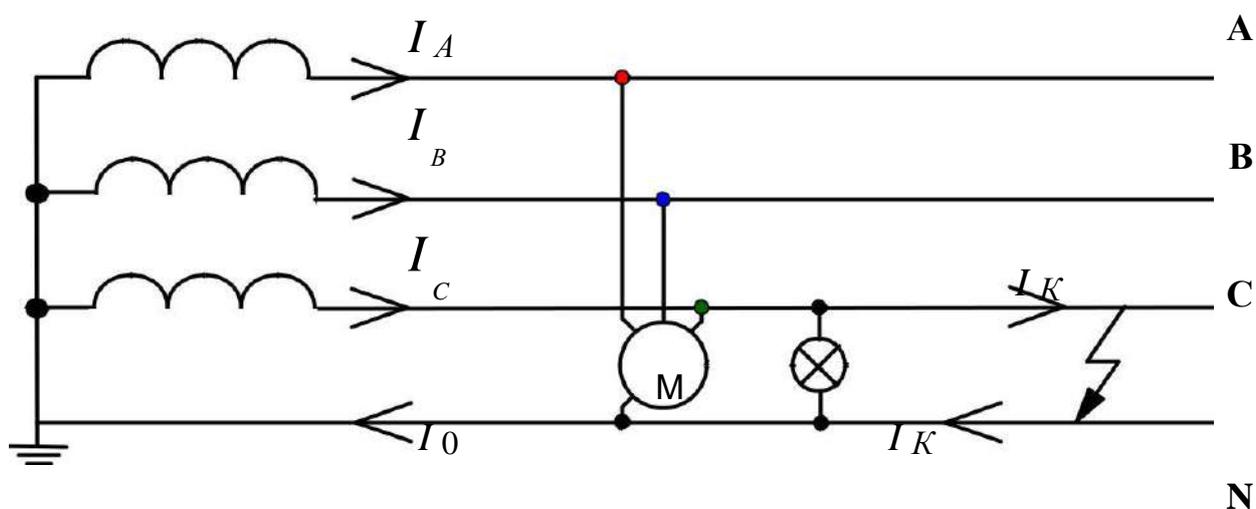


Рис. 2.1. Трехфазная четырехпроводная сеть напряжением 380/220 В с глухозаземленной нейтралью при КЗ одной фазы на землю

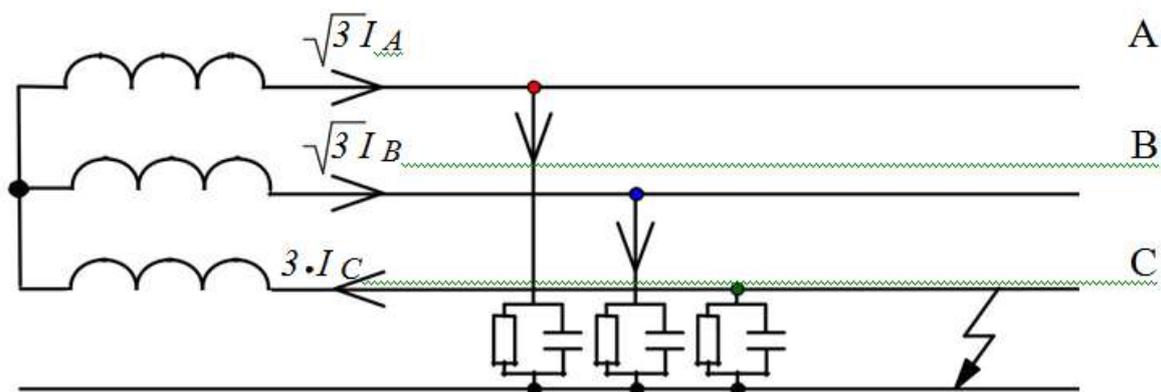


Рис. 2.2. Трехпроводная сеть с изолированной нейтралью

*По технологическим требованиям предпочтение* отдается четырехпроводной сети, поскольку она позволяет использовать два рабочих напряжения – линейное и фазное. Например, от четырехпроводной сети 380 В можно питать как силовую нагрузку (однофазную, включая ее между фазными проводами на линейное напряжение 380 В, или трехфазную), так и осветительную, включая ее между фазным и нулевым проводами, т. е. на фазное напряжение 220 В. При этом достигается значительное удешевление электроустановки в целом благодаря применению меньшего числа трансформаторов, меньшего сечения проводов и т. п.

По условиям безопасности выбор одной из двух схем производится с учетом выводов, полученных при рассмотрении этих сетей, а именно:

- в период нормального режима работы сети по условиям прикосновения к фазному проводу более безопасна, как правило, сеть с изолированной нейтралью;
- в аварийный период – сеть с глухозаземленной нейтралью.

Поэтому по условиям безопасности сети с изолированной нейтралью целесообразно применять на объектах с повышенной опасностью поражения током и в тех случаях, когда имеется возможность поддерживать высокий уровень изоляции проводов сети относительно земли и емкость проводов относительно земли незначительна. Такими являются сравнительно короткие

сети, не подверженные воздействию агрессивной среды и находящиеся под постоянным надзором электротехнического персонала.

ПУЭ рекомендуют использовать трехфазные трехпроводные сети с изолированной нейтралью при повышенных требованиях безопасности (для передвижных установок, торфяных разработок, шахт и т. п.).

Сети с глухозаземленной нейтралью (четырёхпроводные) следует применять там, где невозможно обеспечить хорошую изоляцию проводов (из-за высокой влажности, агрессивной среды, большой протяженности и т. п.), когда нельзя быстро отыскать или устранить повреждение изоляции или когда емкостные токи замыкания на землю достигают больших значений, опасных для человека. Примером таких сетей могут служить сети крупных промышленных предприятий, городские и сельские сети, сети собственного расхода электростанций и т. п.

При напряжении выше 1 кВ технологические требования к выбору режима нейтрали обусловлены рядом обстоятельств, в том числе влиянием режима нейтрали на характер и уровень внутренних перенапряжений.

В соответствии с этим и с учетом других обстоятельств ПУЭ предписывают для трехфазных сетей напряжением 110 кВ и выше эффективное заземление нейтрали, т. е. заземление через малое сопротивление. Путем присоединения к заземлителю непосредственно (наглухо) или через реакторы с небольшим индуктивным сопротивлением, при котором в случае замыкания одной или двух фаз на землю напряжения неповрежденных фаз относительно земли в месте замыкания не превышают  $1,4U_{\phi}$ .

Для сетей напряжением от 1 кВ до 35 кВ включительно установлен режим работы с изолированной нейтралью, т. е. с нейтралью, не присоединенной к заземляющему устройству или присоединенной к нему через приборы сигнализации, измерения, защиты, заземляющие дугогасящие реакторы и подобные им устройства, обладающие большим сопротивлением.

По условиям безопасности в сетях напряжением выше 1кВ заземленная нейтраль также предпочтительнее, несмотря на то что в таких сетях

вследствие большой емкости проводов относительно земли защитная роль их изоляции полностью утрачивается и для человека одинаково опасно прикосновение к проводу сети как с изолированной, так и с заземленной нейтралью.

В сетях выше 1 кВ с изолированной нейтралью при дуговых замыканиях фазы на землю вокруг места замыкания могут возникать и длительно существовать высокие потенциалы и разности потенциалов, т. е. большие напряжения прикосновения и шага, опасные для людей. В случае же заземленной нейтрали произойдет быстрое срабатывание релейной защиты на отключение поврежденного участка и тем самым будет устранена возникшая опасность.

В целях уменьшения опасности, возникшей при замыкании фазы на землю, действующие ПУЭ требуют предусматривать в сетях выше 1 кВ с изолированной нейтралью возможность быстрого отыскания замыканий на землю.

## 2.5. Виды заземления нейтрали в сетях до 1 кВ

В электрических сетях напряжением до 1000 В принято использовать три системы заземления нейтрали: TN, IT, TT. Каждая из букв несет определенный смысл:

- 1-я буква описывает способ заземления нейтрали источника питания (Т (terra) – нейтраль глухозаземленная; I (isolate) – нейтраль изолирована);
- 2-я буква показывает способ заземления открытых проводящих частей (ОПЧ) с землей (N (neutral) – ОПЧ заземлены через глухозаземленную нейтраль источника питания; Т – ОПЧ заземлены независимо от источника питания).

В свою очередь система TN делится на три подсистемы: TN-C, TN-S и TN-C-S. В рамках данной подсистемы третьи буквы (С – combine, S – separate) обозначают совмещение или разделение в одном проводе функций нулевого защитного (PE) и нулевого рабочего (N) проводника.

Система заземления TN представлена на [рис. 2.3](#).

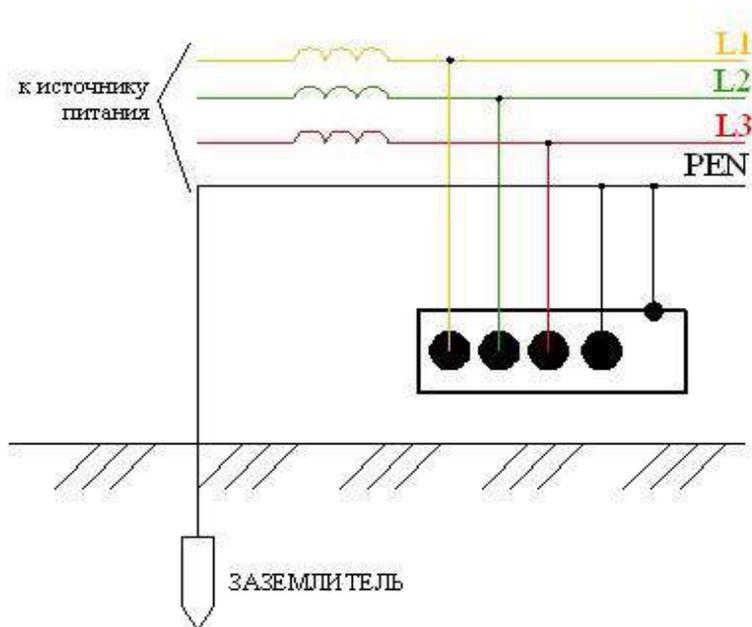


Рис. 2.3. Система заземления TN

В этой системе нейтраль источника глухо заземлена, ОПЧ электроустановки подключены к глухозаземленной нейтрали источника питания. Глухозаземленная – это значит, что нейтраль к заземляющему устройству присоединена непосредственно болтом, сваркой или через малое сопротивление (трансформатор тока). Согласно ПУЭ, такое подключение называется защитным занулением.

В сетях до 1 кВ глухозаземленная нейтраль используется для питания однофазных и трехфазных нагрузок.

Система заземления TT представлена на [рис. 2.4](#).

Система TT предполагает, что нейтраль источника питания глухо заземлена, а ОПЧ оборудования заземлены заземляющим устройством, электрически не связанным с нейтралью источника. То есть защитный РЕ-проводник создается у самого потребителя, а не идет от источника питания.

Система заземления IT представлена на [рис. 2.5](#).

В системе IT нейтраль генератора или трансформатора изолирована или заземлена через устройства, имеющие высокое сопротивление, а ОПЧ заземлены независимо. Эта система не рекомендуется для жилых зданий, исполь-

зается там, где при первом замыкании на землю не требуется перерыв питания. Это могут быть электроустановки с повышенными требованиями надежности снабжения электроэнергией.

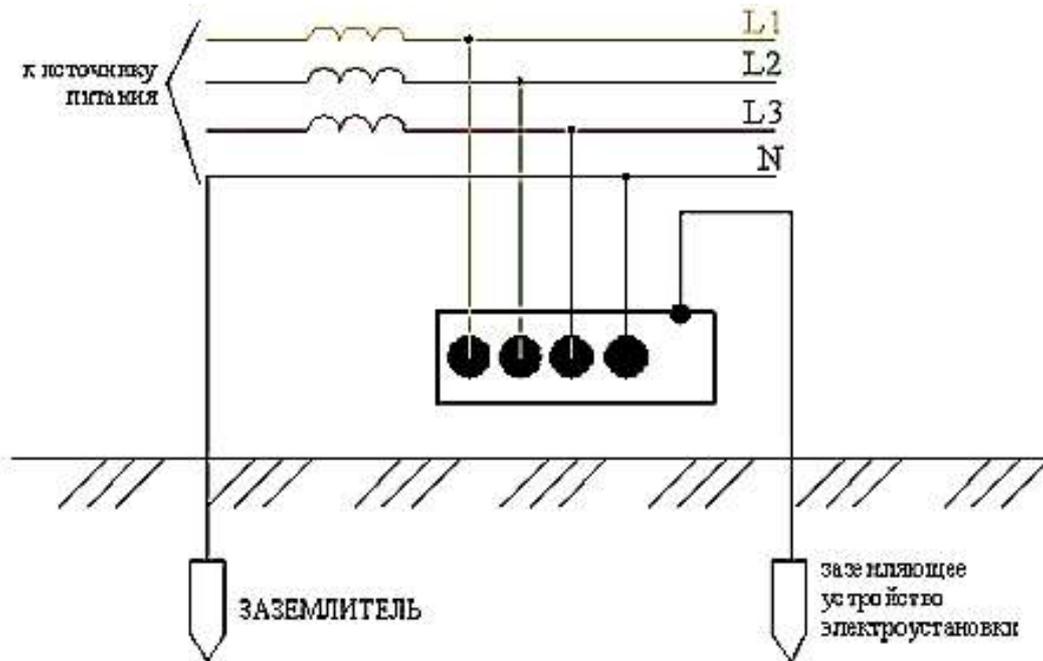


Рис. 2.4. Система заземления ТТ

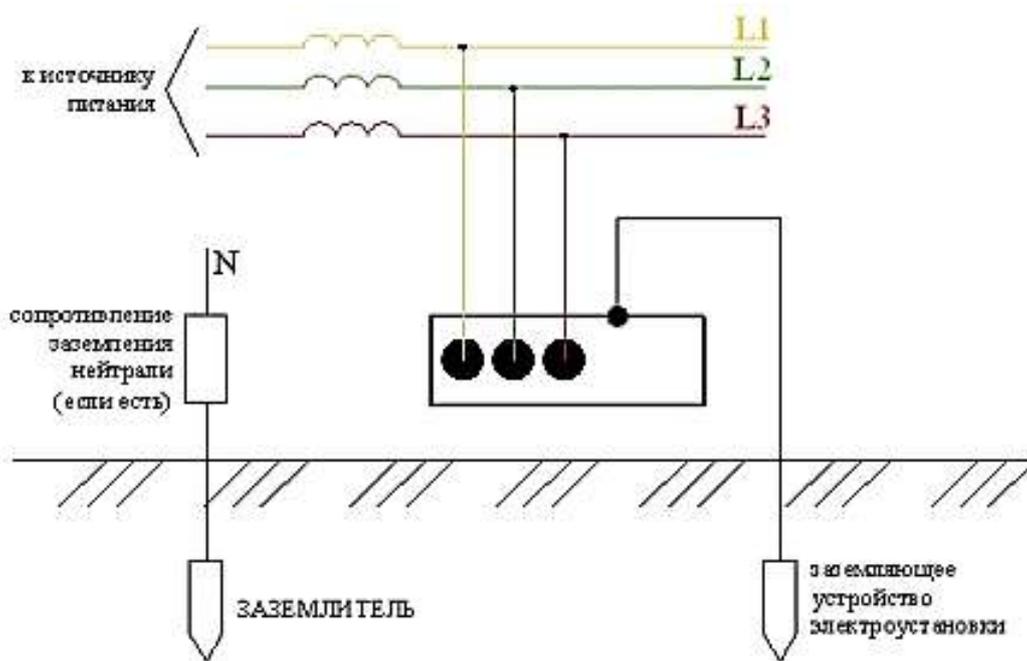


Рис. 2.5. Система заземления IT

Отличия систем заземления TN, IT, TT представлены в [табл. 2.1](#).

Таблица 2.1

Основные отличия систем заземления TN, IT, TT

Характеристика сети	Системы заземления				
	TN			TT	IT
	TN-C	TN-C-S	TN-S		
Вид нейтрали ИП	Глухозаземленная				Изолированная
Нулевые проводники в сети: распределительной электроустановки электроприемники	PEN PEN N и PE	PEN N и PE N и PE	N и PE N и PE N и PE	N N и PE N и PE	– PE PE
Электрическая связь ОПЧ с заземленной нейтралью ИП	Через PEN и PE-проводники		Через PE-проводник	Отсутствует	Отсутствует
Область и условия применения	ЭУ, доступные только для квалифицированного персонала, уличное освещение	ЭУ жилых, общественных и промышленных зданий		Если система TN не обеспечивает условия электробезопасности	При недопустимости перерыва питания при первом замыкании на землю

Источником питания в низковольтной сети переменного тока служит вторичная обмотка силового трансформатора. Источник питания и линии электропередачи, связывающие источник питания с электроустановкой, образуют распределительную сеть.

Число проводников в распределительной сети с нераспределенным нейтральным проводником:

- в системе TN-S четыре: L1, L2, L3 и PE;
- в системе IT, TT три: L1, L2, L3.

Всегда прокладывается четыре провода L1, L2, L3 и PE – в системе TN-C по всей сети, кроме цепей подключения электрических приемников, и в системе TN-C-S – в распределительной сети до точки разделения проводников.

## 2.6. Классификация помещений и наружных установок по окружающей среде

Если окружающая среда в производственных помещениях не оказывает вредного влияния на электросети, то такие помещения называют нормаль-

ными. Это сухие, отапливаемые и неотапливаемые помещения, не опасные по коррозии, пожару и взрыву [19].

Сюда относятся бытовые помещения цехов, производственные помещения цехов холодной обработки металлов, сборочные, инструментальные и др.

Помещения с наружной средой, разрушающе действующей на материал проводников и изоляции вследствие присутствия пыли, сырости, газов, паров кислот и щелочей, относятся к группе помещений, **опасных по коррозии**.

К таким помещениям относятся: коксохимические, доменные, мартеновские, литейные, травильные, шлифовальные, обогатительные, сернокислотные, электролизные цеха и т. д.

**Пожароопасные и взрывоопасные** – это помещения с такой средой, в которой сама электросеть или электрооборудование представляют опасность вследствие возможного пожара или взрыва из-за перегрева проводки или образования искр. Сюда относятся помещения, в которых имеются пары бензина или керосина, водород, древесная или мучная пыль и др. горючие вещества.

Могут быть помещения со средой, опасной в отношении коррозии и одновременно опасной по пожару или взрыву. Например, если в помещении имеются пары бензина, то они разрушают резиновую изоляцию, а при искрообразовании приводят к взрыву.

Классификация помещений с точки зрения опасности по пожару и взрыву в зависимости от характера производства приводится в «Строительных правилах и нормах», где установлены шесть категорий производств. Из них категории А и Б являются взрывопожароопасными, причем А более опасная; категория В – пожароопасная; категории Д и Г – неопасные по пожару и взрыву; Е – взрывоопасная, но взрыв не сопровождается пожаром.

К пожароопасным относятся помещения и наружные установки, в которых применяются или хранятся горючие вещества, не вызывающие взрыва при воспламенении. Они разделяются на 4 класса:

1) П-I – применяются или хранятся горючие жидкости с  $t_{всп} > 45\text{ °C}$  (склады масел, масляные производства и т. д.);

2) П-II – помещения, в которых выделяются горючие пыль или волокна, переходящие во взвешенное состояние (деревообделочные цеха, склад серы);

3) П-IIа – помещения для твердых или волокнистых веществ, не переходящих во взвешенное состояние (склад деревянных изделий, склад тканей и т. д.);

4) П-III – наружные установки, в которых применяются или хранятся горючие вещества (открытый склад минеральных масел, угля, дерева и т. д.)

Взрывоопасные помещения и наружные установки – это такие помещения, в которых по условиям технологического процесса могут образовываться взрывоопасные смеси горючих газов или паров, воспламенение которых сопровождается взрывом. Сюда же относятся подземные выработки угольных шахт, опасные, кроме того, по газу и пыли.

Различают две категории взрывоопасных помещений:

1) В-I – помещения с взрывоопасными газами;

2) В-II – с взрывоопасной пылью или волокнами;

Классы взрывоопасных помещений различаются также по степени вероятности появления опасности взрыва, что отмечается буквами «а», «б» и «г». (В-Iа, В-IIб).

Наиболее опасными являются помещения В-I, где появление взрывоопасных смесей может иметь место не только в аварийных, но и в нормальных режимах. В-Iа менее опасны, появление взрывоопасных смесей возможно лишь в результате аварий или неисправностей.

Общая классификация сред и помещений приведена в [табл. 2.2](#).

Таблица 2.2

Общая классификация сред и помещений

Класс среды или помещения	Окружающая температура	Относительн. влажность, %	Особенности, характеризующие класс среды или помещения
Нормальная	Длительно не более +30 °С	Не нормирована	Отсутствует технологическая пыль, газы или пары, способные нарушать нормальную работу оборудования
Жаркая	Длительно более +30 °С, но менее +55 °С	Не более 60	То же

Класс среды или помещения	Окружающая температура	Относительн. влажность, %	Особенности, характеризующие класс среды или помещения
Влажная	То же	60–75	То же, что и в помещениях с сухой средой, но имеются пары воды, способные конденсироваться в редких случаях при резких и глубоких понижениях температуры
Сырая	То же	Более 75, но менее 100	То же, что и в помещениях с влажной средой, но имеются пары воды, способные конденсироваться при небольших понижениях температуры
Особо сырая	То же	100	Температура, уровень запыленности и загазованности соответствуют условиям нормальной среды, но постоянно конденсируются пары воды (стены, пол, потолок покрыты влагой)
Пыльная	То же	Не нормирована	Имеется технологическая пыль, оседающая на проводах и оборудовании, способная проникать в машины и аппараты
Химически активная	То же	То же	Постоянно или длительное время содержатся активные газы, пары или вещество, разрушающие электроустановку, препятствующие нормальной работе
Пожароопасная	Не нормирована	То же	Применяются или хранятся горючие вещества
Взрывоопасная	То же	То же	По условиям технологии могут образовываться взрывоопасные смеси

### Контрольные вопросы

1. Что называют приемником и потребителем электроэнергии?
2. Перечислите основные требования к системам электроснабжения.
3. Дайте классификацию электрических сетей по уровню номинального напряжения.
4. Опишите трехфазную четырехпроводную сеть напряжением 380/220 В с глухозаземленной нейтралью при КЗ одной фазы на землю.
5. Опишите трехпроводную сеть с изолированной нейтралью.
6. Перечислите системы заземления нейтрали.
7. Дайте расшифровку обозначений систем заземления.
8. Укажите основные отличия систем заземления TN, IT, TT.
9. Перечислите помещения согласно классификации помещений по окружающей среде.
10. Приведите общую классификацию сред и помещений по окружающей среде.

### 3. ПРИЕМНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

#### 3.1. Классификация электроприемников

Электроприемники систематизируются по следующим основным признакам [7]:

- мощности и напряжению;
- роду тока;
- режимам работы;
- надежности электроснабжения.

*По мощности и напряжению* все потребители электроэнергии можно разделить на две группы:

- потребители большой мощности (80–100 кВт и выше), получающие питание от сети 3–10 кВ. К этой группе относятся мощные печи для плавки черных и цветных металлов, питаемые через собственные трансформаторы;
- потребители малой и средней мощности (ниже 80–100 кВт), питание которых возможно и экономически целесообразно только на напряжение 380–660 В.

*По роду тока* все потребители электроэнергии можно разделить на три группы:

- работающие от сети переменного тока нормальной промышленной частоты (50 Гц);
- работающие от сети переменного тока повышенной или пониженной частоты;
- работающие от сети постоянного тока.

При классификации по режимам работы необходимо учитывать технологическое назначение. Приемники электроэнергии группируют в зависимости от вида энергии, в который данный приемник преобразует электрическую

энергию: электродвигатели приводов и механизмов; электротермические установки; электрохимические установки; установки электроосвещения; установки электростатического и электромагнитного поля, электрофильтры; устройства искровой обработки, устройства контроля и испытания изделий (рентгеновские аппараты, установки ультразвука и т. д.).

**По режимам работы** все потребители электроэнергии можно распределить на ряд групп, для которых предусматриваются три режима работы:

1) *продолжительный*, при котором электрические машины могут работать длительное время, причем превышение температуры отдельных частей машины не выходит за пределы, устанавливаемые стандартом;

2) *кратковременный*, при котором рабочий период не настолько длителен, чтобы температуры отдельных частей машины могли достигнуть установившегося значения, период же останова машины настолько длителен, что машина успевает охладиться до температуры окружающей среды;

3) *повторно-кратковременный*, при котором рабочие периоды чередуются с периодами пауз, а длительность всего цикла не превышает 10 мин. При этом нагрев не превосходит допустимого, а охлаждение не достигает температуры окружающей среды.

В отношении **обеспечения надежности электроснабжения** электроприемники разделяются на следующие три категории:

1. *Электроприемники первой категории* – электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой: опасность для жизни людей, угрозу для безопасности государства, значительный материальный ущерб, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства, объектов связи и телевидения.

Из состава электроприемников первой категории выделяется *особая группа* электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов и пожаров.

2. *Электроприемники второй категории* – электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к массовому недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей.

3. *Электроприемники третьей категории* – все остальные электроприемники, не подпадающие под определения первой и второй категорий.

Электроприемники первой категории в нормальных режимах должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, и перерыв их электроснабжения при нарушении электроснабжения от одного из источников питания может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания.

Для электроснабжения особой группы электроприемников первой категории должно предусматриваться дополнительное питание от третьего независимого взаимно резервирующего источника питания.

В качестве третьего независимого источника питания для особой группы электроприемников и в качестве второго независимого источника питания для остальных электроприемников первой категории могут быть использованы местные электростанции, электростанции энергосистем (в частности, шины генераторного напряжения), предназначенные для этих целей агрегаты бесперебойного питания, аккумуляторные батареи и т. п.

Если резервированием электроснабжения нельзя обеспечить непрерывность технологического процесса или если резервирование электроснабжения экономически нецелесообразно, должно быть осуществлено технологическое резервирование, например путем установки взаимно резервирующих технологических агрегатов, специальных устройств безаварийного останова технологического процесса, действующих при нарушении электроснабжения.

Электроснабжение электроприемников первой категории с особо сложным непрерывным технологическим процессом, требующим длительного времени на восстановление нормального режима, при наличии технико-экономических

обоснований рекомендуется осуществлять от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, к которым предъявляются дополнительные требования, определяемые особенностями технологического процесса.

Электроприемники второй категории в нормальных режимах должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания.

Для электроприемников второй категории при нарушении электроснабжения от одного из источников питания допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания действиями дежурного персонала или выездной оперативной бригады.

Для электроприемников третьей категории электроснабжение может выполняться от одного источника питания при условии, что перерывы электроснабжения, необходимые для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, не превышают 1 суток.

### **3.2. Электротехнологические и осветительные установки**

Электротермия, электросварка, электролиз, электроосвещение и прочие потребители составляют около 1/3 суммарной промышленной нагрузки.

*Область применения:*

- 1) нагрев металла под термообработку и пластическую деформацию, плавка металлов, сушка, нагрев в вакууме и контролируемой атмосфере;
- 2) плавка черных и цветных металлов, вакуумная, дуговая и плазменная плавки, плазменная плавка и напыление, плазменный нагрев газов и получение качественных отливок;
- 3) получение ферросплавов, карбида кальция, чугуна, фосфора, абразивов, медно-никелевого штейна и ряда цветных металлов;
- 4) плавка черных и цветных металлов, нагрев металлов под термообработку, пластическую деформацию, повторная закалка, зонная плавка, безэлектродный разряд;

5) нагрев диэлектрика и пластмасс под полимеризацию металлов, стерилизация продуктов, приготовление пищи;

б) плавка в вакууме высокореакционных цветных и черных металлов.

*Нагрев металла осуществляется:*

1) сопротивлением;

2) электрической дугой;

3) электрической дугой и сопротивлением;

4) преимущественно в переменном магнитном поле;

5) преимущественно в переменном электрическом поле;

б) электронным пучком.

В соответствии с этой классификацией имеются следующие виды электротехнологических установок (ЭТУ):

*Электротермические приемники* – дуговые электропечи для плавки черных и цветных металлов, установки индукционного нагрева для плавки и термообработки металлов, электрические печи сопротивления и электросварочные установки.

*Дуговые электрические печи* – мощные электроприемники низкого нестандартного напряжения 110–750 В, подключаемые через специальные печные трансформаторы к источникам переменного тока 6–35 кВ, а также к шинам 110, 154 кВ. Номинальная мощность от 0,4 МВ·А (печи 0,5 т) до 125 МВ·А (220 т) с перспективой до 250 МВ·А (360 т). Их большая мощность и резкопеременный характер нагрузки оказывают большое влияние на работу всей системы электроснабжения.

*Печи сопротивления* в основном имеют мощность до 2000 кВт и питаются от сети 380 В, коэффициент мощности близок к 1,0. Они бывают трехфазные и однофазные. В однофазном исполнении, если не приняты специальные меры, они могут быть причиной недопустимой несимметрии в системе электроснабжения.

*Электронные плавильные печи, вакуумные печи и печи шлакового переплава* применяют для выплавки металлов самой высокой чистоты.

Их мощность того же порядка, что и печей сопротивления. Они относятся к электроприемникам повышенной категории по надежности электроснабжения.

*Индукционные плавильные печи* бывают промышленной частоты 50 Гц, повышенной частоты 500–10 000 Гц и высокой частоты  $10^5$ – $10^8$  Гц. Они представляют собой трехфазную нагрузку, мало изменяющуюся в процессе плавки. Печи повышенной частоты питаются от вентильных преобразователей, а печи высокой частоты от ламповых генераторов. Индукционные печи имеют низкий коэффициент мощности 0,1–0,5.

*Электросварочные установки* делятся на установки дуговой и контактной сварки, а также на ручные и автоматические. Сварочные агрегаты постоянного тока питаются от вентильных установок, преобразующих трехфазный ток 380/220 В в постоянный с напряжением 30–32 В. Установки переменного тока работают на частоте 50 Гц, напряжением 380/220 В. Это однофазные нагрузки в виде сварочных трансформаторов для дуговой сварки и сварочных аппаратов для контактной сварки. Сварка на переменном токе создает однофазную нагрузку с повторно-кратковременным режимом работы, неравномерной нагрузкой фаз и низким коэффициентом мощности 0,30–0,45 для дуговой и 0,4–0,7 для контактной сварки.

*Электрохимические и электролизные установки* (электролитические ванны, установки электрохимических процессов в газе, ванны для гальванических покрытий) работают на постоянном токе. Электролитический процесс требует постоянства выпрямленного тока. Коэффициент мощности установок 0,8–0,9. Электроснабжение электролизных установок осуществляется обязательно от двух источников питания. Мощность одной электролизной установки достигает 100–130 МВт.

*Установки электростатического поля* служат для создания направленного движения капель при электрической покраске, для улавливания твердых взвешенных частиц в газе с помощью электрофильтров (очистка дымовых газов), для разделения смесей жидкости и газа. Установки электрополя

питаются от сети 0,4 кВ, но внутри установки напряжение повышается до 100 кВ. Мощность установки составляет сотни киловатт.

**Преобразовательные установки** делятся на полупроводниковые, с двигателями-генераторами и машинными преобразователями. Служат для преобразования трехфазного переменного тока 50 Гц в постоянный или переменный ток иной частоты. Преобразователи служат для питания двигателей машин постоянного тока, станций для зарядки аккумуляторов, сварочных установок постоянного тока, ручного электроинструмента и других. Коэффициент мощности преобразователей 0,7–0,8. Нагрузка на стороне переменного тока симметричная и переменная.

**Ручной электроинструмент** – номинальная мощность 0,27–1,60 кВт, отличается высоким коэффициентом полезного действия.

**Установки электроосвещения** представляют собой однофазную электрическую нагрузку. При правильной группировке она равномерна по фазам (с несимметрией до 10 %). Характер нагрузки изменяется в зависимости от времени суток, года и географического положения объекта. Частота 50 Гц, напряжение 12–220 В. Коэффициент мощности для ламп накаливания 1, для газоразрядных ламп 0,6.

**Источники света** характеризуются номинальным напряжением (В); номинальной мощностью (Вт); световым потоком (лм), световой отдачей (лм/Вт), т. е. отношением излучаемого лампой светового потока к мощности потребления; средним сроком службы лампы (ч), цветопередачей.

В настоящее время выпускаются три вида источников света: тепловые, газоразрядные и полупроводниковые.

К *тепловым источникам света* относятся лампы накаливания (ЛН) и галогенные лампы накаливания (ГЛН).

К *газоразрядным* относятся разрядные лампы низкого (РЛНД) и высокого (РЛВД) давления. Все виды люминесцентных ламп (ЛЛ) являются разрядными лампами низкого давления. Группу РЛВД представляют:

– дуговые ртутные лампы с исправленной цветностью (ДРЛ и аналоги);

– металлогалогенные (дуговые ртутные с излучающими добавками (ДРИ и аналоги);

– натриевые высокого давления (ДНаТ и аналоги);

– безэлектродные лампы.

К *полупроводниковым* ИС относят светодиоды (СД).

Освещение – это получение, распределение и использование световой энергии для обеспечения нормальных условий работы.

К *количественным показателям освещения* относят:

1. Световой поток – это часть лучистого потока, воспринимаемая зрением как свет. Обычно обозначается  $\Phi$ ; измеряется в *люменах* (лм).

2. Сила света – это пространственная плотность светового потока:

$$I = \frac{d\Phi}{dw},$$

где  $d\Phi$  – световой поток;  $dw$  – элементарный телесный угол.

За единицу силы света принята кандела: 1 кд = 1 лм/ср. За единицу телесного угла принят стерадиан (ср).

3. Освещенность – это отношение светового потока к площади, люкс (лк):

$$E = \frac{d\Phi}{dS},$$

где  $dS$  – площадь элементарной поверхности.

4. Яркость – это отношение силы света к площади с учетом угла падения, кд/м<sup>2</sup>

$$L_a = \frac{I_a}{S \cos \alpha},$$

где  $\cos \alpha$  – проекция плоскости  $S$  на поверхность.

К *качественным показателям освещения* относят *коэффициент пульсации, фон, контраст, видимость объекта*.

Коэффициент пульсаций характеризует амплитуду колебаний освещенности вследствие изменения во времени светового потока:

$$K_{\text{п}} = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{cp}}} 100,$$

где  $E_{\text{max}}$ ,  $E_{\text{min}}$  – соответственно максимальная и минимальная освещенность за период ее колебания;  $E_{\text{cp}}$  – среднее значение освещенности за этот же период.

Величина  $K_{\text{п}}$  для газоразрядных ламп составляет 25–65 %, для ламп накаливания около 7 %, для галогенных ламп примерно 1 %.

Фон характеризует способность поверхности отражать падающий на нее световой поток.

Контраст объекта с фоном – это степень различения объекта на фоне. Он характеризуется соотношением яркостей объекта, который надо различать при работе  $B_{\text{o}}$  и фона  $B_{\text{ф}}$ :

$$K = \frac{(B_{\text{ф}} - B_{\text{o}})}{B_{\text{ф}}}.$$

Видимость характеризует способность глаза воспринимать объект и определяется числом пороговых контрастов в контрасте объекта с фоном:

$$V = \frac{K}{K_{\text{пор}}},$$

где  $K_{\text{пор}}$  – наименьший, т. е. пороговый контраст, различаемый глазом. При не-большом его уменьшении объект становится нераспознаваемым на этом фоне.

Важнейшая характеристика, определяющая энергоэффективность источников света – это световая отдача  $H$ . Световая отдача лампы (лм/Вт) определяется отношением номинального светового потока лампы  $\Phi_n$  к номинальной электрической мощности  $P_n$ :

$$H = \frac{\Phi_n}{P_n},$$

Самые низкие значения световой отдачи имеют ЛН и ГЛН. Самая высокая световая отдача у натриевых ламп высокого давления – до 160 лм/Вт, на втором месте светодиоды – до 120 лм/Вт; хорошие показатели имеют люминесцентные и металлогалогенные лампы.

Рассмотрим каждую группу ламп с точки зрения энергоэффективности и экобезопасности.

**Лампы накаливания.** В быту наибольшее распространение получили лампы накаливания (ЛН), которые имеют специальное или общее назначение. Традиционно они дешевле всех остальных типов ламп, но имеют низкую световую отдачу (в среднем от 7 до 14 лм/Вт), короткий срок службы (1000 ч).

В России Федеральный Закон от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» запрещает с 1 января 2011 года производство и применение ЛН мощностью 100 Вт и более. Переход от ламп накаливания на энергосберегающие лампы и светильники может сократить расходы на освещение на 66 % [7, 17].

**Люминесцентные лампы (ЛЛ)**, или газоразрядные источники света, – это довольно большая группа ламп, где видимое излучение имеет разный цвет. Оно создается в парах металлов или газах электрическим разрядом. В зависимости от конструктивного выполнения различают: линейные, U-образные, кольцевые и компактные ЛЛ.

Преимущества газоразрядных источников света:

- более высокая световая отдача и более высокий срок службы, значительно большая яркость, чем у ЛН;
- значительно меньшая, чем у ЛН, зависимость световых характеристик от напряжения сети.

Недостатки:

- необходимость применения сложной ПРА;
- наличие ртути, что создает определенные проблемы при изготовлении и утилизации этих ламп;
- длительность процесса зажигания (от нескольких секунд до минуты);
- низкий коэффициент мощности ламп с электромагнитным ПРА;
- большие потери мощности в пускорегулирующей аппаратуре;
- более высокая стоимость по сравнению с лампами накаливания;
- значительные пульсации светового потока.

**Светодиодные лампы.** Светодиодными источниками света называют полупроводниковые приборы, которые излучают некогерентный свет, когда через них пропускается электрический ток. Излучаемый свет лежит в небольшом диапазоне спектра, и его цветовые характеристики зависят от химического состава полупроводника. Светодиоды нашли наиболее широкое применение как источники света в фонарях, в качестве индикаторов для цифрового табло, в подсветке небольших жидкокристаллических экранов и т. п.

Светодиодные лампы имеют целый ряд преимуществ перед другими источниками света. Основные из них:

- 1) высокая надежность и механическая прочность;
- 2) высокая устойчивость к внешним воздействиям (температуре, вибрациям, ударам, влажности);
- 3) высокий срок службы, малые габариты;
- 4) высокая световая отдача, которая не снижается при низких температурах;

- 5) высокий индекс цветопередачи (до 85 %);
- 6) возможность регулирования светового потока;
- 7) пожаро- и взрывобезопасность;
- 8) отсутствие ртути.

К недостаткам можно отнести:

- 1) высокую стоимость;
- 2) нестабильность световых характеристик в пределах светового пучка;
- 3) несоответствие реальных характеристик паспортным;
- 4) достаточно узкий световой пучок.

В России налажено производство ламп для прямого включения в сеть напряжением 220 В. Такие лампы получили название «светодиодные лампы прямой замены», их назначение – замена ламп накаливания, галогенных, линейных ЛЛ.

Источники света следует выбирать в соответствии с рекомендациями [7].

Для общего освещения промышленных помещений следует использовать энергоэкономичные разрядные источники света и светодиоды. В помещениях дошкольного, школьного и профессионально-технического образования, а также в основных функциональных помещениях лечебно-профилактических учреждений следует применять галогенные лампы накаливания и люминесцентные лампы, в том числе компактные.

**Светильники.** Светильником называется осветительный прибор, осуществляющий перераспределение светового потока лампы внутри значительных телесных углов. Светильники являются световыми приборами ближнего действия. Осветительные приборы дальнего действия называются прожекторами.

Выбор типа светильников следует производить с учетом:

- назначения: для промышленных, общественных, бытовых зданий и пр;
- условий окружающей среды;
- характера светораспределения.

### **3.3. Силовые общепромышленные установки и электродвигатели производственных механизмов**

Одним из главных электрифицированных потребителей является электропривод металлообрабатывающих станков: токарных; сверлильных и расточных; шлифовальных и полировальных; комбинированных; зубо- и резьбообрабатывающих; фрезерных; строгальных, долбежных и протяжных; разрезных и др.

Электродвигатели производственных механизмов встречаются на всех промышленных предприятиях. Для электропривода современных станков применяются все виды двигателей. Мощность двигателей чрезвычайно разнообразна и изменяется от долей до сотен киловатт и больше. В станках, где требуются высокие частоты вращения и регулирование мощности, применяются двигатели постоянного тока, питающиеся от выпрямительных установок. Напряжение сети 660–380/220 В с частотой 50 Гц, коэффициент мощности колеблется в широких пределах в зависимости от технологического процесса. По надежности электроснабжения эта группа приемников относится ко 2-й категории. Однако имеется ряд станков, где перерыв в питании недопустим по условиям техники безопасности (возможны травмы обслуживающего персонала) и по причине возможной порчи изделий, особенно при обработке крупных дорогостоящих деталей.

К силовым установкам общепромышленного назначения относят:

- подъемно-транспортные устройства;
- компрессоры;
- вентиляторы;
- насосы.

Двигатели компрессоров, вентиляторов и насосов работают примерно в одинаковом режиме и в зависимости от мощности снабжаются электрической энергией на напряжении от 0,22 до 10 кВ. Мощность таких установок изменяется в очень широком диапазоне от долей единицы до тысяч киловатт. Питание двигателей производится током промышленной частоты 50 Гц. Ха-

рактер нагрузки ровный, особенно для мощных установок. Перерыв в электроснабжении чаще всего недопустим и может повлечь за собой опасность для жизни людей, серьезное нарушение технологического процесса или повреждение оборудования. В ряде цехов прекращение питания двигателей вентиляторов может вызвать массовые отравления работающего персонала. В таких случаях установки следует относить к потребителям 1-й категории.

Потребители рассматриваемой группы создают нагрузку, равномерную и симметричную по всем трем фазам. Толчки нагрузки имеют место только при пуске. Коэффициент мощности достаточно стабилен и обычно имеет значение 0,80–0,85.

Для электропривода крупных насосов, компрессоров и вентиляторов чаще всего применяют синхронные двигатели, работающие с опережающим коэффициентом мощности.

Подъемно-транспортные устройства работают в повторно-кратковременном режиме. Для этих устройств характерны частые толчки нагрузки. В связи с резкими изменениями нагрузки коэффициент мощности также изменяется в значительных пределах, в среднем от 0,3 до 0,8. По бесперебойности питания эти устройства должны быть отнесены (в зависимости от места работы и установки) к потребителям 1-й и 2-й категорий. В подъемно-транспортных устройствах применяется как переменный (50 Гц), так и постоянный ток. В большинстве случаев нагрузку от подъемно-транспортных устройств на стороне переменного тока следует считать симметричной по всем трем фазам.

### **3.4. Режимы работы потребителей электрической энергии и энергосилового оборудования промышленных предприятий**

По режимам работы все потребители электроэнергии можно распределить на ряд групп, для которых предусматриваются три режима работы: продолжительный, кратковременный, повторно-кратковременный.

В *продолжительном* режиме (рис. 3.1, а) работает большинство электродвигателей, обслуживающих основные технологические агрегаты и механизмы. Длительно, без отключения, от нескольких часов до нескольких смен подряд, с достаточно высокой, неизменной или мало меняющейся нагрузкой работают электроприводы вентиляторов, насосов, компрессоров, преобразователей, механизмов непрерывного транспорта и т. п.

Самостоятельную группу электрических приемников составляют нагревательные аппараты и электропечи, работающие в продолжительном режиме с постоянной или мало меняющейся нагрузкой, и электрическое освещение, отличительной особенностью режима работы которого является резкое изменение нагрузки почти от нуля до максимума в зависимости от времени суток и постоянство нагрузки во все время, когда освещение включено.

Этот режим при практически постоянной нагрузке  $P$  продолжается столь длительное время, что превышение температуры всех частей электроприемника над температурой окружающей среды достигает практически установившегося значения  $\tau_{уст}$ . В данном режиме работают электроприводы насосов, компрессоров, вентиляторов, механизмов непрерывного транспорта, электропечи и пр.

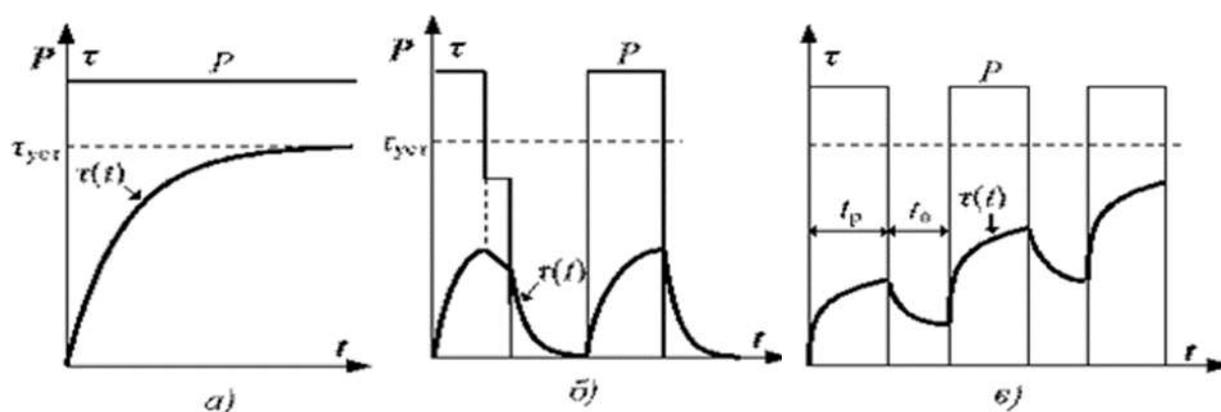


Рис. 3.1. Режимы работы электроприемников:

а – продолжительный; б – кратковременный; в – повторно-кратковременный;  $P$  – мощность;  $\tau(t)$  – зависимость превышения температуры над температурой окружающей среды от времени приложения мощности  $P$ ;  $\tau_{уст}$  – установившееся превышение температуры;  $t_p$  – время работы;  $t_n$  – время пауз

Температуру электроустановки при продолжительном режиме работы можно считать практически установившейся через промежуток времени, равный  $3t_0$ , где  $t_0$  – постоянная времени нагрева.

В кратковременном режиме (рис. 3.1, б) работает подавляющее большинство электроприводов вспомогательных механизмов металлорежущих станков, а также механизмов открывания фрамуг, гидравлических затворов, всякого рода заслонок и т. п.

Этот режим характеризуется небольшими по времени периодами работы  $t_{\text{в}}$  при нагрузке  $P$  и длительными паузами  $t_{\text{п}}$  с отключением электроприемника от сети. Превышение температуры нагрева электрооборудования над температурой окружающей среды не успевает достигнуть установившихся (предельно допустимых) значений, а за время паузы снижается до температуры окружающей среды. В кратковременном режиме работают вспомогательные механизмы металлорежущих станков, электроприводы различных заслонок, задвижек и пр.

В повторно-кратковременном режиме (ПКР) (рис. 3.1, в) работают электродвигатели мостовых кранов, тельферов, подъёмников и аналогичных им установок, вспомогательных и некоторых главных приводов прокатных цехов. К этой группе относятся и сварочные аппараты, работающие с постоянными большими бросками мощности.

В этом режиме кратковременные периоды работы  $t_{\text{в}}$  при нагрузке  $P$  чередуются с паузами  $t_{\text{п}}$ . За период работы превышение температуры нагрева электрооборудования не достигает установившегося (предельно допустимого) уровня, а в течение паузы не снижается до температуры окружающей среды. В результате многократных циклов  $t_{\text{п}}$  превышение температуры достигает некоторой средней установившейся величины  $\tau_{\text{уст}}$ .

Повторно-кратковременный режим работы характеризуется продолжительностью включения (ПВ), равной отношению времени включения  $t_{\text{в}}$

к времени всего цикла  $t_{\text{ц}}$ :

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{о}} + t_{\text{в}}} 100\% = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{ц}}} 100\% ,$$

где  $t_{\text{в}}, t_{\text{о}}, t_{\text{ц}}$  – время включения, отключения и продолжительности цикла.

Принято, что продолжительность одного цикла для ПКР  $t_{\text{ц}} < 10$  минут. Если  $t_{\text{ц}} > 10$  минут, то режим работы электроприемника считается продолжительным. Выпускаемые промышленностью электродвигатели повторно-кратковременного режима характеризуются номинальным показателем  $\text{ПВ}_{\text{пасп}}$ . Стандартные значения ПВ: 15, 25, 40 и 60 %.

Для электроприемников повторно-кратковременного режима в паспорте указывается мощность  $P_{\text{пасп}}$ , которая должна быть приведена к номинальной мощности продолжительного режима  $P_{\text{ном}}$ , кВт, при ПВ = 100 %.

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{пасп.о.е}}} .$$

Для сварочных машин и сварочных трансформаторов паспортная мощность указывается в единицах измерения полной мощности  $S_{\text{пасп}}$ , кВ·А.

Тогда номинальная активная мощность определяется по выражению:

$$P_{\text{ном}} = S_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{пасп.о.е}}} \cos \varphi_{\text{пасп}} .$$

### 3.5. Электрические нагрузки и их графики

При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения выделяют три вида электрической нагрузки:

- активная мощность нагрузки  $P$ ;
- реактивная мощность нагрузки  $Q$ ;
- ток  $I$ .

Кривая, характеризующая изменение нагрузки во времени, называется графиком электрической нагрузки.

Различают индивидуальные и групповые графики электрической нагрузки – соответственно, для отдельных электроприемников и для группы электроприемников.

В практике электроснабжения, как правило, используют групповые графики нагрузки (ГГН), но учитывая, что они формируются отдельными электроприемниками, необходимо рассмотреть индивидуальные графики нагрузки (ИГН). Различают четыре вида графиков ГГН:

- периодические;
- циклические;
- нециклические;
- нерегулярные.

**Периодические графики** (рис. 3.2) отвечают строго ритмичному производству с одинаковыми токами и временем: паузы  $t_{п}$ , работы  $t_{р}$ , цикла  $t_{ц}$ .

$$t_{п1} = t_{п2} = \text{const}, t_{р1} = t_{р2} = \text{const}, t_{ц1} = t_{ц2} = \text{const}.$$

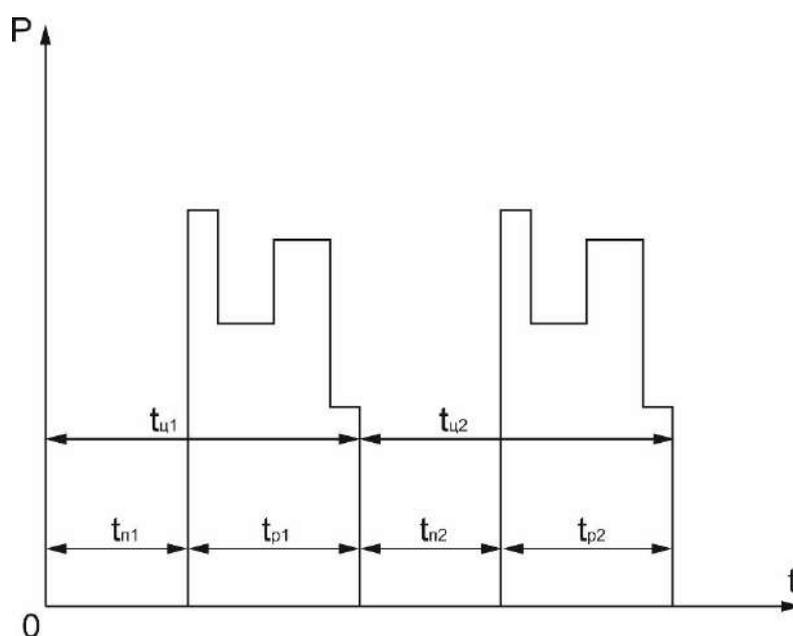


Рис. 3.2. Периодический график нагрузки

Для данного случая в промежутках времени  $t_{ц}$  количество потребляемой электроприемником электроэнергии постоянно:  $W_1 = W_2 = \text{const}$ .

Такие графики имеют, например, отдельные станки в автоматических поточных линиях.

**Циклические графики** (рис. 3.3) характерны для электроприемников поточных линий, где имеются ручные операции, например установка, подгонка деталей, их съем и т. д. Время пауз  $t_{п}$  и циклов  $t_{ц}$  у таких графиков за разные циклы не равны и изменяются по случайному закону:

$$t_{п1} \neq t_{п2} \neq \text{const}, t_{п1} = t_{п2} = \text{const}, t_{ц1} \neq t_{ц2} \neq \text{const}, W_1 = W_2 = \text{const}.$$

**Нециклические графики** (рис. 3.4) имеют электроприемники, когда выполняемые ими операции строго не регламентированы, например станки на ремонтных участках. В этом случае  $t_{п}$ ,  $t_{р}$ ,  $t_{ц}$  являются случайными, меняется и величина нагрузки от цикла к циклу. При этом нециклический график, подобно периодическому и циклическому, характеризуется стабильностью потребления электроэнергии за среднее время цикла:

$$t_{п1} \neq t_{п2} \neq \text{const}, t_{р1} \neq t_{р2} \neq \text{const}, t_{ц1} \neq t_{ц2} \neq \text{const}, W_1 = W_2 = \text{const}.$$

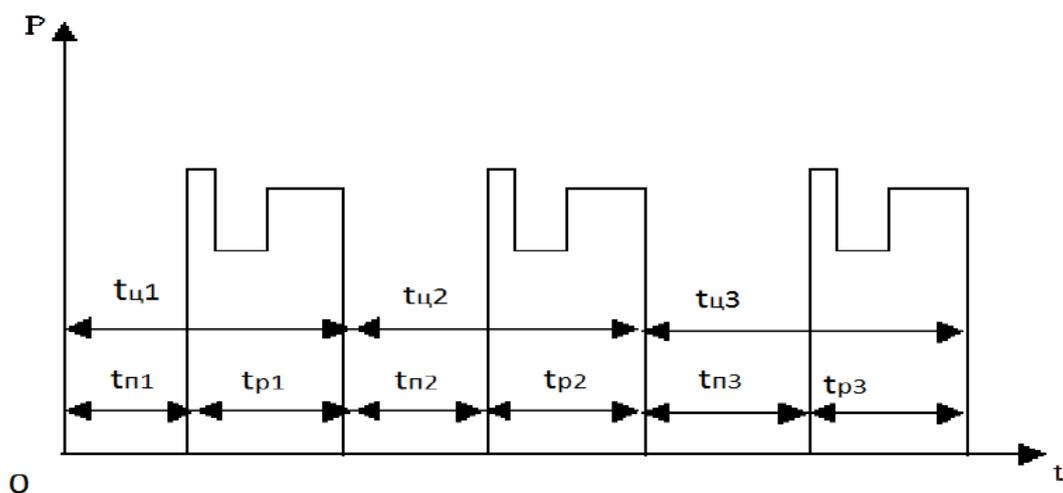


Рис. 3.3. Циклический график нагрузки

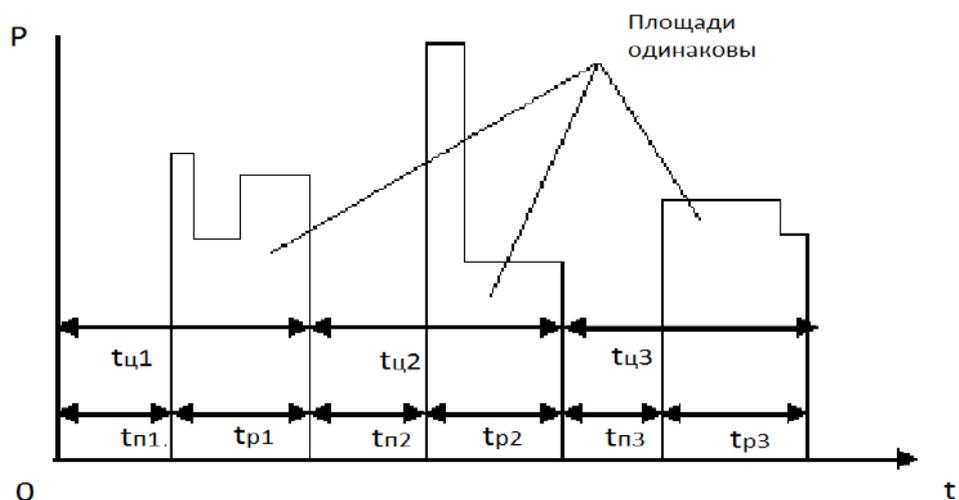


Рис. 3.4. Нециклический график нагрузки

**Нерегулярные графики** ([рис. 3.5](#)) встречаются редко. Их имеют электроприемники, которые обслуживают технологические процессы с неустановившимся характером. При этом условие стабильности потребления электроэнергии уже не соблюдается:

$$t_{п1} \neq t_{п2} \neq \text{const}, t_{п1} \neq t_{п2} \neq \text{const}, t_{ц1} \neq t_{ц2} \neq \text{const}, W_1 \neq W_2 \neq \text{const}.$$

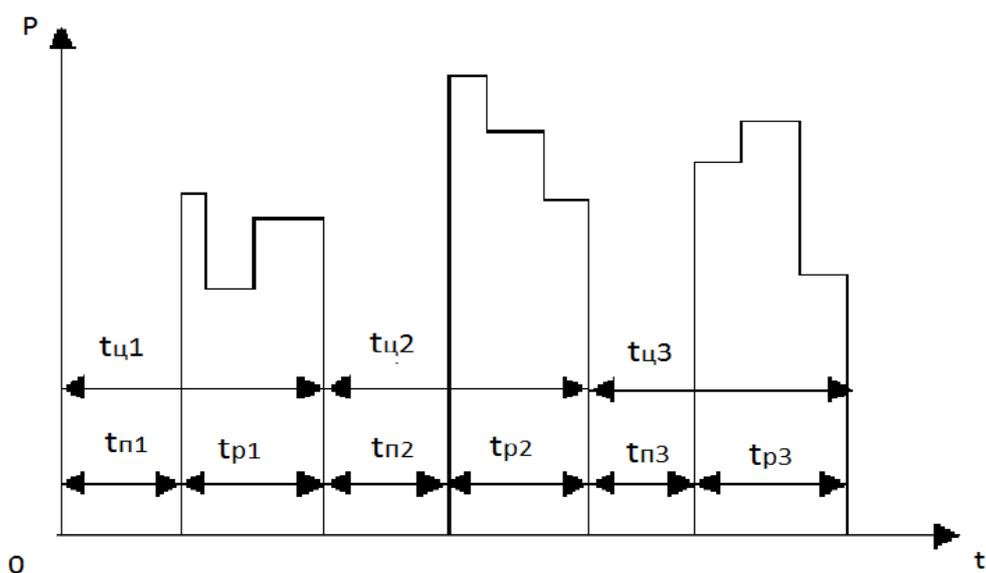


Рис. 3.5. Нерегулярный график нагрузки

Например, электропривод для бурения скважин большой глубины будет создавать нерегулярный график нагрузки, так как твердость породы и ее толщина все время меняются.

### *Индивидуальные графики электрической нагрузки ЭТУ*

1) Печи сопротивления (рис. 3.6).

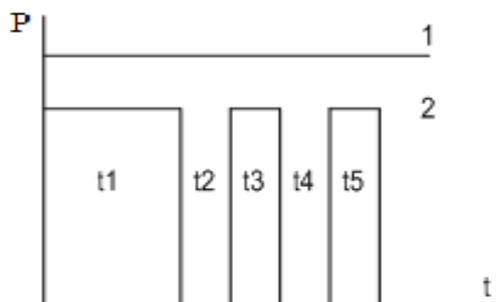


Рис. 3.6. График электрической нагрузки печи сопротивления:

1 — непрерывный цикл; 2 — периодический цикл;  $t_1, t_3, t_5$  — режим включения ( $t_n$ ),  $t_2, t_4$  — режим отключения ( $t_o$ )

Весь период  $t_{ц}$ ,  $t_{ц} = t_n + t_o$ , где  $t_n$  — нагрев,  $t_o$  — охлаждение.

2) Дуговые печи (рис. 3.7).

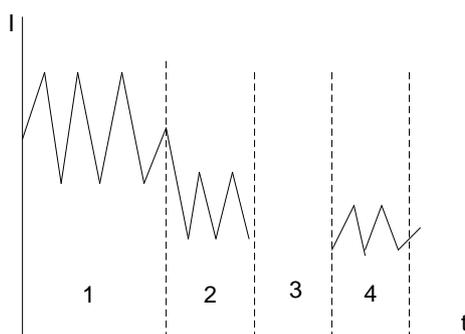


Рис. 3.7. График электрической нагрузки дуговой печи:

1 — расплав металла; 2 — окисление; 3 — скачивание шлаков; 4 — восстановление

Время цикла:  $t_{ц} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ ,  $t_{ц}$  составляет время от загрузки до восстановления.

3) Рудно-термические (РТ) и вакуумные (В) печи ([рис. 3.8](#)).

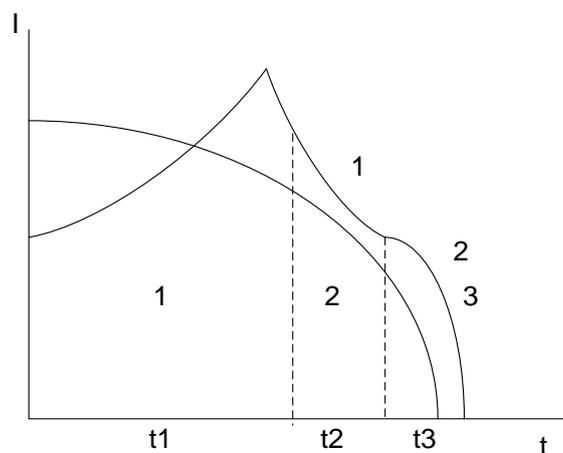


Рис. 3.8. График электрической нагрузки вакуумной (В) и рудно-термической (РТ) печей:  
1 – прогрев электрода, 2 – переплав металла, 3 – выход усадочной раковины

Для рудно-термической печи режим работы спокойный, так как дуга закрыта и тепло распространяется дугой и сопротивлением.

Время цикла:  $t_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3$ .

4) Индуктивные печи ([рис. 3.9](#)).

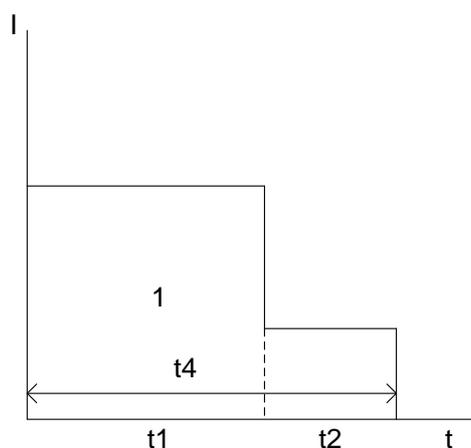


Рис. 3.9. График электрической нагрузки индукционной печи:

$t_1$  – плавки металла (2–10 часов),  $t_2$  – ожидание загрузки (до 2 часов)

Время цикла:  $t_{\text{ц}} = t_1 + t_2$ .

5) Индукционные установки ([рис. 3.10](#)).

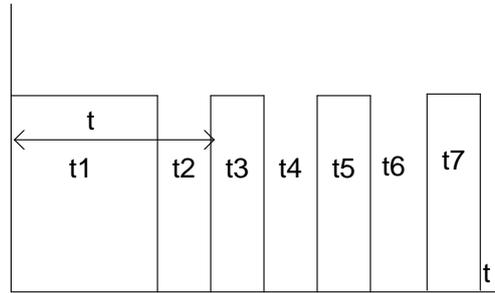


Рис. 3.10. График электрической нагрузки индукционной установки

$t_1$  — время закладки (5–10 сек.)  $t_2$  — время паузы (10–40 сек).

Время цикла:  $t_{\text{ц}} = t_1 + t_2$ .

6) Сварочные установки ([рис. 3.11](#)).

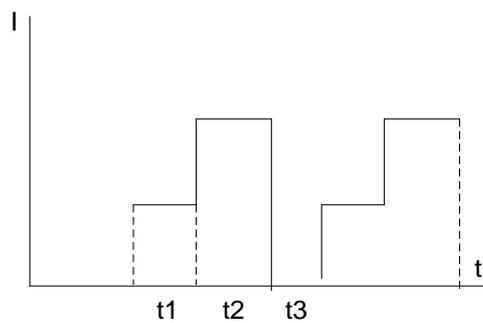


Рис. 3.11. График электрической нагрузки сварочной установки

Стыковая сварка: выделяют 2 цикла: 1 — нагрев, 2 — усадка.  $t_1$  — время нагрева (0,5–10 сек),  $t_2$  — время усадки (до 1 сек),  $t_3$  — время паузы до 5 минут.

Время цикла:  $t_{\text{ц}} = t_1 + t_2$ .

7) Электролизные установки. График аналогичен графику печей сопротивления непрерывного действия.

8) Электрохимические установки. График аналогичен графику индукционных установок.

### 3.6. Физические величины графиков нагрузки

Физические величины, характеризующие графики электрических нагрузок, следующие:

- 1)  $P_c$  – средняя нагрузка ( $Q_c, S_c, I_c$ );
- 2)  $P_{ск}$  – среднеквадратичная (эффективная) нагрузка ( $Q_{ск}, S_{ск}, I_{ск}$ );
- 3)  $P_m$  – максимальная нагрузка ( $Q_m, S_m, I_m$ );
- 4)  $P_p$  – расчетная (максимальная длительная) нагрузка;
- 5)  $P_{пик}$  – пиковая (максимальная кратковременная) нагрузка.

Средняя нагрузка – постоянная, неизменная во времени нагрузка в течение рассматриваемого промежутка времени, которая вызывает такой же расход электроэнергии, что и реальная, изменяющаяся нагрузка за этот же промежуток времени  $T$ :

$$P_{cp} = \frac{\sum P_i \Delta t_i}{T}.$$

Среднеквадратичная нагрузка – такая неизменная в течение промежутка времени  $T$  нагрузка, которая вызывает потери мощности и энергии в элементах системы электроснабжения потребителей такие же, как реальная изменяющаяся за это же время ( $T$ ) нагрузка:

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \Delta t_i}{T}}.$$

Среднеквадратичная нагрузка используется для определения потерь мощности и энергии в элементах системы электроснабжения.

Максимальная нагрузка – это наибольшая из средних нагрузок за рассматриваемый промежуток времени. При этом различают максимальную длительную и максимальную кратковременную нагрузки.

Максимальная длительная нагрузка характеризуется периодом усреднения от нескольких минут до нескольких часов. Она используется для выбора токоведущих частей СЭС по условию нагрева.

Максимальная кратковременная нагрузка характеризуется периодом усреднения от доли до нескольких секунд. Ее называют пиковой нагрузкой:

$$P_{\text{пик}} > P_{\text{м}} > P_{\text{ск}} > P_{\text{с}}.$$

*Пиковая нагрузка* используется для расчетов релейной защиты и автоматики, выбора предохранителей и автоматических выключателей.

Из максимальной длительной нагрузки важнейшее значение имеет расчетная нагрузка. Под расчетной нагрузкой понимается такая условная нагрузка, которая эквивалентна реальной нагрузке по наиболее тяжелому тепловому эффекту.

### **3.7. Показатели, характеризующие приемники электрической энергии**

Графики нагрузки описываются безразмерными коэффициентами, устанавливающими связь между основными физическими величинами, характеризуют неравномерность графиков нагрузки, а также использование электроприемников и потребителей электроэнергии по мощности и времени.

*1. Коэффициент максимума графика:*

$$K_{\text{м.г}} = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{с}}}.$$

## 2. Коэффициент заполнения графика:

$$K_{з.г} = \frac{P_c}{P_M} = \frac{1}{K_{м.г}}.$$

Данный коэффициент определяется как для группового, так и для индивидуального графика нагрузки.

## 3. Коэффициент формы графика:

$$K_{ф.г} = \frac{P_{ск}}{P_c}.$$

$$K_{ф.г} \geq 1:$$

– для групповых графиков  $K_{ф.г} = 1-1,2$ ;

– для индивидуальных графиков  $K_{ф.г} = 1-3$ .

Коэффициент формы характеризует степень неравномерности графика нагрузки, прямо пропорционален величине потерь мощности и энергии в элементах системы электроснабжения потребителя.

## 4. Коэффициент включения:

$$K_B = \frac{t_B}{t_B + t_0 + t_{xx}},$$

где  $t_B$  – время включения и работы электроприемников;  $t_0$  – время отключения электроприемника;  $t_{xx}$  – время работы в режиме холостого хода.

Для групповых графиков коэффициент включения определяется как средневзвешенное значение коэффициентов включения входящих в группу электроприемников:

$$K_B = \frac{\sum K_{B,i} P_{H,i}}{\sum P_{H,i}},$$

Коэффициент включения  $K_B$  характеризует использование электроприемников по времени.

5. Коэффициент загрузки:

$$K_3 = \frac{P_{св}}{P_H},$$

где  $P_{св}$  – средняя мощность нагрузки за время включения электроприемника:

$$P_{св} = \frac{T_{ц}}{T_B} P_c;$$

$$P_{св} = \frac{\sum P_i \Delta t_i}{\sum T_B},$$

где  $T_{ц}$  – время цикла;  $P_c$  – средняя нагрузка за цикл или смену;  $T_B$  – время включения.

Коэффициент загрузки характеризует использование электроприемников по мощности.

6. Коэффициент использования

$$K_H = \frac{P_c}{P_H}.$$

При заданных индивидуальных коэффициентах использования групповой коэффициент рассчитывается как средневзвешенное значение по выражению:

$$K_H = \frac{\sum K_{Hi} P_{Hi}}{\sum P_{Hi}}.$$

Коэффициент использования характеризует использование электроприемников по мощности и времени:

$$K_{\text{и}} = K_{\text{с}} K_{\text{в}}.$$

Значения коэффициента использования для различных электроприемников определены из опыта эксплуатации и принимаются при проектировании по справочным материалам.

Принято, что если  $K_{\text{и}} < 0,6$ , то электроприемник или группа электроприемников работает с переменным графиком нагрузки. Если  $K_{\text{и}} > 0,6$  – с постоянным графиком нагрузки.

Коэффициенты использования и коэффициенты мощности некоторых электроприемников промышленных предприятий приведены в [табл. 3.1](#).

#### 7. Коэффициент спроса

$$K_{\text{с}} = \frac{P_{\text{р}}}{\sum P_{\text{пасп}}},$$

$$K_{\text{с}} = K_{\text{и}} K_{\text{м.г}}.$$

#### 8. Время использования максимума нагрузки

$$T_{\text{м}} = K_{\text{з.г}} T.$$

#### 9. Время максимальных потерь

$$\tau = (K_{\text{ф.г}} K_{\text{з.г}})^2 T.$$

Средние значения коэффициентов использования ( $K_{и}$ ) и мощности ( $\cos \varphi$ )  
для характерных групп электроприемников

Наименование	$K_{и}$	$\cos \varphi$
Металлорежущие станки с нормальным режимом работы: мелкие токарные, строгальные, фрезерные, сверлильные, шлифовальные, точильные и т. д.	0,12–0,14	0,5–0,6
Металлообрабатывающие станки при тяжелом режиме работы: штамповочные прессы, обдирочные станки, механические ножницы, зубофрезерные, а также крупные токарные фрезерные, рачточные, карусельные станки	0,17–0,25	0,65
Металлообрабатывающие станки с особо тяжелым режимом работы: приводы молотов, ковочных машин, волочильных станков, бегунов	0,22–0,26	0,65
Вентиляторы, эксгаустеры, калориферы	0,6–0,8	0,8–0,85
Насосы, компрессоры, двигатели-генераторы	0,7–0,8	0,8–0,85
Краны, тельферы, кран-балки при ПВ = 25 %	0,06	0,5
То же при ПВ = 40 %	0,1	0,5
Конвейеры, транспортеры, элеваторы	0,5–0,6	0,7–0,8
Сварочные трансформаторы дуговой сварки	0,25–0,3	0,35–0,4
Однопостовые сварочные двигатели-генераторы	0,3	0,6
Многопостовые сварочные двигатели-генераторы	0,4–0,5	0,7
Сварочные машины шовные	0,2–0,5	0,6–0,7
Сварочные машины стыковые и точечные	0,2–0,25	0,6
Печи сопротивления, сушильные шкафы, нагревательные шкафы	0,75–0,8	0,9–1,0
Ламповые генераторы индукционных печей высокой частоты	0,6–0,7	0,65
Переносной электроинструмент	0,06	0,65
Формовочные машины	0,15–0,2	0,6
Деревообрабатывающие станки, токарные, сверлильные, фуговочные, рейсмусовые, долбежные, строгальные и т. д.	0,17	0,6
Пилорамы, дисковые пилы	0,25–0,3	0,65
Шаровые мельницы	0,8	0,8
Электрофильтры	0,4	0,87
Грохоты	0,5–0,6	0,6–0,7
Поточные линии, станки с ЧПУ	0,6	0,7
Вакуум-насосы	0,95	0,85
Вагоноопрокидыватели	0,6	0,5
Приводы молотов, ковшных машин, волочильных станков, очистных барабанов, бегунов и др.	0,2–0,24	0,65
Сушильные барабаны и сепараторы	0,6	0,7

### Контрольные вопросы

1. Приведите классификацию электроприемников.
2. Перечислите основные условия электроснабжения приемников I категории.
3. Назовите режимы работы электроприемников. Что такое ПВ?

4. Перечислите основные характеристики электроприемников.
5. Что называют графиком электрической нагрузки, какие нагрузки выделяют?
6. Графически представьте типы индивидуальных графиков нагрузки.
7. Графически представьте типы групповых графиков нагрузки.
8. Перечислите показатели графиков нагрузки.
9. Какие коэффициенты характеризуют графики нагрузки?
10. Какие коэффициенты характеризуют режимы работы электроприемников?
11. Опишите в качестве приемника электроэнергии электродвигатели силовых и общепромышленных установок.
12. Опишите в качестве приемника электроэнергии электродвигатели производственных станков.
13. Что понимают под средней и среднеквадратичной нагрузкой?

## 4. УРОВНИ (СТУПЕНИ) СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

### 4.1. Структура системы электроснабжения

В общем случае систему электроснабжения (СЭС) можно представить в виде древовидной структуры (рис. 4.1), которая наглядно представляет процессы передачи электрической энергии к электрическим приемникам.

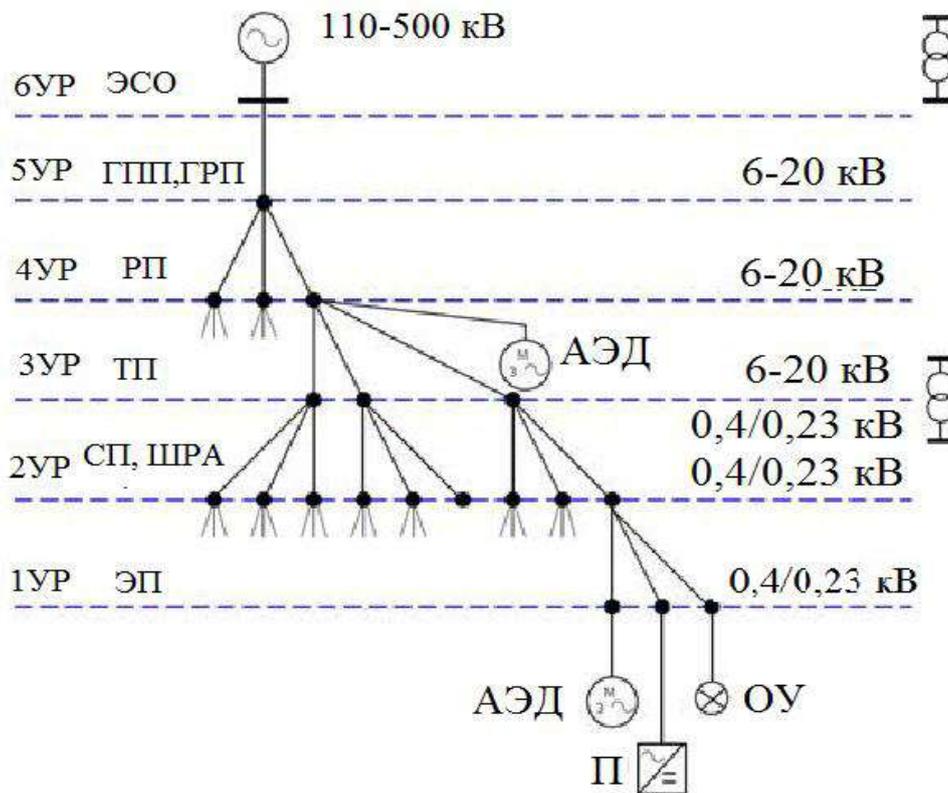


Рис. 4.1. Уровни системы электроснабжения:

ГПП – главная понизительная подстанция; ГРП – главный распределительный пункт; РП – распределительный пункт; ТП – трансформаторная подстанция; СП – силовой пункт; ШРА – распределительный шинопровод; АЭД – асинхронный электродвигатель; П – преобразователь; ОУ – осветительная установка

В древовидной (дендроидной) структуре СЭС выделяется шесть уровней [5]:

1 УР – линия, питающая отдельный электроприемник от любого вышестоящего уровня, независимо от номинального напряжения электрических сетей.

2 УР – линия распределительной сети напряжением до 1000 В, обеспечивающая связи силовых пунктов (СП) или распределительных шинопроводов (ШРА) между собой и с магистральными шинопроводами (ШМА) или с шинами цеховой трансформаторной подстанции (ТП).

3 УР – магистральные шинопроводы или шины цеховой ТП.

4 УР – шины распределительных подстанций (РП) высокого напряжения (при отсутствии РП 4 УР и 5 УР совпадают).

5 УР – шины низшего напряжения ГПП или ГРП.

6 УР – граница раздела сетей предприятия и энергоснабжающей организации.

Указанное количество уровней можно считать минимальным. Возможно появление заводских распределительных пунктов на 110 (220) кВ, которые питаются от районных источников питания и предназначены для увеличения количества присоединений и экономии проводниковой продукции. От распределительных пунктов (РП) 6–20 кВ могут питаться не только ТП 6–20/0,4 кВ и высоковольтные двигатели, но и вновь сооружаемые РП 6–20 кВ. Есть случаи, когда и эти РП питают другие РП 10 кВ. Для 2 УР распространено питание распределительного щита 0,4 кВ от другого щита (появление еще нескольких подуровней), что особенно характерно для удаленных и маломощных потребителей.

В общем случае 6 УР – это уровень потребителя электроэнергии: предприятие, организация, территориально обособленный цех, строительная площадка. Уровень, называемый заводским электроснабжением, интегрирует нагрузки ГПП, ГРП и распределительных устройств заводских ТЭЦ. С системой внешнего электроснабжения 6 УР связан линиями электропередачи, которые присоединены к источникам питания энергосистемы: районным и узловым подстанциям энергосистемы; распределительным устройствам ТЭЦ, ТЭС, ГЭС, АЭС.

Высшее напряжение трансформаторов ГПП определяется шкалой напряжений, сложившейся в системе электроснабжения. На большей части

страны существует система 500/220/110 кВ, а также развивается система 750/330/154 кВ. Напряжение 35 кВ для системы электроснабжения не рекомендуется и применяется, например, для дуговых сталеплавильных печей, а также для удаленных потребителей небольшой мощности.

Распределительные пункты 4УР получают электроэнергию от ГПП или ТЭЦ на напряжении 6–20 кВ и предназначены для ее приема и распределения между цеховыми ТП и отдельными токоприемниками высокого напряжения (электродвигатели, преобразователи, электропечи). В некоторых случаях РП совмещаются с цеховыми ТП для удобства питания цеховых потребителей электроэнергии. 5УР и 4УР относят к внецеховому электроснабжению, сети называют межцеховыми (магистральными), а напряжение – распределительным. От 5УР осуществляется электроснабжение крупных потребителей, от 4УР питаются цеха, отдельные здания и сооружения. Часть подстанций 4УР тесно связана с производственным технологическим процессом.

Цеховые ТП предназначены для преобразования электроэнергии напряжением 6–20 кВ в напряжение 220/380, 660 В и питания на этом напряжении цеховых электрических сетей. К цеховым электрическим сетям 110/220/380 и 660 В присоединено большинство электроприемников промышленных предприятий. Одними из элементов системы электроснабжения являются преобразовательные подстанции, которые предназначены для преобразования переменного тока в постоянный ток, а также для преобразования энергии одной частоты в другую.

## **4.2. Методы расчета электрических нагрузок**

Одним из основных этапов проектирования систем электроснабжения объекта является правильное определение ожидаемых электрических нагрузок как отдельных ЭП, так и узлов нагрузки на всех уровнях системы электроснабжения.

Расчетные значения нагрузок – это нагрузки, соответствующие такой неизменной токовой нагрузке ( $I_{\text{расч}}$ ), которая эквивалентна фактической изменяющейся во времени нагрузке по наибольшему тепловому воздействию (не превышая допустимых значений) на элемент системы электроснабжения.

Зная электрические нагрузки, можно выбрать нужную мощность силовых трансформаторов, мощность и место подключения компенсирующих устройств, выбрать и проверить токоведущие части по условию допустимого нагрева, рассчитать потери и колебания напряжения, выбрать виды защит.

Существуют различные методы расчета электрических нагрузок, из которых в свою очередь выделяются:

- основные;
- вспомогательные.

*Основные методы расчета электрических нагрузок:*

- по номинальной мощности и коэффициенту спроса;
- упорядоченных диаграмм;
- статистический;
- вероятностного моделирования графиков нагрузки;
- по номинальной мощности и коэффициенту расчетной активной нагрузки;
- расчет однофазных нагрузок.

*Вспомогательные методы расчета электрических нагрузок:*

- удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции;
- удельной плотности нагрузки на единицу производственной площади;
- удельных плотностей нагрузок;
- технологического графика;

Применение того или иного метода определяется допустимой погрешностью расчетов и наличия исходных данных.

**Метод коэффициента спроса.** Расчетная нагрузка для групп ЭП, однородных по режиму работы, определяется из следующих выражений:

$$P_p = K_c P_{\text{ном}} ;$$

$$Q_p = P_p \operatorname{tg} \varphi ;$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} ,$$

где  $P_p$ ,  $Q_p$ ,  $S_p$  – соответственно суммарная расчетная активная, реактивная и полная мощность электроприемников потребителя;  $K_c$  – коэффициент спроса потребителя;  $\operatorname{tg} \varphi$  – коэффициент реактивной мощности потребителя.

Расчетная нагрузка узла системы электроснабжения определяется суммированием расчетных нагрузок отдельных групп ЭП с учетом коэффициента одновременности максимума нагрузки  $K_{p.m}$ . Значения  $K_c$  и  $\operatorname{tg} \varphi$  для различных потребителей приведены в справочниках. Данный метод может применяться при определении расчетных нагрузок цехов и предприятия в целом.

**Метод удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции.** По данному методу можно определить только среднюю нагрузку за определенный интервал времени (час, смену, сутки, месяц, квартал, год). Расчетное выражение по данному методу имеет вид:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W_{\text{уд}} \Pi}{T} , \quad (4.1)$$

где  $\Pi$  – объем выпуска продукции за интервал времени  $T$ ;  $W_{\text{уд}}$  – удельный расход электроэнергии на производство продукции.

Значения  $W_{\text{уд}}$  для ряда электроприемников цехов и предприятий приведены в справочной литературе.

Метод удельного расхода электроэнергии применим для участков (установок) 2УР, отделений 3УР и цехов 4УР, где технологическая продукция  $M$  однородная и количественно меняется мало (увеличение выпуска снижает

удельные расходы электроэнергии  $W_{уд}$ ). Поэтому применение формулы (4.1) дает не максимальную, а среднюю нагрузку. Для выбора трансформаторов ЗУР можно принять  $P_c = P_{max}$ .

В общем случае, особенно для 4УР (цеха), необходимо учитывать  $K_m$  или в выражении (4.1) в качестве  $T$  принимать действительное годовое (суточное) число часов работы производства с максимумом использования активной мощности.

**Метод удельной плотности нагрузки на единицу производственной площади.** Удельная плотность нагрузки определяется на основании обследования цехов действующих промышленных предприятий:

$$S_{уд} = \frac{S_p}{F_{ц}};$$

$$P_{уд} = \frac{P_p}{F_{ц}},$$

где  $S_p$  – максимальная (расчетная) нагрузка цеха;  $F_{ц}$  – площадь цеха.

Значения  $S_{уд}$ ,  $P_{уд}$  приводятся в справочной литературе в зависимости от наименования потребителя и площади его производственных помещений. Например, для металлообрабатывающих цехов  $P_{уд} = 0,12–0,25$  кВт/м<sup>2</sup>. Расчетная нагрузка определяется по выражению:

$$P_p = P_{уд} F.$$

Данный метод широко используется для определения расчетной осветительной нагрузки. При этом расчетная нагрузка освещения определяется по выражению:

$$P_{p.o} = K_{c.o} P_{уд.o} F,$$

где  $K_{с.о}$  – коэффициент спроса осветительной нагрузки;  $P_{уд.о}$  – удельная мощность осветительной нагрузки, которая в зависимости от требований к освещенности изменяется в широких пределах (4–100 Вт/м<sup>2</sup>).

При определении расчетной нагрузки на шинах высокого напряжения необходимо учитывать потери мощности в элементах системы электроснабжения потребителя (трансформаторы, линии электропередачи).

На стадии, когда нет схемы заводского электроснабжения, допускается принимать потери в трансформаторах:

$$\Delta P_T = 0,02S_p \text{ (кВт);}$$

$$\Delta Q_T = 0,1S_p \text{ (кВАр).}$$

Соответственно, потери в кабельных линиях принимаются:

$$P_{л} = 0,03S_p, \quad \Delta Q_{л} = 0,$$

где  $\Delta P_T$ ,  $\Delta Q_T$ ,  $P_{л}$ ,  $\Delta Q_{л}$  – активные и реактивные потери мощности в трансформаторах и сетях,  $S_p$  – геометрическая сумма расчетных мощностей цехов завода.

Таким образом, расчетная нагрузка потребителя составит:

$$P_p = K_0 \left( \sum_1^n P_{pi} + \Delta P_T + \Delta P_{л} \right);$$

$$Q_p = K_0 \left( \sum_1^n Q_{pi} + \Delta Q_T \right),$$

где  $K_0$  – коэффициент одновременности для определения расчетной нагрузки на шинах 6 (10) кВ РП и ГПП.

**Метод удельных плотностей нагрузок** близок к предыдущему. Задаются удельная мощность (плотность нагрузки)  $\gamma$ , и определяется площадь здания  $F$ , сооружения или участка, отделения, цеха. Например, для кислородно-конвертерных цехов  $\gamma = 0,16-0,32$  кВт/м<sup>2</sup>. Нагрузка, превышающая 0,4 кВт/м<sup>2</sup>, возможна для некоторых участков, где имеются единичные электроприемники единичной мощности 1–30 МВт. Расчетная нагрузка

$$P_{\max} = \gamma F .$$

**Метод технологического графика** опирается на график работы агрегата, линии или группы машин. Например, график работы дуговой сталеплавильной печи конкретизируется: указывается время расплавления, составляющее 27–50 мин, время окисления (20–80 мин), число плавов, технологическая увязка с работой других сталеплавильных агрегатов. График позволяет определить общий расход электроэнергии за плавку, средний за цикл (с учетом времени до начала следующей плавки) и максимальную нагрузку для расчета питающей сети.

**Метод упорядоченных диаграмм.** При наличии данных о числе электроприемников, их мощности, режимах работы его рекомендуют применять для расчета элементов системы электроснабжения 2УР, 3УР (провод, кабель, шинопровод, низковольтная аппаратура), питающих силовую нагрузку до 1 кВ (упрощенно для эффективного числа приемников всего цеха, т. е. для сети 6–10 кВ 4УР). Различие метода упорядоченных диаграмм и расчета по коэффициенту расчетной активной мощности заключается в замене коэффициента максимума  $K_M$ , всегда понимаемого однозначно как отношение  $P_{\max}/P_c$ , коэффициентом расчетной активной мощности  $K_p$ .

Метод оказался громоздким, трудным для понимания. Применение его на высших уровнях системы электроснабжения привело к большим ошибкам в расчетах. Метод не дифференцирован для различных уровней системы электроснабжения и для различных стадий выполнения (согласования) проекта.

Статистическое определение  $P_{см}$  для действующих предприятий осложняется трудностью выбора наиболее загруженной смены.

**Определение расчетной электрической нагрузки статистическим методом.** Статистический метод основан на анализе графика электрической нагрузки, получить который возможно при наличии системы учета параметров электропотребления. Поэтому метод используется на стадии эксплуатации при реконструкции системы электроснабжения.

Данный метод основывается на результатах исследований, согласно которым групповая нагрузка (начиная с 4–5 электроприемников) подчиняется нормальному закону распределения случайных величин.

По этому закону нагрузка от электроприемников может быть описана следующим выражением:

$$P = P_c \pm \beta \sigma ,$$

где  $P_c$  – средняя нагрузка при достаточно большом количестве осреднений  $m$  продолжительностью  $3T_0$ ;  $\sigma$  – среднеквадратичное (стандартное) отклонение, определяемое по выражению:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(P_1 - P_c)^2 + (P_2 - P_c)^2 + \dots}{m}} ,$$

где  $P_1, P_2, \dots, P_c$  – средние значения нагрузки на каждом интервале осреднения продолжительностью  $3T_0$ ;  $\beta$  – принятая кратность меры рассеяния ( $\beta = -3 \dots +3$ ).

Придавая  $\beta$  различные значения, можно получить возможные значения нагрузки. В теории вероятностей часто пользуются «трехсигмовой» вероятностью, т. е. вероятностью появления максимальной нагрузки:

$$P_{\max} = P_c + 3\sigma ,$$

а также минимальной ее величины:

$$P_{\min} = P_c - 3\sigma.$$

Этим значениям нагрузки соответствуют предельные вероятности 0,001 и 0,999, которые крайне редки.

Чем меньше  $\beta$ , тем выше вероятность того, что реальная нагрузка превысит расчетную (табл. 4.1.). Поэтому важным моментом статистического метода является определение (обоснование) значения  $\beta$ .

Таблица 4.1

Зависимость между кратностью меры рассеяния и вероятностью превышения расчетной нагрузки ( $P_{\text{вер}}$ )

$\beta$	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$P_{\text{вер}}$	0,997	0,995	0,975	0,935	0,84	0,69	0,31	0,16	0,065	0,025	0,005	0,003

При определении расчетной нагрузки на практике часто пользуются значением  $\beta = 2,5$ , поэтому выражение при определении максимальной нагрузки принимает следующий вид:

$$P_{\max} = P_c + 2,5\sigma.$$

В этом случае вероятность того, что нагрузка превысит фактическое значение  $P_p$ , составит 0,005, т. е. 0,5 % общего времени действия нагрузок (смена, месяц, год). Принятие значения  $\beta = 2,5$  оставляет неиспользованным значительный резерв в тепловом износе проводников, особенно для линий с неравномерным графиком нагрузки. Частота же появления нормированной температуры проводника будет близкой к вероятности 0,001.

В некоторых случаях  $\beta = 1,65$ , при этом вероятность превышения реальной нагрузки составляет 0,05, или 5 %, что является приемлемым для инженерных расчетов.

Под вероятностью превышения реальной нагрузки над расчетной понимается доля времени, в течение которого реальная нагрузка может быть больше, чем расчетная.

**Метод вероятностного моделирования графиков нагрузки** предполагает непосредственное изучение вероятностного характера последовательных случайных изменений суммарной нагрузки групп электроприемников во времени и основан на теории случайных процессов, с помощью которой получают автокорреляционную, взаимно корреляционную функции и другие параметры. Исследования графиков работы электроприемников большой единичной мощности, графиков работы цехов и предприятий обуславливают перспективность метода управления режимами электропотребления и выравнивания графиков.

**Расчетно-статистический метод.** Определение расхода электроэнергии по уравнению регрессии:

$$W = a\Pi + bC + cf + \dots d ,$$

где  $a, b, c, \dots, d$  – коэффициенты регрессии расхода электроэнергии на влияющие факторы;  $\Pi, C, f$  – объем выпущенной продукции и прочие влияющие факторы (как правило, технологические).

На практике также могут использоваться и нелинейные уравнения регрессии ([рис. 4.2](#)).

**Расчет электрических нагрузок узлов электрической сети и всего цеха (в соответствии с РТМ 36.18.32.4-92).** Определение расчетных электрических нагрузок ЭП до 1 кВ в целом по предприятию выполняется методом коэффициентов расчетной активной нагрузки (в соответствии с РТМ 36.18.32.492).

Расчет электрических нагрузок ЭП напряжением до 1 кВ производится для каждого узла питания (распределительного пункта, шкафа, сборки, рас-

пределительного шинопровода, щита станций управления, троллея, магистрального шинопровода, цеховой трансформаторной подстанции), а также по цеху, корпусу в целом.

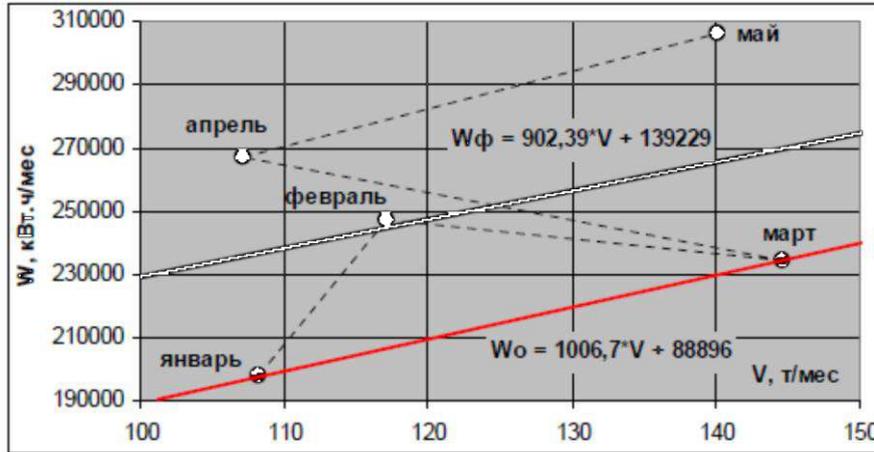


Рис. 4.2. Модели месячного расхода электрической энергии

Таблица 4.2

Форма Ф 636-92

Исходные данные				Расчетные величины			Эффективное число ЭП $n_{\Sigma}$	Коэф. расч. нагрузки, $K_p$	Расчетная мощность			Расчетный ток $I_p$ , А		
по заданию технологов		по справочным данным		$k_n P_n$	$k_n P_n \text{tg} \varphi$	$n p_n^2$			активн. $P_p$ , кВт	реактивн. $Q_p$ , кВАр	полная $S_p$ , кВ·А			
Наименование узлов питания и групп ЭП	Количество ЭП $n$ , шт.	Номинальная мощность, кВт		коэффициент использования $k_n$	коэффициент реактивной мощности $\frac{\cos \varphi}{\text{tg} \varphi}$									
		одно-го ЭП $P_n$	общая $P_n = n p_n$											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
СП-1														
№ 1	1													
№ 2	1													
№ ...	1													
Итого														

Исходные данные для расчета (табл. 4.2, графы 1–6) заполняются на основании полученных данных на проектирование электротехнической части

(графы 1–4) и согласно справочным материалам, в которых приведены значения коэффициентов использования и реактивной мощности для индивидуальных ЭП (графы 5, 6).

Все ЭП группируются по характерным категориям с одинаковыми  $K_{и}$  и  $\text{tg } \varphi$ . В каждой строке указываются ЭП одинаковой мощности.

В графах 2 и 4 указываются данные только рабочих ЭП.

В случаях, когда  $n_{\text{эф}}$  определяется по упрощенному выражению, все ЭП группируются построчно по характерным категориям независимо от мощности ЭП, а в графе 3 указываются максимальная и минимальная мощности ЭП данной характерной группы.

Для многодвигательных приводов учитываются все одновременно работающие электродвигатели данного привода. Если в числе этих двигателей имеются одновременно включаемые (с идентичным режимом работы), то они учитываются в расчете как один ЭП номинальной мощностью, равной сумме номинальных мощностей одновременно работающих двигателей.

Для электродвигателей с повторно-кратковременным режимом работы их номинальная мощность не приводится к длительному режиму ( $\text{ПВ} = 100\%$ ).

При наличии в справочных материалах интервальных значений  $K_{и}$  следует для расчета принимать наибольшее значение. Значения  $K_{и}$  должны быть определены из условия, что вероятность превышения фактической средней мощности над расчетной для характерной категории ЭП должна быть не более 0,05.

В графах 7 и 8 соответственно записываются построчно величины  $K_{и} P_{н}$  и  $K_{и} P_{н} \text{tg } \varphi$ . В итоговой строке определяются суммы этих величин  $\sum K_{и} P_{н}$  и  $\sum K_{и} P_{н} \text{tg } \varphi$ .

Определяется групповой коэффициент использования для данного узла питания:

$$K_{и} = \frac{\sum K_{и} P_{н}}{\sum P_{н}}$$

Значение  $K_{и}$  заносится в графу 5 итоговой строки.

Для последующего определения  $n_{эф}$  в графе 9 построчно определяются для каждой характерной группы ЭП одинаковой мощности величины  $np_{н}^2$  и в итоговой строке – их суммарное значение  $\sum np_{н}^2$ . При определении  $n_{эф}$  по упрощенной формуле графа 9 не заполняется.

Определяется эффективное число электроприемников  $n_{эф}$  следующим образом.

Как правило,  $n_{эф}$  для итоговой строки определяется по выражению:

$$n_{эф} = \frac{\sum P_{н}^2}{\sum np_{н}^2}.$$

При значительном числе ЭП (магистральные шинопроводы, шины цеховых трансформаторных подстанций, в целом по цеху, корпусу, предприятию)  $n_{эф}$  может определяться по упрощенной формуле:

$$n_{эф} = \frac{2\sum P_{н}}{P_{н.мах}}.$$

Найденное по указанным выражениям значение  $n_{эф}$  округляется до ближайшего меньшего целого числа. При  $n_{эф} \leq 4$  рекомендуется пользоваться номограммой. В зависимости от средневзвешенного коэффициента использования и эффективного числа электроприемников определяется и заносится в графу 11 коэффициент расчетной нагрузки  $K_p$ .

Расчетная активная мощность подключенных к узлу питания ЭП напряжением до 1 кВ (графа 12) определяется по выражению:

$$P_p = K_p \sum K_{и} P_{н}.$$

В случаях, когда расчетная мощность  $P_p$  окажется меньше номинальной наиболее мощного электроприемника, следует принимать  $P_p = P_{н.макс}$ .

Расчетная реактивная мощность (графа 13) определяется следующим образом:

Для питающих сетей напряжением до 1 кВ в зависимости от  $n_{эф}$ :

$$- \text{при } n_{эф} \leq 10 \quad Q_p = 1,1 \sum K_{и} P_{н} \operatorname{tg} \varphi,$$

$$- \text{при } n_{эф} > 10 \quad Q_p = \sum K_{и} P_{н} \operatorname{tg} \varphi.$$

Для магистральных шинопроводов и на шинах цеховых трансформаторных подстанций, а также при определении реактивной мощности в целом по цеху, корпусу, предприятию

$$Q_p = K_p \sum K_{и} P_{н} \operatorname{tg} \varphi.$$

К расчетной активной и реактивной мощности силовых ЭП напряжением до 1 кВ должны быть при необходимости добавлены осветительные нагрузки  $P_{р.о}$  и  $Q_{р.о}$ .

Значение токовой расчетной нагрузки, по которой выбирается сечение линии по допустимому нагреву, определяется по выражению (графа 15):

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_{ном}},$$

где  $S_p$  – полная расчетная мощность, кВ·А (графа 14).

Расчет электрических нагрузок ЭП напряжением выше 1 кВ производится с учетом следующих особенностей:

– при получении от технологов коэффициентов, характеризующих реальную загрузку электродвигателей, в графу 5 заносится вместо  $K_{и}$  значение  $K_3$ , в графу 7 – значение  $K_3 P_{н}$ ;

- расчетная нагрузка цеховых трансформаторных подстанций с учетом осветительной нагрузки и потерь в трансформаторах заносится в графы 7 и 8;
- определяется число присоединений 6–10 кВ на сборных шинах РП, (графа 2 итоговой строки), резервные ЭП не учитываются;
- эффективное число ЭП  $n_{эф}$  не определяется, и графы 9 и 10 не заполняются.

В зависимости от числа присоединений и группового коэффициента использования, занесенного в графу 5 итоговой строки, определяется значение коэффициента одновременности  $K_o$ . Значение  $K_o$  заносится в графу 11 (при этом  $K_p = 1$ ).

Расчетная мощность (графы 12–14) определяется по выражениям:

$$P_p = K_o \sum K_{и} P_{н};$$

$$Q_p = K_o \sum K_{и} P_{н} \operatorname{tg} \varphi = P_p \operatorname{tg} \varphi;$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}.$$

Результирующий расчет нагрузок для каждой трансформаторной подстанции и выбор мощности трансформаторов рекомендуется выполнять по форме Ф202-90.

Результирующая нагрузка на стороне высокого напряжения определяется с учетом средств КРМ и потерь мощности в трансформаторах.

### 4.3. Расчет однофазных нагрузок

Однофазные электроприемники, включенные на фазные и междуфазные (линейные) напряжения и распределенные по фазам с неравномерностью не выше 15 % по отношению к общей мощности трехфазных и однофазных

электроприемников в группе, учитываются как трехфазные той же суммарной мощности. В случае превышения указанной неравномерности расчетная нагрузка однофазных электроприемников принимается равной тройной величине нагрузки наиболее загруженной фазы.

Нагрузки отдельных фаз при включении однофазных электроприемников на линейное напряжение определяются как полусуммы нагрузок двух плеч, прилегающих к данной фазе:

$$P_{\text{ном},a} = \frac{P_{\text{ном},ab} + P_{\text{ном},ca}}{2};$$

$$P_{\text{ном},b} = \frac{P_{\text{ном},ab} + P_{\text{ном},bc}}{2};$$

$$P_{\text{ном},c} = \frac{P_{\text{ном},bc} + P_{\text{ном},ca}}{2}.$$

Неравномерность нагрузки по фазам определяется как разность между активными нагрузками наиболее и наименее нагруженных фаз с отнесением ее к наименее нагруженной фазе по формуле, %:

$$\Delta P_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{наиб},\text{ф}} - P_{\text{наим},\text{ф}}}{P_{\text{наим},\text{ф}}} 100.$$

В зависимости от числа однофазных электроприемников и схемы их включения в трехфазную сеть при  $\Delta P_{\text{ном}} > 15\%$  мощность однофазных электроприемников приводится к условной трехфазной номинальной мощности  $\Delta P_{\text{ном.усл}}$  следующими способами:

а) при включении электроприемника на фазное напряжение:

$$P_{\text{ном.усл}} = 3P_{\text{ном},\text{ф}}, \text{ или } P_{\text{ном.усл}} = 3S_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}} \cos \varphi;$$

$$Q_{\text{ном.усл}} = 3Q_{\text{ном.ф}},$$

где  $P_{\text{ном.ф}}$ ;  $Q_{\text{ном.ф}}$  – активная (приведенная к ПВ = 100 %) и реактивная номинальные мощности максимально загруженной активной мощностью фазы;  $S_{\text{пасп}}$  – полная паспортная мощность электроприемника, кВ·А; ПВ – продолжительность включения электроприемника в долях единицы, о. е.;  $\cos \varphi$  – коэффициент мощности электроприемника.

б) при включении электроприемника на линейное напряжение:

$$P_{\text{ном}} = \sqrt{3}P_{\text{ном.л}}; \quad Q_{\text{ном}} = \sqrt{3}Q_{\text{ном.л}},$$

где  $P_{\text{ном.л}}$ ;  $Q_{\text{ном.л}}$  – активная (приведенная к ПВ = 100%) и реактивная номинальные мощности однофазного электроприемника.

Если число неравномерно распределенных по фазам однофазных электроприемников более трех, то условную трехфазную номинальную мощность определяют как утроенное значение номинальной мощности наиболее загруженной фазы. При этом наиболее загруженной фазой считают фазу, имеющую наибольшую среднюю нагрузку от однофазных приемников.

Среднюю нагрузку каждой фазы при смешанном включении однофазных приемников, когда часть приемников включена на фазное, а часть на линейное напряжение, определяют суммированием однофазных нагрузок данной фазы (фаза – ноль) и однофазных нагрузок, включенных на линейное напряжение, приведенных к этой фазе и фазному напряжению с помощью коэффициентов приведения ([табл. 4.3](#)).

Для фазы  $a$  средняя нагрузка

$$P_{\text{см}(a)} = K_{\text{и1}}P_{\text{ном,ab}}P_{ab(a)} + K_{\text{и2}}P_{\text{ном,ca}}P_{ca(a)} + K_{\text{и3}}P_{\text{ном,a}};$$

$$Q_{\text{см}(a)} = K_{\text{и1}}P_{\text{ном,ab}}q_{ab(a)} + K_{\text{и2}}P_{\text{ном,ca}}q_{ca(a)} + K_{\text{и3}}q_{\text{ном,a}},$$

где  $P_{\text{ном},ab}, P_{\text{ном},ca}$  – нагрузки, присоединенные на линейное напряжение соответственно между фазами  $ab$  и  $ca$ ;  $P_{\text{ном},a}, q_{\text{ном},a}$  – нагрузки, присоединенные на напряжение фазы  $a$  (между фазным и нулевым проводами);  $p_{ab(a)}, p_{ca(a)}, q_{ab(a)}, q_{ca(a)}$  – коэффициенты приведения нагрузок, включенных на линейное напряжение к фазе  $a$ ;  $K_{и1}, K_{и2}, K_{и3}$  – коэффициенты использования по активной мощности однофазных приемников различного режима работы.

Таблица 4.3

Коэффициенты приведения однофазной нагрузки

Коэффициент приведения	cos φ							
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$p(ab)a; p(bc)b; p(ca)c$	1,4	1,17	1	0,89	0,8	0,72	0,64	0,5
$p(ab)b; p(bc)c; p(ca)a$	-0,4	-0,17	0	0,11	0,2	0,28	0,36	0,6
$q(ab)a; q(bc)b; q(ca)c$	1,26	0,86	0,58	0,38	0,22	0,09	-0,05	-0,29
$q(ab)b; q(bc)c; q(ca)a$	2,45	1,44	1,16	0,96	0,8	0,67	0,53	0,29

Аналогично определяются средние однофазные нагрузки для фаз  $b$  и  $c$ , находится наиболее загруженная фаза по активной мощности, а затем эквивалентная трехфазная нагрузка сети от однофазных электроприемников.

$$P_{\text{см}} = 3P_{\text{см}(c)}; Q_{\text{см}} = 3Q_{\text{см}(c)}.$$

Средневзвешенное значение  $K_{и}$  определяется для этой же наиболее загруженной фазы по формуле:

$$K_{и} = \frac{P_{\text{см}(c)}}{\frac{P_{\text{ном},bc} + P_{\text{ном},ca}}{2} + P_{\text{ном},c}},$$

а эффективное число электроприемников определяется по формуле:

$$n_{\text{эф}} = \frac{2 \sum P_{\text{ном.}n}}{3 P_{\text{ном.маx}}},$$

где  $\sum P_{\text{ном.}n}$  – сумма номинальных мощностей однофазных электроприемников данного расчетного узла,  $n$  – фактическое число однофазных электроприемников;  $P_{\text{ном.маx}}$  – номинальная мощность наиболее мощного электроприемника однофазного тока.

При совместной работе на трехфазную сеть однофазных и трехфазных приемников электроэнергии расчетную нагрузку узла системы электроснабжения определяют по формуле:

$$P_p = K_{\text{и}} \left( \sum_{i=1}^{n1} P_{\text{см.}i} + \sum_{i=1}^{n2} P_{\text{см.}yi} \right) + \sum_{i=1}^{m1} P_{\text{см.}i} + \sum_{i=1}^{m2} P_{\text{см.}yi},$$

при эффективном числе приемников  $n_{\text{эф}} \leq 10$ :

$$Q_p = 1,1 \left( \sum_{i=1}^{n1} Q_{\text{см.}i} + \sum_{i=1}^{n2} Q_{\text{см.}yi} \right) + \sum_{i=1}^{m1} Q_{\text{см.}i} + \sum_{i=1}^{m2} Q_{\text{см.}yi},$$

при эффективном числе приемников  $n_{\text{эф}} \geq 10$ :

$$Q_p = \sum_{i=1}^{n1} Q_{\text{см.}i} + \sum_{i=1}^{n2} Q_{\text{см.}yi} + \sum_{i=1}^{m1} Q_{\text{см.}i} + \sum_{i=1}^{m2} Q_{\text{см.}yi},$$

где  $n1, m1$  – число приемников трехфазного тока с переменным и постоянным графиками нагрузок;  $n2, m2$  – число приемников однофазного тока с переменным и постоянным графиками нагрузок.

#### 4.4. Расчет электрических нагрузок освещения

Расчетная электрическая нагрузка определяется методом коэффициента спроса. Расчетные формулы метода:

$$P_p = P_{\Sigma} K_c;$$

$$S_p = \frac{P_p}{\cos \varphi};$$

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_{\Sigma}};$$

$$I_p = \frac{S_{p,\phi}}{U_{\phi}},$$

где  $P_{\Sigma}$  – суммарная номинальная мощность источников света цеха, помещения;  $K_c$  – коэффициент спроса (принимается по [табл. 4.4](#));  $I_p$  – расчетный ток;  $S_p$  – расчетная полная трехфазная мощность;  $S_{p,\phi}$  – расчетная полная мощность одной фазы;  $U_{\Sigma}, U_{\phi}$  – номинальные линейное и фазное напряжение сети.

Таблица 4.4

Значения коэффициента спроса

Характеристика освещаемого объекта и электрической сети	$K_c$
<b>Питающая и распределительная сеть освещения</b>	
Для небольших производственных и общественных зданий	1,00
Производственные здания, состоящие из отдельных крупных пролетов	0,95
Административные здания, библиотеки, помещения общественного питания	0,90
Производственные здания, состоящие из нескольких отдельных помещений	0,85
Учебные, лечебные здания и детские учреждения	0,8
<b>Групповая сеть освещения</b>	1,00
<b>Наружное освещение</b>	1,00

Коэффициент мощности принимается по [табл. 4.5](#).

Таблица 4.5

Коэффициент мощности источников света

Источник света	cos φ
Лампы накаливания	1,00
Разрядные лампы с электромагнитными компенсированными ПРА	0,85–0,90
Разрядные лампы с электромагнитными некомпенсированными ПРА	0,45–0,53
Разрядные лампы с электронными ПРА	0,95–1,00
Светодиодные лампы	0,50–0,90

Расчет ведется по направлению от конечных узлов схемы к источнику питания. В групповой сети светильники подключаются на фазное напряжение, и количество светильников по фазам может быть разным, поэтому расчетные мощности определяются отдельно для каждой фазы. Трехфазная расчетная мощность определяется на шинах групповых щитков освещения и выше по схеме по формулам:

$$P_p = 3P_{p.ф};$$

$$P_p = 3P_{p.макс.ф},$$

где  $P_{p.ф}$ ,  $P_{p.макс.ф}$  – соответственно расчетная активная мощность фазы и расчетная максимальная мощность фазы.

### Контрольные вопросы

1. Сколько уровней выделяют в древовидной структуре СЭС?
2. Раскройте статистический метод определения расчетной нагрузки.
3. Раскройте метод упорядоченных диаграмм.
4. Что такое эффективное количество электроприемников в группе? Каковы способы его определения.
5. Как определить расчетную нагрузку для группы из трех или менее электроприемников.
6. Раскройте метод коэффициента спроса.

7. Раскройте метод удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции и удельной плотности нагрузки на единицу производственной площади.

8. Как определить расчетную нагрузку при наличии однофазных электроприемников в группе?

9. Как учесть нагрузочную способность элементов системы электроснабжения при определении расчетной нагрузки статистическим методом?

10. Что понимают под пиковой нагрузкой приемников и потребителей электроэнергии. Как определяется пиковая электрическая нагрузка одиночных электроприемников?

11. Как определить расход электроэнергии по графику нагрузки и уравнению регрессии (расчетно-статистический метод).

12. Раскройте метод коэффициента использования для определения потерь активной электроэнергии.

13. Как определяется расход электроэнергии через максимальную нагрузку?

## 5. СХЕМЫ И ОСНОВНОЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ГЛАВНЫХ ПониЗИТЕЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

### 5.1. Главные понизительные подстанции промышленных предприятий

Каждая главная понизительная подстанция (ГПП) промышленных предприятий содержит распределительные устройства (РУ), содержащие коммутационные аппараты, устройства защиты и автоматики, измерительные приборы, сборные и соединительные шины, вспомогательные устройства [6].

Для напряжений 35 кВ и выше обычно сооружаются открытые распределительные устройства (ОРУ) с применением для отдельных элементов крупноблочных узлов заводского изготовления. Конструкции ОРУ зависят от высшего и низшего напряжений, принятой схемы электрических соединений, наличия на стороне ВН выключателей или заменяющих их короткозамыкателей и отделителей и их размещения по отношению к воздушной линии электропередач и трансформатору.

На ГПП промышленных предприятий РУ напряжением 220–35/10 кВ выполняются открытыми и лишь для производств с сильным загрязнением воздуха при отсутствии свободной территории, при очень низких температурах окружающей среды или в случае особых требований выполняются закрытыми (ЗРУ).

Применение ОРУ уменьшает стоимость и сокращает сроки сооружения подстанций. При замене и демонтаже электрооборудования ОРУ по сравнению с закрытыми более маневренны. Однако обслуживание ОРУ несколько сложнее, чем закрытых. Кроме того, для наружной установки требуется более дорогое оборудование, способное выдерживать прямые атмосферные воздействия.

Конструкция ОРУ должна обеспечивать свободный доступ к силовому трансформатору при эксплуатации. При ремонте трансформатора массой выемной части 10 т и более на подстанции следует предусмотреть установку грузоподъемных устройств для поднятия выемной части из кожуха. Необходимо также обеспечить возможность перевозки трансформатора к месту ремонта.

Соединение трансформатора с РУ низшего напряжения выполняется обычно гибким проводом или токопроводом. При схеме блока «трансформатор – токопровод» токопровод присоединяют непосредственно к выводам трансформатора, и тогда РУ низшего напряжения отсутствует.

РУ 6–10 кВ выполняются как КРУ, так и открытые КРУН (наружной установки).

В КРУН аппараты и приборы управления, учета и защиты, чувствительные к низкой температуре, должны иметь колпаки и обогрев, включаемый при температуре ниже допускаемой для этих аппаратов и приборов.

## 5.2. Схемы главных понизительных подстанций 35–220 кВ

При установке на ГПП двух трансформаторов, питаемых от разных линий электропередачи, возможно применение надежных и высокоэкономичных упрощенных блочных схем электрических соединений подстанций: «линия 35–220 кВ – трансформатор ГПП» и «линия на 35–220 кВ – трансформатор ГПП – токопровод на 6(10) кВ». Эти схемы проектируются без сборных шин и выключателей на стороне первичного напряжения 35–220 кВ, а на стороне вторичного напряжения 6(10) кВ обычно имеют одиночную секционированную систему шин или токопроводы от каждого трансформатора.

На [рис. 5.1](#) приведена схема ГПП напряжением 35–220/6(10) кВ для предприятия средней мощности, получающего электроэнергию от энергосистемы по двум радиальным линиям ВЛ1 и ВЛ2. Трансформаторы  $T1$ ,  $T2$  подключают к линиям только через разъединители  $QS1$ ,  $QS2$  РЛНД (разъединитель с линейным контактом, наружной установки, двухколонковый), так как при радиальной схеме нет необходимости в отделителях. Перемычка между цепями напряжением 35–220 кВ позволяет питать каждый трансформатор не только от своей, но и от другой линии. По условиям ремонта в перемычку включают последовательно два разъединителя ( $QS3$ ,  $QS4$ ). Схему с перемычкой следует применять в тех случаях, когда по условиям работы ГПП возни-

кает необходимость в питании двух трансформаторов от одной линии, например при загрузке трансформаторов свыше 70 %, когда при отключении одного из них нагрузка другого превышает 140 %.

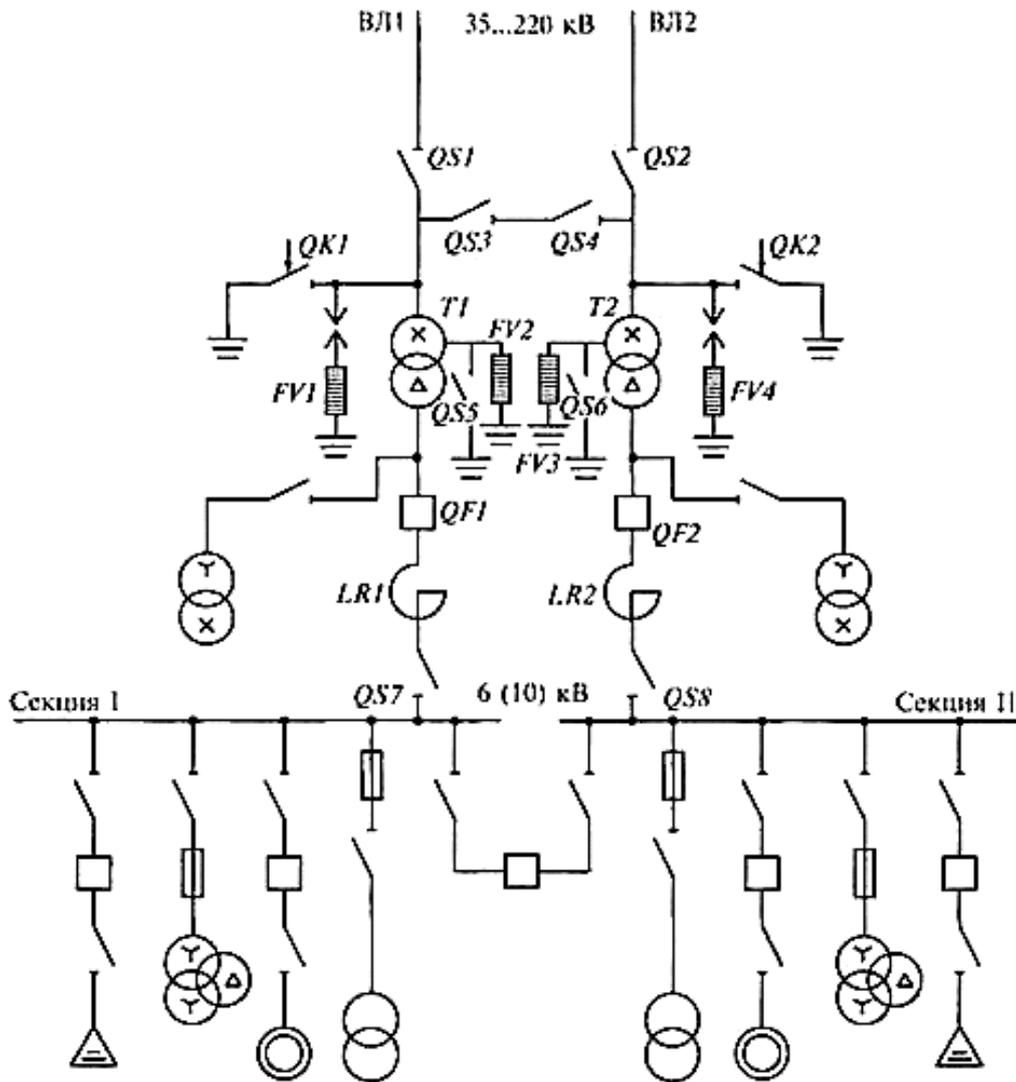


Рис. 5.1. Схема ГПП напряжением 35–220/6(10) кВ с одной секционированной системой шин на стороне напряжения 6–10 кВ

На вводах к трансформаторам устанавливают короткозамыкатели ( $QK1, QK2$ ):

- в сетях с глухозаземленной нейтралью – в одной фазе;
- в сетях с изолированной нейтралью – в двух.

Короткозамыкатели – это аппараты, предназначенные для искусственного создания короткого замыкания, когда ток при повреждениях в трансформаторе может оказаться недостаточным для срабатывания релейной защиты. Короткозамыкатели применяют на подстанциях без выключателей на стороне 35–220 кВ. Они предназначены для наружной установки.

Короткозамыкатель автоматически включается при срабатывании релейной защиты в результате внутренних повреждений в трансформаторе ГПП, к которым нечувствительна защита с помощью головных выключателей линий ВЛ1 и ВЛ2 энергосистемы. При включении короткозамыкателя создается искусственное короткое замыкание на входах высшего напряжения (ВН) трансформатора. На такое короткое замыкание реагирует релейная защита линии в системе и отключает соответствующую линию.

Двухобмоточные трансформаторы ГПП имеют схему соединения обмоток  $Y/-11$  или  $Y_0/-11$ . Включение нейтралей трансформаторов 110–220 кВ на землю осуществляется через однополюсные разъединители  $QS5$ ,  $QS6$  типа ЗОН.  $QS5$  и  $QS6$  включают не всегда. Число включенных на землю нейтралей регулируют так, чтобы ток одно- и двухфазного коротких замыканий на землю не превышал установленные пределы. Для защиты изоляции трансформаторов от пробоя при возникновении перенапряжения в период работы с разземленной нейтралью предусмотрены разрядники  $FV2$ ,  $FV3$  в нейтрали. Кроме того, разрядники устанавливают на вводе ВН трансформаторов во всех трех фазах для защиты от набегающих по линиям волн перенапряжений (на схеме  $FV1$ ,  $FV4$ ).

Трансформаторы ГПП подключают к сборным шинам вторичного напряжения 6(10) кВ через масляные выключатели  $QF1$  и  $QF2$  и разъединители  $QS7$  и  $QS8$ . Если требуется ограничение тока короткого замыкания в сети предприятия напряжением 6(10) кВ, то между выключателями и разъединителями ввода включают трехфазные реакторы  $LR1$ ,  $LR2$ .

К вводам подключаются трансформаторы собственных нужд подстанции для обеспечения питания приемников собственного расхода, в том числе

приводов масляных выключателей, независимо от состояния сборных шин напряжением 6 (10) кВ ГПП.

В зависимости от мощности трансформаторов ГПП используют различные схемы подключения их вводов к сборным шинам РУ 6–10 кВ (рис. 5.2).

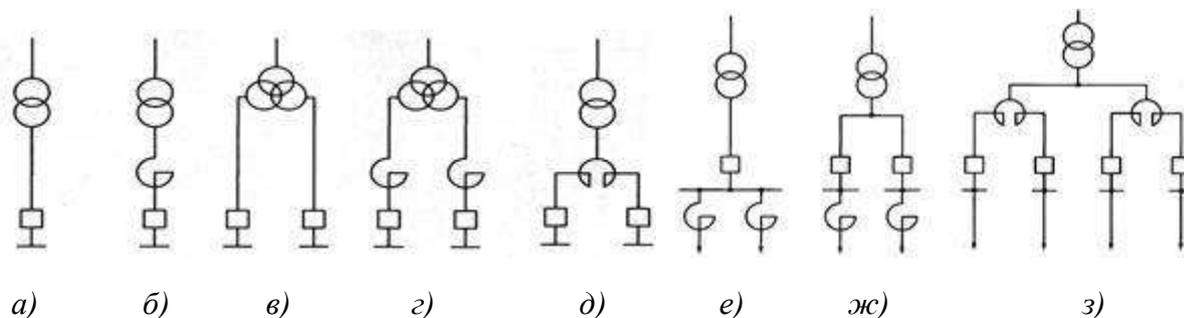


Рис. 5.2. Схемы вводов напряжением 6 (10) кВ трансформаторов на напряжение 35–220 кВ: а – при мощности трансформаторов до 25 МВ·А; б, в – 40 МВ·А; г, д – 63 МВА; е, ж, з – 80 МВ·А

Схему на рис. 5.2, а применяют при установке трансформаторов мощностью до 25 МВ·А. При большей мощности трансформаторов требуются мероприятия по ограничению токов короткого замыкания (КЗ). При мощности трансформаторов 40 МВ·А применяют схемы, показанные на рис. 5.2, б и в), а при мощности трансформатора 63 МВ·А рекомендуются схемы г и д. Если мощность трансформатора достигает 80 МВ·А, то рекомендуют схемы е, ж и з.

Сборные шины напряжением 6 (10) кВ распределительных устройств ГПП секционируют выключателем. Благодаря этому при повреждении или ремонте сборных шин отключается только одна секция, и все основные электроприемники получают питание от другой секции. При внезапном исчезновении напряжения на одной секции, например при отключении питающей линии, с помощью устройств АВР включается секционный выключатель, обеспечивая питание секции. Секционный выключатель выбирают по нагрузке одной секции шин, а выключатель ввода трансформатора – по нагрузке двух секций в послеаварийном режиме ГПП. Для ограничения токов короткого замыкания секционный выключатель нормально отключен.

На [рис. 5.3](#) приведена схема ГПП предприятия средней мощности, получающего электроэнергию по отпайкам от двух магистральных линий. В этом случае необходимы отделители  $QR1$ ,  $QR2$  для отключения поврежденного трансформатора ГПП от магистрали. Отключение отделителя происходит автоматически в период бестоковой паузы между моментом отключения головного выключателя магистрали после включения короткозамыкателя ( $QK1$ ,  $QK2$ ) и моментом повторного включения головного выключателя линии под действием устройств АПВ.

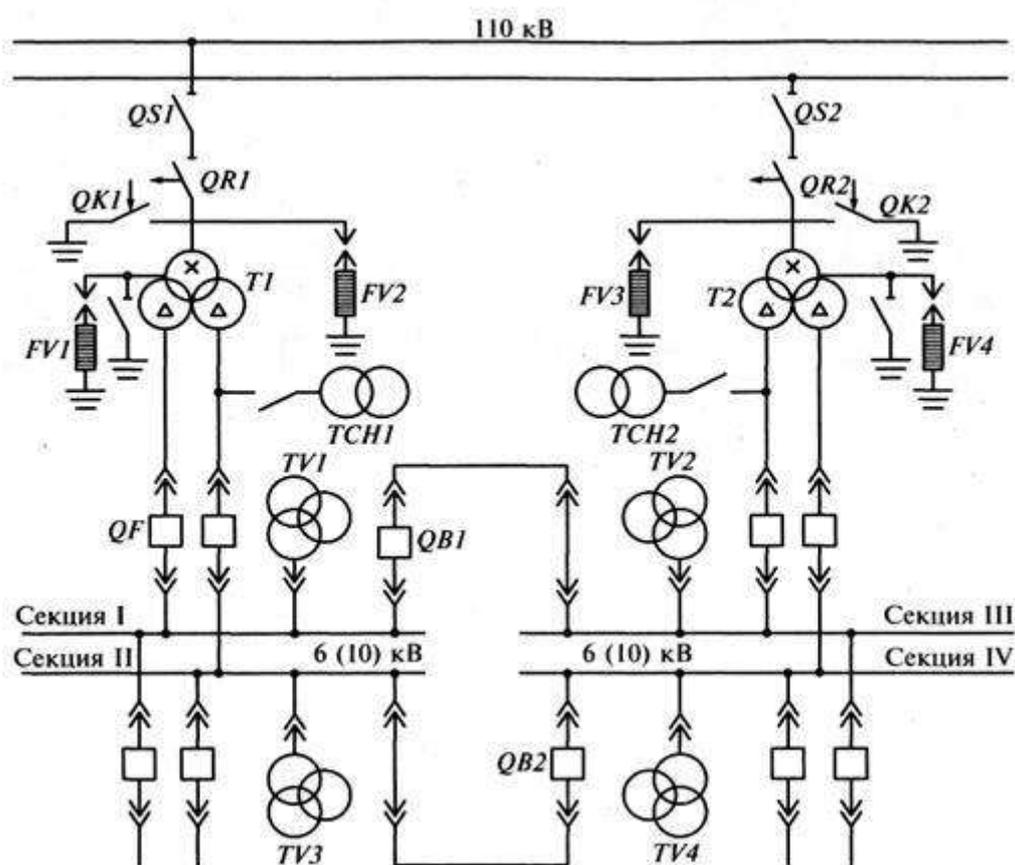


Рис. 5.3. Схема ГПП напряжением 35–220/6 (10) кВ с четырьмя секциями сборных шин напряжением 6 (10) кВ

$TCH1$ ,  $TCH2$  – трансформаторы собственных нужд;  $TV1$ – $TV4$  – трансформаторы напряжения.

Трансформаторы мощностью 25 МВ·А и более имеют расщепленную вторичную обмотку. Расщепление обмотки представляет собой эффективный

способ ограничения токов короткого замыкания в электросети предприятия. Для этой же цели применяется групповое реактирование обычными и сдвоенными реакторами, включаемыми в цепь выводов трансформатора. Применявшееся ранее индивидуальное реактирование каждой отходящей линии не рекомендуется по соображениям компоновки и экономии оборудования.

В схеме каждая вторичная обмотка обоих трансформаторов подключена к отдельной секции шин напряжением 6 (10) кВ. Все четыре секции одной системы сборных шин работают отдельно, но при выходе из работы одного трансформатора вся нагрузка автоматически переводится на другой включением секционных выключателей  $QB1$  и  $QB2$  под действием устройств АВР. В распределительном устройстве данной подстанции установлены ячейки КРУ с масляными выключателями  $QF$  напряжением 6 (10) кВ. Выкатные масляные выключатели имеют втычные контакты, поэтому нет необходимости в разъединителях. Конденсаторные батареи, измерительные трансформаторы напряжения предусматриваются на каждой секции шин, так как их режим регулируется самостоятельно и напряжения секций могут существенно различаться.

Конденсаторные батареи и измерительные трансформаторы напряжения предусматриваются на каждой секции шин. Если передаваемая от одной секции мощность  $25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ , а потребители расположены по одной трассе, то применяют магистральную схему питания с шинами и гибкими токопроводами напряжением 6–10 кВ, выполняющими роль сборных шин и распределительных линий.

Кроме того, используются и другие схемы ГПП:

– для открытых ГПП 35–110 кВ без нагрузок 1 категории с трансформаторами до  $6,3 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  применяют схему с разъединителями и стреляющими предохранителями 35–110 кВ на вводе ВН (без выключателей или отделителей с короткозамыкателями на первичном напряжении);

– при расположении ГПП на небольшом расстоянии от районных подстанций или электростанции (несколько км) на вводе 35–220 кВ к силовым трансформаторам устанавливают только разъединители. Функции защиты

и отключения трансформатора или линии передаются головному выключателю питающей линии;

– в зонах повышенной загрязненности применяют самые простые схемы коммутации с минимумом аппаратуры и изоляции наружной установки:

- а) кабельный ввод линии в бак трансформатора;
- б) защита на головном выключателе;
- в) закрытые РУ на 35–110 кВ и 6–10 кВ.

Разработаны закрытые подстанции без выключателей высшего напряжения с установкой трансформаторов мощностью  $2 \times 25$  МВ·А и  $2 \times 40$  МВ·А.

Комплектные трансформаторные подстанции КТП–110/6–20 с короткозамыкателями и отделителями на высшем напряжении представляют ОРУ напряжением 110 кВ и комплектуются короткозамыкателями, отделителями, разъединителями и трансформаторами типов: ТМН–2500/110, ТМН–6300/110 и КРУН из шкафов серии К-ХШ.

Подстанции КТП-35/6–10 кВ выполняются с одним или двумя трансформаторами. По типу аппарата на стороне высокого напряжения выделяются подстанции: со стреляющими предохранителями; с короткозамыкателями и отделителями; с масляными выключателями.

### 5.3. Схемы цеховых электрических сетей

Внутрицеховые сети выполняются по радиальной, магистральной или смешанной схемам. Каждый вид схемы имеет свою наиболее целесообразную область применения [20, 4].

Магистральные схемы широко применяются в помещениях с нормальной средой и равномерным распределением технологического оборудования. При этом нередко трансформатор цеховой подстанции не имеет распределительного щита на низкой стороне, и магистральная сеть выполняется по схеме блока трансформатор – магистраль (рис. 5.4). Магистральную сеть наиболее просто

выполнить с использованием шинопроводов. Сети, выполненные из шинопроводов, по гибкости и универсальности являются наиболее совершенными.

В качестве магистральных шинопроводов используется комплектный шинопровод типа ШМА, в качестве распределительного – ШРА.

В цехах, где имеется несколько подстанций, для повышения надежности электроснабжения магистральные сети питают, как правило, от нескольких подстанций и секционируют нормально отключенными автоматическими выключателями ([рис. 5.5](#)).

Для питания крановых двигателей и другого внутрицехового электро-транспорта применяют троллейные линии, выполненные троллейными шинопроводами или троллеями – голыми проводами, чем обеспечивается контакт с токосъемником в любом месте линии.

Радиальные схемы питания применяются в помещениях с любой средой. От ТП отходят линии, питающие непосредственно мощные ЭП или распределительные шкафы (пункты) – ШР и силовые шкафы, от которых отдельными линиями питают более мелкие ЭП ([рис. 5.6](#)). В качестве распределительных используются шкафы типа ШР11 (СП62 и СПУ62) с вводным рубильником и предохранителями на 6–8 присоединений к ЭП, а также новые серии распределительных шкафов ПР24 и ПР11, укомплектованные автоматическими выключателями АЗ700 и АЕ2000.

Распределительные шкафы обычно запитываются от цеховой ТП (КТП) кабелями, марка и способ прокладки которых определяются характером среды в помещении.

Достоинство радиальной схемы питания по сравнению с магистральной заключается в более высокой надежности электроснабжения и удобстве эксплуатации. При коротких замыканиях (КЗ) прекращают работу один или несколько ЭП, подключенных к поврежденной линии, остальные продолжают работать.

Все потребители могут потерять питание только при повреждении на сборных шинах КТП, что маловероятно вследствие достаточно надежной конструкции шкафов КТП.

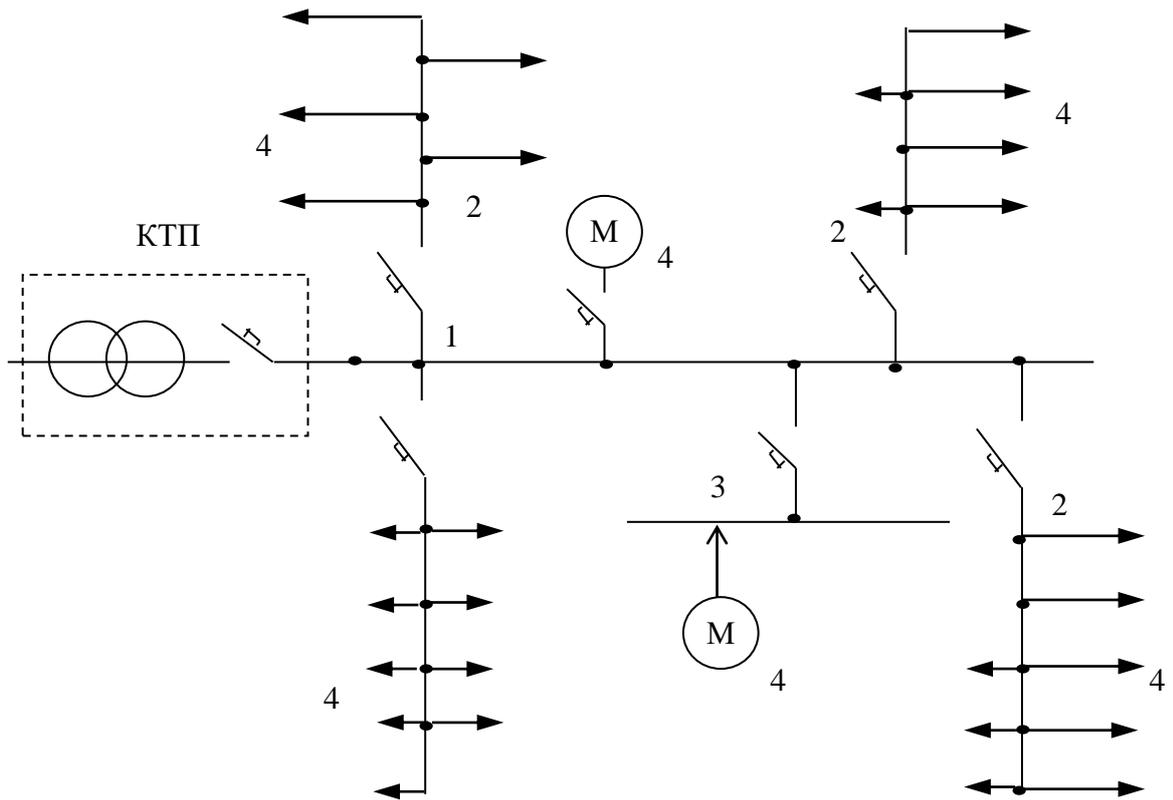


Рис. 5.4. Магистральная схема цеховой электрической сети:  
 1 – магистральный шинопровод; 2 – распределительный шинопровод; 3 – троллейный шинопровод; 4 – электроприемники

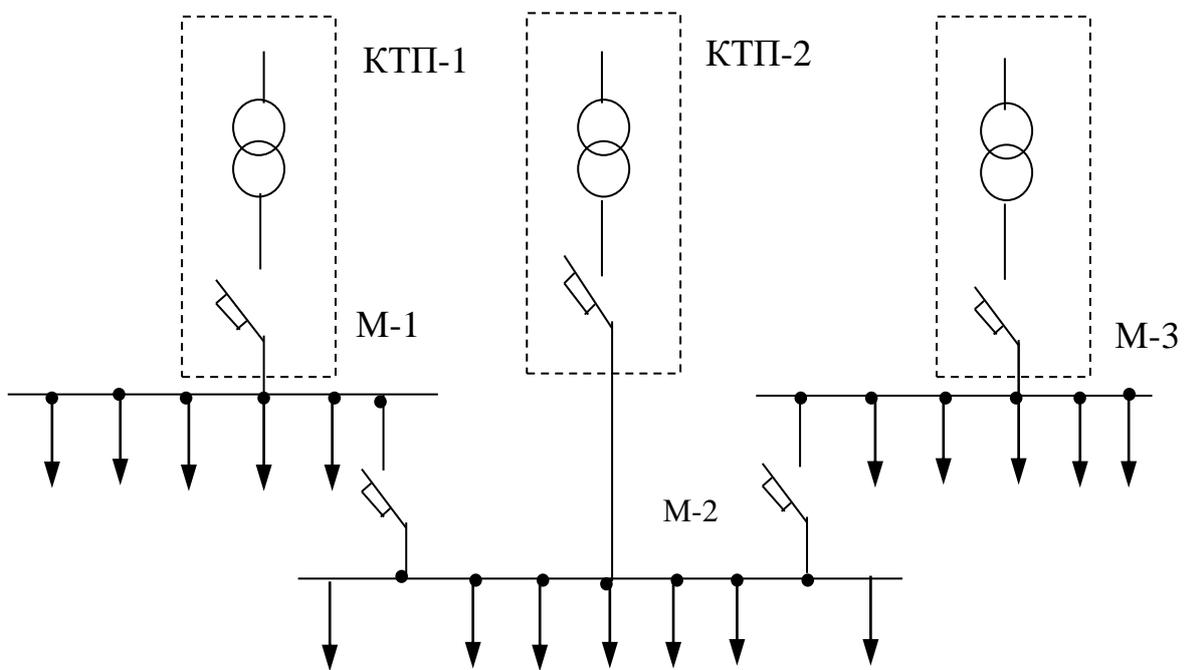


Рис. 5.5. Взаимное резервирование магистралей

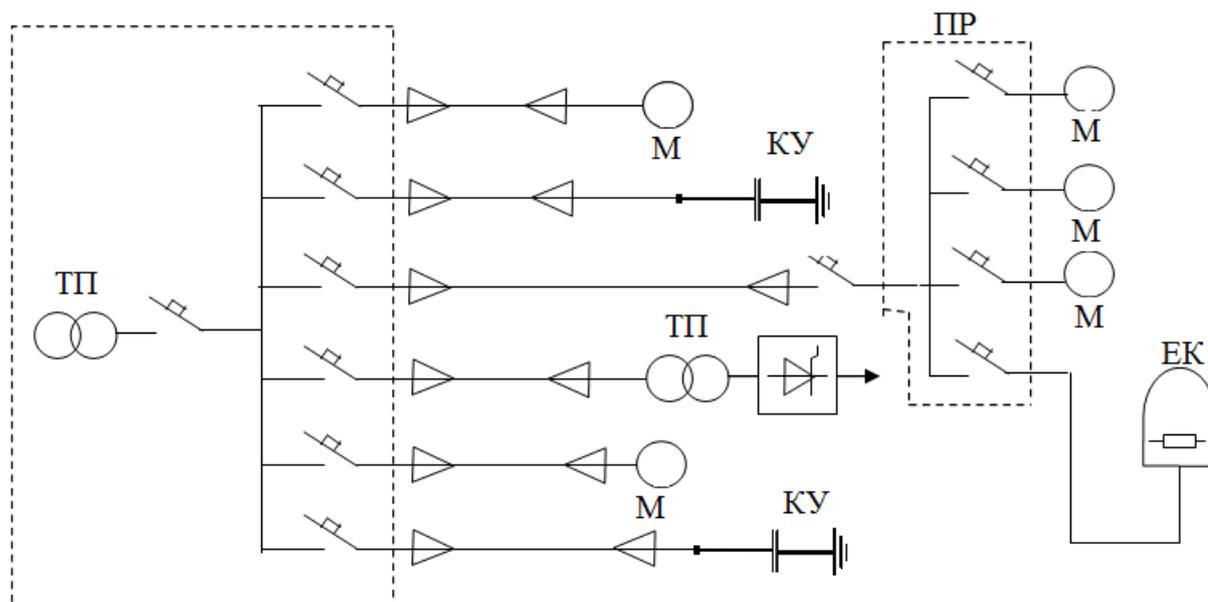


Рис. 5.6. Радиальная схема цеховой электрической сети:

М – электродвигатели; ПР – шкафы распределительной серии ПР8501; ЕК – электропечь; КУ – комплектная конденсаторная установка

Наличие на КТП и вблизи ее коммутационно-защитных аппаратов отдельных присоединений позволяет легче решать задачи автоматизации управления в цеховой электрической сети, чем при рассредоточенных аппаратах, что имеет место в магистральной схеме.

Недостаток радиальной схемы – это большая ее стоимость в сравнении с магистральной (вследствие большого числа линий к ЭП), увеличение протяженности цеховой сети, а следовательно, увеличение расхода цветного металла и количества коммутационно-защитных аппаратов.

В чистом виде магистральные или радиальные схемы применяются редко. На практике наибольшее распространение получили смешанные схемы. В этих схемах ШР часто запитываются не от щита ТП, а от магистрального шинпровода. Мощные ЭП обычно присоединяются непосредственно к щиту ТП или магистральному шинпроводу (ШМА).

Для дистанционного управления ЭП могут использоваться станции управления, представляющие комплекты совместно установленных аппаратов

управления, защиты, сигнализации и блокировки. Как правило, станции управления выполняются открытыми, но могут поставляться и в защищенном исполнении – в шкафах. Щиты станции управления ЩСУ обычно устанавливаются в специальных помещениях, называемых помещениями станции управления (ПСУ).

#### 5.4. Картограмма нагрузок

Главная понизительная подстанция (ГПП), главная распределительная подстанция (ГРП) или трансформаторная подстанция (ТП) являются одним из основных звеньев системы любого промышленного предприятия. Оптимальное расположение подстанции на территории промышленного предприятия – важнейший вопрос при построении рациональных систем электроснабжения. Рациональное размещение ГПП, ГРП или ТП на территории промышленного предприятия обеспечивает оптимальные технико-экономические показатели системы электроснабжения, то есть обеспечивает минимум приведенных годовых затрат. Для определения местоположения ГПП, ГРП или ТП при проектировании системы электроснабжения на генеральный план промышленного предприятия наносится картограмма электрических нагрузок ([рис. 5.7](#)), которая представляет собой размещение на генплане окружностей, причем площади, ограниченные этими окружностями, равны расчетным нагрузкам цехов в выбранном масштабе. Для каждого цеха наносится своя окружность, центр которой совпадает с центром нагрузок цеха.

Радиус окружности определяется из выражения:

$$r_i = \sqrt{\frac{S_i}{\pi m}},$$

где  $S_i$  – мощность  $i$ -го цеха;  $m$  – масштаб для определения площади круга.

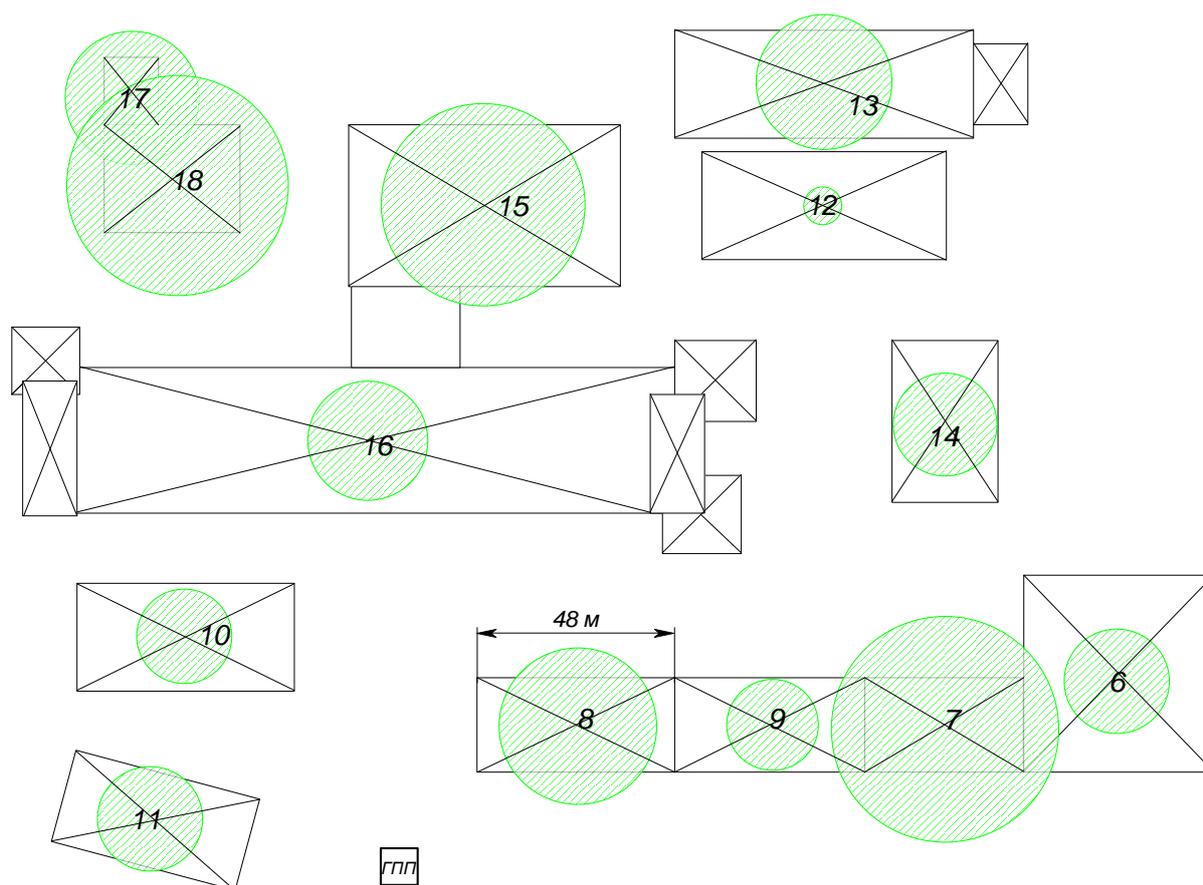


Рис. 5.7. Картограмма электрических нагрузок

ГПП, ГРП или ТП следует располагать в центре или как можно ближе к центру нагрузок, так как это позволяет приблизить высокое напряжение к центру потребления электроэнергии, значительно сократить протяженность распределительных сетей высокого напряжения завода и цеховых электрических сетей низкого напряжения, уменьшить расход проводникового материала, снизить потери электроэнергии.

В настоящее время существуют математические методы, которые позволяют аналитическим путем определить центр электрических нагрузок (ЦЭН) отдельных цехов и всего промышленного предприятия.

Если считать нагрузки цеха равномерно распределенными по его площади, то центр нагрузок цеха можно принять совпадающим с центром тяжести фигуры, изображающей его в плане. Если учитывать действительное распределение нагрузок в цехе, то центр нагрузок будет совпадать с центром тяжести масс.

Координаты ЦЭН можно определить по следующим формулам:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i x_i)}{\sum_{i=1}^n S_i}; \quad y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i y_i)}{\sum_{i=1}^n S_i},$$

где  $S_i$  – мощность  $i$ -го электроприемника,  $x_i$  и  $y_i$  – его координаты (оси ординат можно наносить на план цеха или завода произвольно).

При нахождении ЦЭН предприятия под  $S_i$  подразумевают расчетную нагрузку  $i$ -го цеха, а под  $x_i$  и  $y_i$  – координаты ЦЭН  $i$ -го цеха. Так как ЦЭН каждого цеха не рассчитываются, то приближенно полагаем, что ЦЭН каждого цеха расположен в геометрическом центре плоской фигуры цеха.

Местоположение ГПП уточняют с учетом всех ограничений по прокладке электрических сетей и ограниченности территории и при этом сравнивают приведенные затраты на их сооружение при различном месторасположении подстанции.

### 5.5. Схемы питания осветительных установок

**Общие сведения.** В соответствии с [10] питание электрического освещения осуществляется, как правило, совместно с силовыми электроприемниками от общих трехфазных силовых трансформаторов с глухозаземленной нейтралью и номинальным напряжением на низкой стороне, равным 400/230 В. Номинальное напряжение в таких сетях составляет 380/220 В.

Установки освещения делятся на внутренние и наружные. Установки внутреннего освещения предназначены для освещения производственных, административных, жилых и общественных зданий и помещений. Установки наружного освещения предназначены для освещения территорий предприятий и учреждений, городов, поселков и т. д.

Установки внутреннего освещения делятся на установки рабочего и аварийного освещения. Рабочее освещение служит для освещения помеще-

ний в целом и рабочих поверхностей. Аварийное освещение может быть освещением безопасности и эвакуационным освещением.

Освещение безопасности предназначено для продолжения работы при аварийном отключении рабочего освещения. Светильники рабочего освещения и освещения безопасности должны получать питание от независимых источников питания. Эвакуационное освещение предназначено для обеспечения безопасной эвакуации людей по основным проходам, оснащенным световыми указателями «выход», и предусматривается в производственных помещениях, где может одновременно находиться более двадцати человек.

При питании внутреннего освещения от КТП нецелесообразно использовать мощные линейные автоматические выключатели для защиты линий питающей сети, так как их номинальные данные могут быть значительно выше мощности линий. Поэтому вблизи КТП устанавливаются магистральные щитки с автоматическими выключателями, от которых питаются групповые щитки.

Схемы питания электрического освещения должны обеспечивать:

- 1) необходимую степень надежности электроснабжения;
- 2) безопасность, простоту, удобство эксплуатации и управления;
- 3) экономичность осветительной установки.

Электрические сети освещения делятся на питающие, распределительные и групповые сети.

Питающая осветительная сеть – сеть от РУ подстанции до вводного устройства (ВУ), вводно-распределительного устройства (ВРУ) или главного распределительного щита (ГРЩ).

Распределительная сеть – сеть от ВУ, ВРУ, ГРЩ до распределительных пунктов, щитков и пунктов питания наружного освещения.

Групповая сеть – сеть от распределительных пунктов, щитков до светильников, штепсельных розеток и других электроприемников.

**Питающая и распределительная сети освещения.** Питание установок внутреннего освещения рекомендуется выполнять от распределительных устройств подстанций, щитов, магистральных и распределительных шинопроводов самостоятельными линиями, выполненными проводами или кабелями.

Сети наружного освещения могут получать питание от распределительных устройств подстанций, распределительных пунктов и вводно-распределительных устройств и выполняются кабельными или воздушными линиями (с использованием самонесущих изолированных проводов). Линии наружного освещения могут прокладываться на существующих опорах, принадлежащих электросетевым организациям, по опорам контактной сети электрифицированного транспорта (с помощью кабельных линий или самонесущих изолированных проводов), на инженерных сооружениях (мостах, транспортных эстакадах и т. д.).

Питающие и распределительные сети внутреннего и наружного освещения выполняются трехфазными четырех- или пятипроводными в зависимости от используемой системы заземления.

Рабочее освещение рекомендуется питать по линиям, не связанным с силовыми установками. Все виды освещения допускается питать от общих линий с электросиловыми установками или от силовых распределительных пунктов, за исключением сетей в производственных зданиях без естественного освещения. В местах присоединения линий питающей осветительной сети к линии питания электросиловых установок или к силовым распределительным пунктам должны устанавливаться аппараты защиты и управления. Если питающая и распределительная осветительные сети выполняются шинопроводами, групповые щитки могут не предусматриваться. Вместо них могут применяться аппараты защиты и управления для питания групп светильников. Применение для питания рабочего освещения, освещения безопасности и эвакуационного освещения общих групповых щитков не допускается. Для освещения безопасности и эвакуационного освещения допускается использование общих щитков.

На [рис. 5.8](#) приведена схема питающей и распределительной сетей внутреннего освещения. С первой секции шин 0,4 кВ двухтрансформаторной подстанции получает питание щит освещения, с шин которого по маги-

стральной или радиальной схемам запитываются групповые щитки рабочего освещения. Щиток аварийного освещения получает питание от второй секции шин 0,4 кВ ТП. Аварийное освещение должно включаться автоматически при аварийном отключении рабочего освещения.

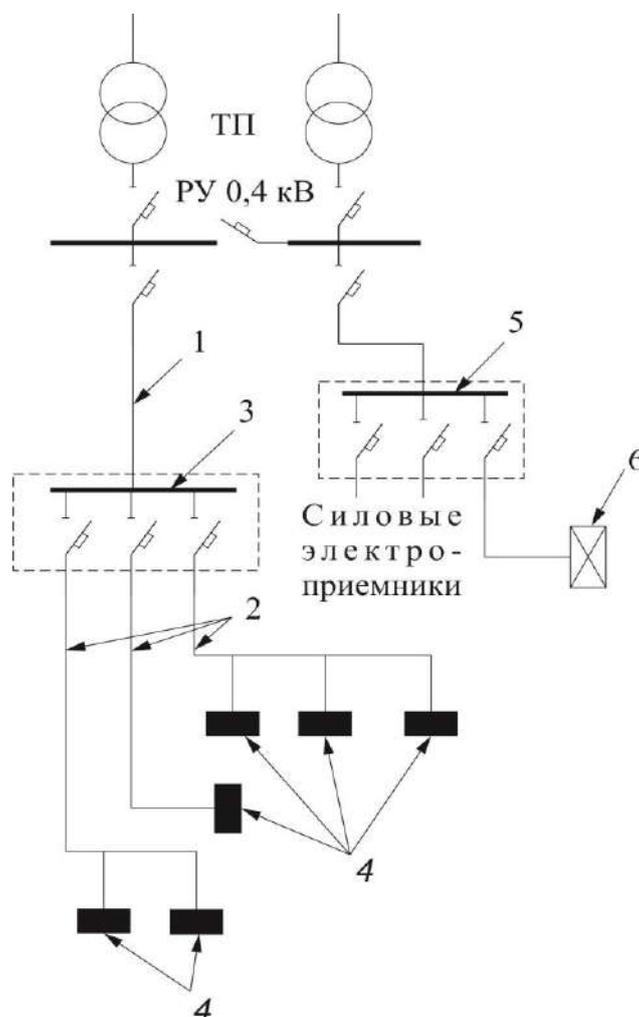


Рис. 5.8. Схема питающей и распределительной сети освещения:

1 – питающая сеть; 2 – распределительная сеть; 3 – щит рабочего освещения; 4 – групповые щитки рабочего освещения; 5 – распределительный пункт; 6 – щиток аварийного освещения

На [рис. 5.9](#) показана возможность подключения рабочего освещения к головному участку магистрального шинпровода. Питание аварийного освещения в этом случае рекомендуется выполнять от другой ТП или иного независимого источника питания.

Схема перекрестного питания освещения от двух ТП приведена на [рис. 5.10](#).

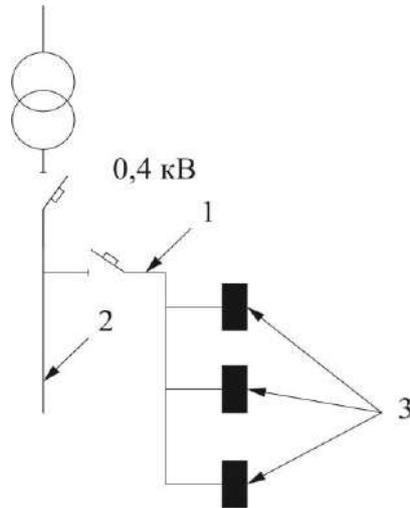


Рис. 5.9. Схема питания сети освещения от шинопровода:

1 – питающая сеть; 2 – шинопровод; 3 – групповые щитки рабочего освещения

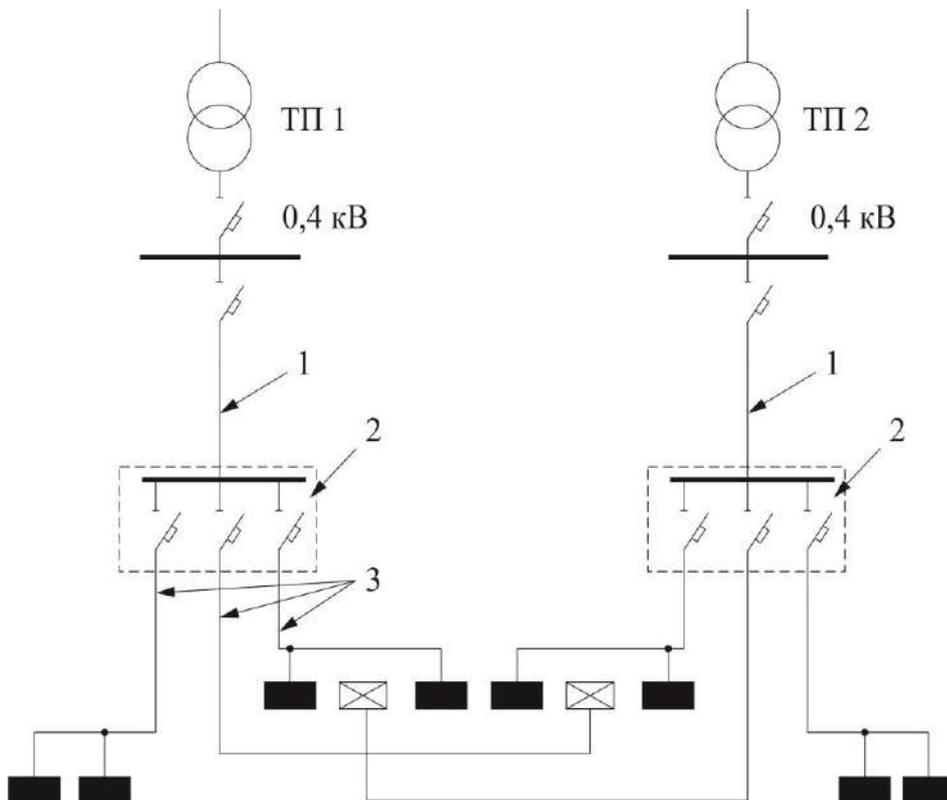


Рис. 5.10. Схема перекрестного питания освещения от двух трансформаторных подстанций:

1 – питающая сеть освещения; 2 – щит освещения; 3 – распределительная сеть освещения

Рабочее и аварийное освещение получают питание самостоятельными линиями от разных трансформаторных подстанций. Аварийное освещение в производственных зданиях допускается подключать к распределительным пунктам, шинопроводам, за исключением производственных зданий без естественного освещения.

Групповая сеть освещения предназначена для питания отдельных групп светильников, штепсельных розеток и стационарных ЭП небольшой мощности. Сеть выполняется в одно-, двух- или трехфазном исполнении. Нагрузка по фазам групповой сети должна распределяться равномерно.

Схема однофазной трехпроводной групповой сети приведена на [рис. 5.11](#).

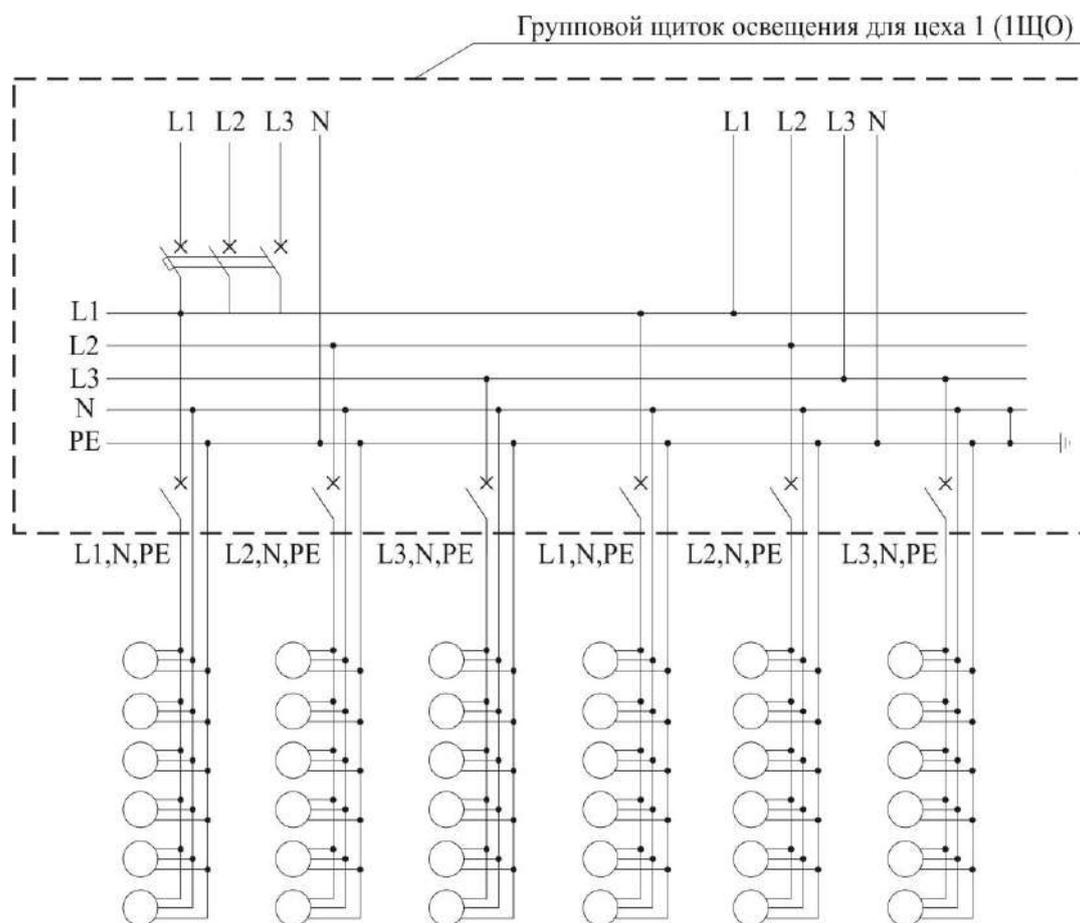


Рис. 5.11. Принципиальная схема групповой сети освещения

В соответствии с ПУЭ во всех зданиях линии групповой сети, прокладываемые от групповых, этажных и квартирных щитков до светильников об-

щего освещения, штепсельных розеток и стационарных ЭП, должны выполняться трехпроводными (фазный L, нулевой рабочий N и нулевой защитный РЕ-проводники) или пятипроводными (L1, L2, L3, N, РЕ-проводники).

### **Контрольные вопросы**

1. Приведите пример схемы ГПП напряжением 35–220/6 (10) кВ с одной секционированной системой шин на стороне напряжения 6–10 кВ.
2. Опишите схемы вводов напряжением 6 (10) кВ трансформаторов на напряжение 35–220 кВ.
3. Приведите пример схемы ГПП напряжением 35–220/6 (10) кВ с четырьмя секциями сборных шин напряжением 6 (10) кВ.
4. Раскройте особенности построения магистральных и радиальных электрических сетей.
5. Перечислите достоинства и недостатки радиальных сетей.
6. Перечислите достоинства и недостатки магистральных сетей.
7. Как выполняется взаимное резервирование?
8. Что понимается под центром электрических нагрузок?
9. Что определяет оптимальное расположение подстанции на территории промышленного предприятия?

## 6. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ СЕТЕЙ 6–110 кВ

### 6.1. Построение сети 6–10 кВ

Схема сети должна выполняться с условием, что сборные шины 6–10 кВ центров питания не включаются в нормальном и послеаварийном режимах на параллельную работу через сеть 10 кВ [13].

Целесообразность сооружения РП должна подтверждаться технико-экономическим обоснованием. Нагрузка РП на расчетный срок должна составлять 5 МВт для сети 10 кВ и 3 МВт – для сети 6 кВ.

РП следует выполнять с одной секционированной системой сборных шин с питанием по взаиморезервируемым линиям, подключенным к разным секциям, на секционном выключателе должно быть АВР.

Для электроснабжения потребителей суммарной мощностью до 100 кВ·А рекомендуется построение сети с использованием СТП.

В городах должны преимущественно использоваться кабельные линии с постепенной заменой воздушных линий на кабельные линии, в том числе с использованием универсальных кабелей с прокладкой по опорам.

Длину отходящих ЛЭП 6–10 кВ от РУ центра питания рекомендуется определять с учетом технико-экономического обоснования, исходя из условий наиболее удаленных потребителей. Она должна лежать в пределах (без учета ответвлений):

для воздушных ЛЭП:

- 6 кВ – от 10 до 15 км;
- 10 кВ – от 15 до 20 км;

для кабельных КЛ:

- 6 кВ – до 7 км;
- 10 кВ – до 10 км.

В городской и сельской местности протяженность ВЛ (КЛ) варьируется в зависимости от типа применяемой конструкции ТП. Увеличение длины ли-

ний по сравнению с приведенными данными допускается при наличии технико-экономического обоснования.

На ВЛ 6–10 кВ рекомендуется использовать самонесущий изолированный провод. Сечение провода определяется расчетом.

В городских сетях следует использовать кабельные линии, воздушные линии в перспективе должны заменяться на кабельные линии. В сельской местности в основном используются воздушные линии, рекомендуется установка СТП 10/0,4 кВ.

Основным принципом построения сетей с ВЛ 6–10 кВ является магистральный принцип, предусматривающий построение (формирование) магистральных линий электропередачи в разветвленной сети между двумя центрами питания через точку токораздела (пункт автоматического включения резерва), с обеспечением нормированного качества напряжения всех потребителей при отключении одного из центров питания в послеаварийном режиме. Под магистралью также следует понимать линии электропередачи без ответвлений, отходящие от секций шин РУ 6–20 кВ ПС 35–110 (150) кВ до РП или РТП 6–20 кВ.

Провод на магистрали должен быть выполнен одним сечением.

Магистральный принцип создает условия для обеспечения надежного электроснабжения электроприемников с разными требованиями к надежности.

К магистрали линии присоединяются трансформаторные подстанции. При наличии на магистралях ответвлений (отпаяк) рекомендуется, в целях повышения надёжности электроснабжения потребителей, секционировать магистрали управляемыми автоматическими выключателями. Также, в зависимости от протяжённости ответвлений (отпаяк) и подключенной нагрузки, они могут быть оборудованы автоматическими отключающими коммутационными аппаратами, в том числе выключателями.

На секционных разъединителях, установленных на магистральной линии, должны быть заземляющие ножи в обе стороны.

На границе балансовой принадлежности между потребителями и электроснабжающей организацией независимо от длины ответвления должны устанавливаться выключатели или разъединители. На разъединителях должны быть заземляющие ножи в сторону ответвления.

В сетях с воздушными линиями наряду с использованием магистральных схем при соответствующем технико-экономическом обосновании могут применяться радиальные схемы.

В сетях с кабельными линиями рекомендуется применять двухлучевую или петлевую схему с целью обеспечения надежности электроснабжения потребителей.

Выбор схемы построения следует осуществлять на основании технико-экономического анализа.

Основными принципами построения КЛ 6–10 кВ в городах следует принимать петлевые или многолучевые схемы (два и более луча) со связанными лучами в петлевую схему (смешанные схемы), как правило, с ручным включением резервной линии.

В крупных городах (с числом жителей один миллион и более) рекомендуется применять двухлучевые схемы с автоматическим включением резерва.

## **6.2. Построение сети 35, 110 (150) кВ**

Рекомендуемые максимальные длины воздушных и кабельных линий электропередачи в зависимости от класса напряжений и плотности населения (для плотно населенных районов, для районов с малой плотностью населения):

- для ВЛ 110 (150) кВ – до 80 км;
- КЛ 110 (150) кВ – до 20 км;
- ВЛ 35 кВ – до 50–60 км;
- КЛ 35 кВ – до 10 км.

Увеличение длины линий по сравнению с вышеприведенными данными допускается при наличии технико-экономического обоснования.

В условиях крупных городов должны преимущественно использоваться кабельные линии электропередачи, особенно для высших классов напряжения, и сооружаться подстанции глубокого ввода. Для размещения электросетевого хозяйства должно активно осваиваться подземное пространство.

Ограниченная территория и стесненные условия для выбора трасс ВЛ и площадок ПС, повышенные архитектурно-эстетические требования к сооружаемым элементам сети в условиях городов диктуют необходимость применения простых схем ПС, сооружение закрытых ПС, КЛ и двухцепных и многоцепных ВЛ.

Схема электроснабжения в крупных городах и мегаполисах должна обеспечивать минимальное время восстановления электроснабжения потребителей при возникновении аварийных режимов посредством применения сетевого резервирования, секционирования сети, применения быстродействующих АВР.

В качестве основных линий в сетях 35, 110 (150) кВ следует применять взаимно резервируемые линии электропередачи 35, 110 (150) кВ с автоматическим вводом резервного питания от разных подстанций или с разных шин одной подстанции, имеющей двухстороннее независимое питание.

При сооружении линии электропередачи напряжением 35, 110 (150) кВ следует применять принцип преимущественного сооружения или целиком в кабельном, или в воздушном исполнении. Сооружение кабельно-воздушных линий электропередачи допускается по отдельным обоснованиям.

Эксплуатацию новых и реконструируемых линий электропередачи следует рассчитывать на срок службы по элементам подстанций и ВЛ не менее 50 лет, а КЛ – 30 лет.

Схемы подстанций должны выбираться на основании проектной работы и соответствующего технико-экономического расчета.

К вновь сооружаемым подстанциям напряжением 35, 110 (150) кВ допускается присоединять не более четырех линий электропередачи 110 (150)

или 35 кВ к каждой секции. Увеличение числа присоединений возможно при дополнительном обосновании (развитие сети 110 (150) кВ, необходимость технологического присоединения крупного потребителя).

Места расположения ПС 35, 110 (150) кВ, плотность их установки, их мощность и рабочее напряжение на высокой стороне должны выбираться с максимальным охватом территории для электроснабжения, в зависимости от размещения центров нагрузки. При этом необходимо учитывать, чтобы длина отходящих фидеров по магистрали для 6 кВ не превышала 7 км, для 10 кВ не превышала 10 км, для 20 кВ не превышала 17 км.

Подключение подстанций 35, 110 (150) кВ к существующей сети может производиться по одноцепным, двухцепным линиям, а также линиям электропередачи с большим количеством цепей с учетом требований по надежности электроснабжения и категоричности потребителей, подключенных к данной ПС.

При развитии сетей 35 кВ рекомендуется:

- не допускать сооружения новых протяженных ЛЭП 35 кВ параллельно существующим ЛЭП 110 (150) кВ, так как они приводят к шунтированию сети более высокого класса напряжения;
- оценивать целесообразность сооружения новых ВЛ 35 кВ в габаритах 110 (150) кВ;
- рассматривать возможность перевода существующих ВЛ и ПС 35 кВ на напряжение 110 (150) кВ;
- использовать для питания ПС 35/10–6 кВ преимущественно ВЛ 35 кВ;
- подключать к разным ПС 110–330/35 кВ или секциям (системам шин) одной ПС 110–330/35 кВ;
- число ПС, присоединяемых к одноцепной ВЛ 35 кВ с двухсторонним питанием, не должно превышать пяти (без учета ПС 35/0,4 кВ);
- принимать к установке на ПС 35 кВ трансформаторы единичной мощностью до 16 МВ·А (применение на ПС 35 кВ трансформаторов большей мощности должно быть обосновано);

– при выполнении реконструкции объектов предусматривать замену отделителей с короткозамыкателями на выключатели;

– подключать ПС с высшим напряжением 35 кВ не менее чем к двум независимым источникам питания при наличии не менее двух силовых трансформаторов;

– ПС 35 кВ, снабжающие потребителей только 3 категории, могут иметь один источник питания.

При развитии сетей 110 (150) кВ рекомендуется:

1. Избегать сооружения новых протяжённых ЛЭП 110 (150) кВ параллельно существующим ЛЭП 220–330 кВ, приводящим к шунтированию сети более высокого класса напряжения.

2. Использовать в качестве источников питания сети 110 (150) кВ ПС 220–330–500/110 (150) кВ, имеющие независимые питающие линии.

3. Обеспечивать двухстороннее питание ПС, присоединённых к одноцепной ВЛ 110 (150) кВ. Длина такой ВЛ, как правило, не должна быть больше 120 км, а количество присоединяемых промежуточных ПС больше трёх. Присоединение к такой ВЛ двухтрансформаторных ПС рекомендуется по схеме «мостик». Допускается присоединение ПС к одноцепной тупиковой ВЛ 110 (150) кВ только на первом этапе развития сети. При этом число отпаечных однострансформаторных ПС на одной ВЛ с двухсторонним питанием и одноцепной тупиковой ВЛ 110 (150) кВ не должно превышать двух. Резервирование ответственных потребителей должно быть обеспечено по сети вторичного напряжения.

4. Развитие сети должно осуществляться в направлении уменьшения числа однострансформаторных отпаечных или тупиковых ПС.

5. Осуществлять, как правило, применение двухцепных ВЛ с двухсторонним питанием в системах электроснабжения городов, а также в схемах внешнего электроснабжения потребителей транспортных систем (электрифицированные участки железных дорог, продуктопроводов и т. п.). К таким ВЛ

рекомендуется присоединение не более пяти промежуточных ПС, осуществляя чередование ПС по схеме «мостик» и блочной схеме.

6. Применять двухцепные тупиковые ВЛ в схемах электроснабжения городов (за исключением мегаполисов), промузлов, промышленных предприятий и т. п. с присоединением к такой ВЛ до двух ПС 110 (150) кВ. При этом потребители первой категории этих ПС должны резервироваться по сети вторичного напряжения. К двум одноцепным тупиковым ВЛ могут быть присоединены до трёх ПС.

7. Принимать к установке на ПС 110 (150) кВ трансформаторы единичной мощностью не выше 80 МВ·А. Применение на ПС 110 (150) кВ трансформаторов большей мощности должно быть обосновано.

8. На ПС с высшим напряжением 110 (150) кВ, как правило, должно быть установлено не менее двух силовых трансформаторов.

9. При выполнении реконструкции объектов рассматривать возможность замены отделителей с короткозамыкателями на выключатели.

### **6.3. Сетевое резервирование**

При проектировании, реконструкции и строительстве электрической сети 35, 10 (150) кВ предъявляются следующие требования к построению:

1. Сетевое резервирование с автоматическим вводом резервного питания от разных подстанций или с разных шин одной подстанции, имеющей двухстороннее независимое питание, в качестве схемного решения повышения надежности электроснабжения. Согласно [10] (п. 1.2.10), независимый источник питания – источник питания, на котором сохраняется напряжение в послеаварийном режиме в регламентированных пределах при исчезновении его на другом или других источниках питания. К числу независимых источников питания относятся две секции или системы шин одной или двух электростанций и подстанций при одновременном соблюдении следующих двух условий:

– каждая из секций или систем шин в свою очередь имеет питание от независимого источника питания;

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

2. Сетевым резервированием должны быть обеспечены все подстанции напряжением 35, 110 (150) кВ (для подстанций напряжением 35 кВ допускается резервирование шин 6, 10 кВ по сети 6, 10 кВ).

3. Не допускается присоединение потребителей категории по надежности электроснабжения выше 3 только к одной однострансформаторной подстанции или к трансформаторной подстанции с одной питающей линией, не имеющей сетевого резервирования на полную присоединяемую мощность.

4. Формирование системы электроснабжения потребителей из условия однократного сетевого резервирования.

5. Не допускается присоединение к электрической сети электроприемников потребителей, внутренняя схема которых не позволит обеспечить соответствующую категорию электроприемников по надежности электроснабжения.

6. Для особой группы электроприемников должен быть предусмотрен резервный (автономный) источник питания, который устанавливает потребитель.

#### **6.4. Требования к надежности электроснабжения потребителей**

Требования к надежности электроснабжения потребителей направлены на снижение продолжительности и частоты плановых отключений, а также вероятности и продолжительности аварийных отключений электроустановок потребителей.

Оценку уровня надежности следует осуществлять, в том числе, с использованием положений, закрепленных в [\[11\]](#).

Для обеспечения живучести и надежности распределительных сетей регионов страны следует предусматривать:

- мероприятия по секционированию сетей с использованием выключателей, вставок плавких предохранителей и пр.;
- повышение пропускной способности участков сети путем повышения класса напряжения ВЛ;
- замену воздушных линий на кабельные на территории городов, а также демонтаж изношенных ВЛ, потерявших свое значение вследствие появления новых шунтирующих связей;
- кольцевание сети всех напряжений с целью обеспечения потребителей двухсторонним питанием;
- установку вторых трансформаторов на одотрансформаторных подстанциях;
- сокращение количества ступеней напряжения в электрической сети, в том числе перевод сетей 6 кВ на 10 (20, 35) кВ, 35 кВ на 110 (150) кВ;
- реконструкцию схем присоединения ПС с сокращением количества ПС, присоединенных на отпайках, выполнением заходов линий, необходимым техническим перевооружением РУ ПС;
- повышение коммутационной способности аппаратов и ограничение уровня токов КЗ.

При проектировании учитываются:

- результаты анализа послеаварийных режимов, вызванных климатическими аномалиями;
- проверка соответствия параметров оборудования изменяющимся условиям работы в сети;
- характерные причины повреждений в сети и внедрения мер по предотвращению аварийных ситуаций.

Основные мероприятия по повышению надежности в сетях 35, 110 (150) кВ, учитываемые при проектировании:

- использование в городских сетях преимущественно КЛ различных классов напряжения и постепенная замена ВЛ, проходящих по территории города, на КЛ;

- применение на ВЛ 35, 110 (150) кВ неизолированных высокотемпературных проводов, высокопрочных проводов из алюминиевых сплавов, проводов со стальным сердечником и профилированными алюминиевыми проволоками;

- усиление отдельных участков распределительных сетей путем проектирования и строительства ВЛ в габаритах более высоких классов напряжения с целью создания аварийного резерва их пропускной способности (в случае необходимости резервирование земельных участков под строительство нагрузочных подстанций и охранных зон линий электропередачи);

- при строительстве ВЛ, проходящих в труднодоступных местах, характеризующихся высокой плотностью нагрузки, где последующий перевод ВЛ на более высокий класс напряжения связан с трудновыполнимыми условиями прохождения на местности и/или большими затратами, рекомендуется, при соответствующем технико-экономическом обосновании, применять провода увеличенного сечения на ВЛ 110 (150) кВ – до 400 мм<sup>2</sup>, на ВЛ 35 кВ – до 240 мм<sup>2</sup>;

- предусматривать при проектировании и строительстве ВЛ конструкции опор, рассчитанные на подвеску двух и более цепей;

- внедрение системы температурного мониторинга ВЛ 35, 110 (150) кВ;

- внедрение подстанций глубокого ввода 35/0,4 кВ;

- применение в распределительных сетях всех классов напряжения современных управляемых СКРМ, а также накопителей энергии в сочетании с преобразователями напряжения типа СТАТКОМ;

- оснащение исполнительными механизмами (приводами) для воздействия на активные элементы сети (выключатели, АВР, секционирующие пункты, устройства РПН, ВДТ, конденсаторные установки);

- уменьшение числа отключений ВЛ при грозовых перенапряжениях путем установки устройств защиты от перенапряжений.

Основные мероприятия по повышению надежности в сетях 6–20 кВ, учитываемые при проектировании:

- совершенствование структуры сети;

- секционирование и автоматическое включение резерва линий;
- установка пунктов автоматического отключения на ответвлениях от магистрали;
- строительство участков линий 10–20 кВ, предназначенных для формирования магистралей воздушных линий;
- повышение надежности участков сети посредством замены наиболее ответственных элементов на новую элементную базу, позволяющую уменьшить риски повреждений;
- уменьшение числа отключений ВЛ при грозовых перенапряжениях путем установки устройств защиты от перенапряжений;
- совершенствование требований по надежности к электрооборудованию линий электропередачи и подстанций, включая устройства РЗА, на этапах проектирования, закупок, строительства и монтажа;
- при строительстве ВЛ, проходящих в труднодоступных местах, характеризующихся высокой плотностью нагрузки, где последующий перевод ВЛ на более высокий класс напряжения связан с трудновыполнимыми условиями прохождения на местности и/или большими затратами, рекомендуется, при соответствующем технико-экономическом обосновании, применять провода увеличенного сечения на ВЛ 6–20 кВ – до 150 мм<sup>2</sup>;
- строительство ВЛ 6–20 кВ с использованием подвесных или опорных линейных изоляторов, в том числе изолирующих траверс на опорах повышенной механической прочности и защищенных проводов;
- внедрение столбовых трансформаторных подстанций 6–20/0,4 кВ;
- применение в процессе эксплуатации на магистралях напряжением 6–20 кВ вольтодобавочных трансформаторов и/или конденсаторных батарей, работающих в автоматическом режиме;
- создание оптимального аварийного запаса опор, проводов и других материалов (конструкций) для проведения аварийно-восстановительных работ;

- внедрение современной системы механизации и связи для сокращения времени восстановления ЛЭП после аварии, а также прогнозирования аварийных ситуаций;
- заранее проработанная логистика работы аварийных бригад, отработка взаимодействия обслуживающего персонала при массовых гололедных и ветровых авариях, противоправных актах населения;
- использование предприятиями электрических сетей электростанций мощностью до 630 кВ·А для обеспечения бесперебойного электроснабжения электроустановок потребителей при проведении плановых и/или аварийных ремонтов.

### **6.5. Пропускная способность электрической сети**

Увеличение пропускной способности распределительной электрической сети должно осуществляться с выполнением технико-экономического обоснования за счет:

- применения современного оборудования регулирования напряжения и управления потоками электроэнергии, применения современных видов проводов;
- постепенного расширения за счет строительства ЛЭП того же класса напряжения, вводов дополнительной трансформаторной мощности, при этом между двумя узлами сети по одной трассе должно сооружаться не более двух ЛЭП одного класса напряжения;
- замены существующих неизолированных проводов на провода современной конструкции, повышенной пропускной способности (высокотемпературные провода);
- при необходимости дополнительного повышения пропускной способности следует рассматривать строительство новых и/или перевод существующих объектов на более высокие классы напряжения.

Повышение пропускной способности существующей сети обеспечивается путем внедрения в распределительных сетях разукрупняющих питающих подстанций (например, ПС 110 (150)/35/10 кВ и 110 (35)/10 кВ) для сокращения радиусов действия сети 10 кВ и протяженности ВЛ 10 кВ, отходящих от одной ПС.

**Контрольные вопросы:**

1. Обоснуйте построение сети 6–10 кВ.
2. Перечислите рекомендации по построению сети 6–110 (150) кВ.
3. Перечислите рекомендуемые максимальные длины воздушных и кабельных линий электропередачи в зависимости от класса напряжений и плотности населения.
4. Какие требования к построению сети предъявляются при проектировании, реконструкции и строительстве электрической сети?
5. Перечислите требования к надежности электроснабжения потребителей электрической энергии.
6. Какие основные мероприятия по повышению надежности в сетях 6–20 кВ Вы знаете?

## 7. СХЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

### 7.1. Основные принципы построения системы электроснабжения города

Система электроснабжения города формируется десятилетиями. По мере развития города развивается перспективная схема электроснабжения и схема развития электрических сетей города, которые строятся на основе уже существующей системы электроснабжения, с учетом возможностей источников питания, расположения подстанций с первичным напряжением 35 кВ и выше и согласовываются со схемой развития сетей энергосистемы.

В генеральном плане города предусматривается территория для объектов электросетевого назначения (площадки подстанций, зона для кабельных линий, коридоры для воздушных линий электропередачи и т. п.).

Вопросы электроснабжения города решаются комплексно, с учетом возможностей использования подстанций и распределительных пунктов системы электроснабжения города для питания промышленных предприятий, расположенных на территории города.

Схема электроснабжения должна предусматривать возможности поэтапного создания за определенный срок и последующего ее развития без кардинального переустройства. При проектировании системы электроснабжения необходимо использовать более простые схемы распределения электрической энергии и применять повышенные напряжения. Подстанции следует максимально приближать к центрам электрических нагрузок районов города, при необходимости применять схемы глубоких вводов напряжением 35 кВ и выше.

Напряжения городских сетей выбираются с учетом:

- концепции развития города;
- наименьшего числа ступеней трансформации электрической энергии;
- технических характеристик источников питания, плотности и величины нагрузок и т. п.

Для большинства городов наиболее целесообразной является система напряжений 110–220/10 кВ, для крупнейших городов 500/220–110/10 кВ или 330/110/10 кВ. В существующих сетях следует стремиться к переводу сетей напряжением 35 кВ на напряжения 110 или 220 кВ.

Для городских распределительных сетей рекомендуется применять напряжение не ниже 10 кВ. Напряжение 6 кВ во вновь проектируемых сетях применять не должно. При расширении и реконструкции действующих сетей 6 кВ рекомендуется переводить их на напряжение 10 кВ с использованием установленного оборудования при соответствии его характеристик напряжению 10 кВ.

Сети до 1 кВ выполняются на напряжение 380 В с глухим заземлением нейтрали. Напряжение 660 В при проектировании городских сетей не применяется.

## 7.2. Структурная схема электроснабжения города

Схему электроснабжения города принято делить на следующие составные части ([рис. 7.1](#)):

- электроснабжающая сеть города напряжением 35–220 кВ;
- питающая электрическая сеть 10 (6) кВ;
- распределительная электрическая сеть 10 (6) кВ;
- распределительная сеть 380 В.

Электроснабжающей сетью города являются линии электропередачи напряжением 35–220 кВ вместе с опорными подстанциями и подстанциями глубокого ввода.

Опорной подстанцией (ОПС) называется подстанция, получающая электроэнергию от источника питания и распределяющая ее по кольцевой или магистральной сети по подстанциям глубокого ввода.

Питающая сеть 10 (6) кВ состоит из линий электропередачи от шин 10(6) кВ опорных подстанций или ПГВ до шин 10(6) кВ РП и связей между РП.

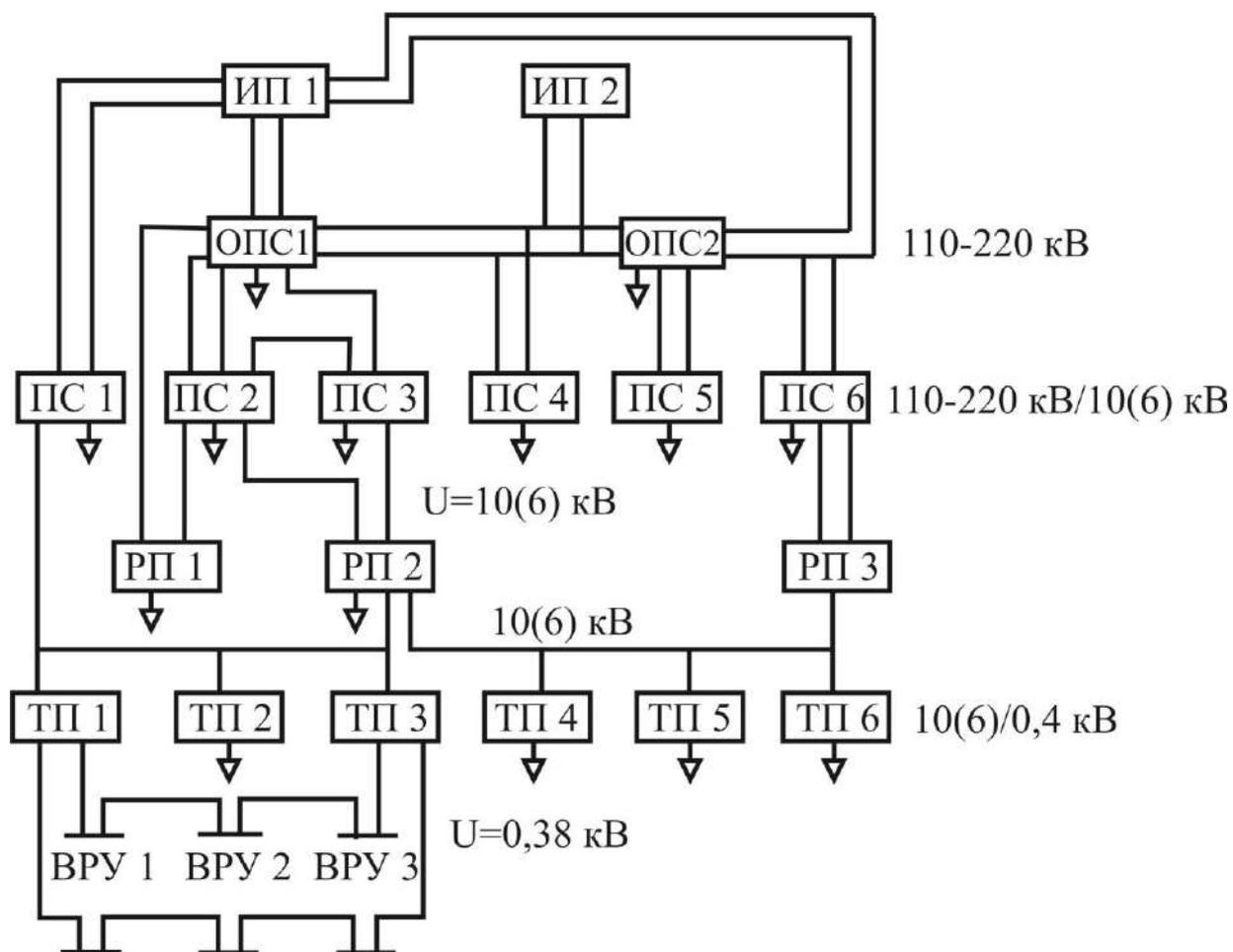


Рис. 7.1. Структурная схема электроснабжения крупного города

Распределительная сеть 10 (6) кВ – сеть от шин 10 (6) кВ РП до трансформаторных подстанций 10 (6) кВ.

Распределительная сеть 380 В – сеть от шин 0,4 кВ ТП до вводных распределительных устройств зданий и сооружений.

*Электроснабжающая сеть города* выполняет двойственную роль: с одной стороны, с ее помощью осуществляется параллельная работа источников питания, с другой – электроснабжающая сеть используется для распределения электроэнергии среди районов города. Особенности ее построения определяются местными условиями: *технической характеристикой источников питания, размерами города, величиной и плотностью нагрузки.*

Для крупных городов электроснабжающая сеть выполняется в виде кольцевой или магистральной сети с двухсторонним питанием. Источниками

питания служат подстанции энергосистемы или электрические станции. Кольцевое исполнение линии обеспечивает надежную и гибкую систему электроснабжения города, а также достаточно экономичное развитие электроснабжающей сети с ростом нагрузки отдельных районов города.

Напряжение кольцевой сети определяется размерами города. Для крупных и крупнейших городов сеть выполняется на напряжение 110–220 кВ и выше. Существующие сети напряжением 35 кВ, как правило, переводятся на напряжение 110 кВ.

Электроснабжающая сеть города приведена на [рис. 7.2](#).

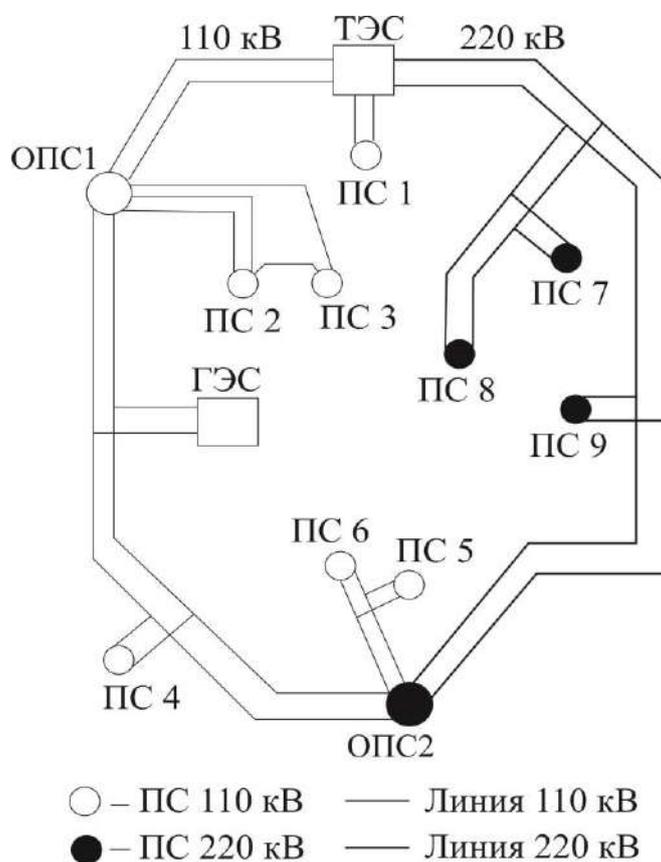


Рис. 7.2. Электроснабжающая сеть города

Кольцевая сеть 110 кВ и выше должна быть связана по сети внешнего электроснабжения не менее чем с двумя территориально удаленными, независимыми источниками питания через разные опорные подстанции. Опорные подстанции рекомендуется располагать в противоположных местах кольце-

вой сети. Линии связи кольцевой сети с опорными подстанциями должны сооружаться по разным трассам.

Увеличение пропускной способности кольцевой сети производится либо сооружением дополнительных подстанций, связанных с энергосистемой, либо усилением отдельных участков кольца за счет дополнительных кольцевых линий или создания новой кольцевой сети более высокого напряжения. К одной линии электропередачи с двухсторонним питанием рекомендуется присоединять не более трех подстанций при условии сохранения питания потребителей при аварийном отключении любого участка линии.

Для питания отдельных районов города сооружаются глубокие вводы напряжением 110–220 кВ. В зависимости от местных условий питание подстанций глубокого ввода может предусматриваться от разных секций шин одной или разных опорных подстанций, а также ответвлениями от кольцевой сети с двухсторонним питанием. Подстанции глубокого ввода необходимо выполнять двухтрансформаторными. Допускается применение одностранформаторных подстанций, если может быть обеспечена требуемая надежность электроснабжения потребителей.

Принципиальные схемы глубоких вводов представлены на [рис. 7.3](#).

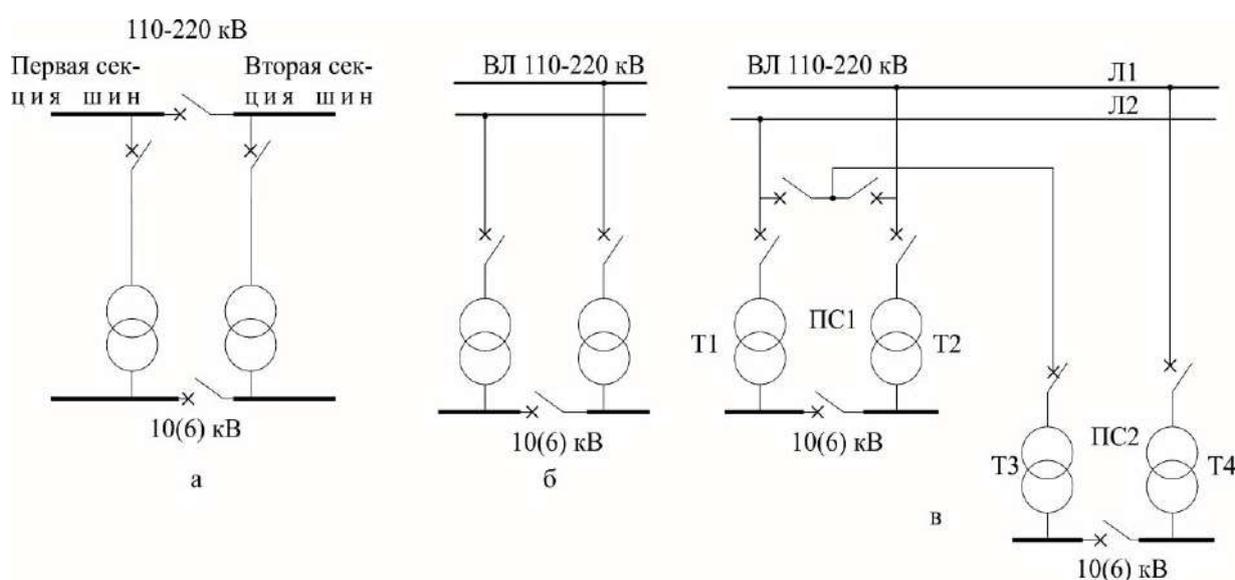


Рис. 7.3. Схемы глубокого ввода 110–220 кВ:

а – радиальная схема; б – магистральная схема; в – магистральная схема с питанием Т3 от ПС1

Радиальная схема глубокого ввода ([рис. 7.3, а](#)) предусматривает использование на подстанции упрощенных схем первичной коммутации. Магистральная схема питания ПГВ ([рис. 7.3, б](#)) требует установки на ПГВ коммутационных аппаратов, позволяющих отключать трансформатор при повреждениях в нем. На [рис. 7.3, в](#) приведена магистральная схема с питанием трансформатора ТЗ подстанции ПС2 от подстанции ПС1. Два выключателя в перемычке подстанции ПС1 позволяют подключать ТЗ к одной из двух линий 110–220 кВ.

Использование глубоких вводов связано с дроблением подстанций 35–220 кВ. При этом увеличивается стоимость сети 35–220 кВ, но затраты, вкладываемые в сеть 10(6) кВ, резко сокращаются за счет уменьшения протяженности сети, снижения числа распределительных подстанций 10(6) кВ, потерь мощности, энергии, напряжения.

Мощность трансформаторов подстанций должна соответствовать [\[7\]](#): при питании по воздушным линиям электропередачи напряжением 110 кВ не менее 25 МВ·А, по линиям 220 кВ не менее 40 МВ·А; при питании по кабельным линиям 110–220 кВ не менее 40 МВ·А.

### **7.3. Выбор схем построения электрических сетей напряжением 0,38–20 кВ**

Распределительная и питающая сеть 10(6) кВ должна использоваться для совместного питания городских потребителей коммунально-бытового и промышленного характера. При технико-экономических обоснованиях допускается сооружение питающих сетей 10(6) кВ для самостоятельного электроснабжения отдельных крупных потребителей.

Принцип построения городских сетей выбирается применительно к основной массе электроприемников для обеспечения требуемого уровня надежности электроснабжения. Примерная схема системы электроснабжения города приведена на [рис. 7.4 \[1, 3\]](#).

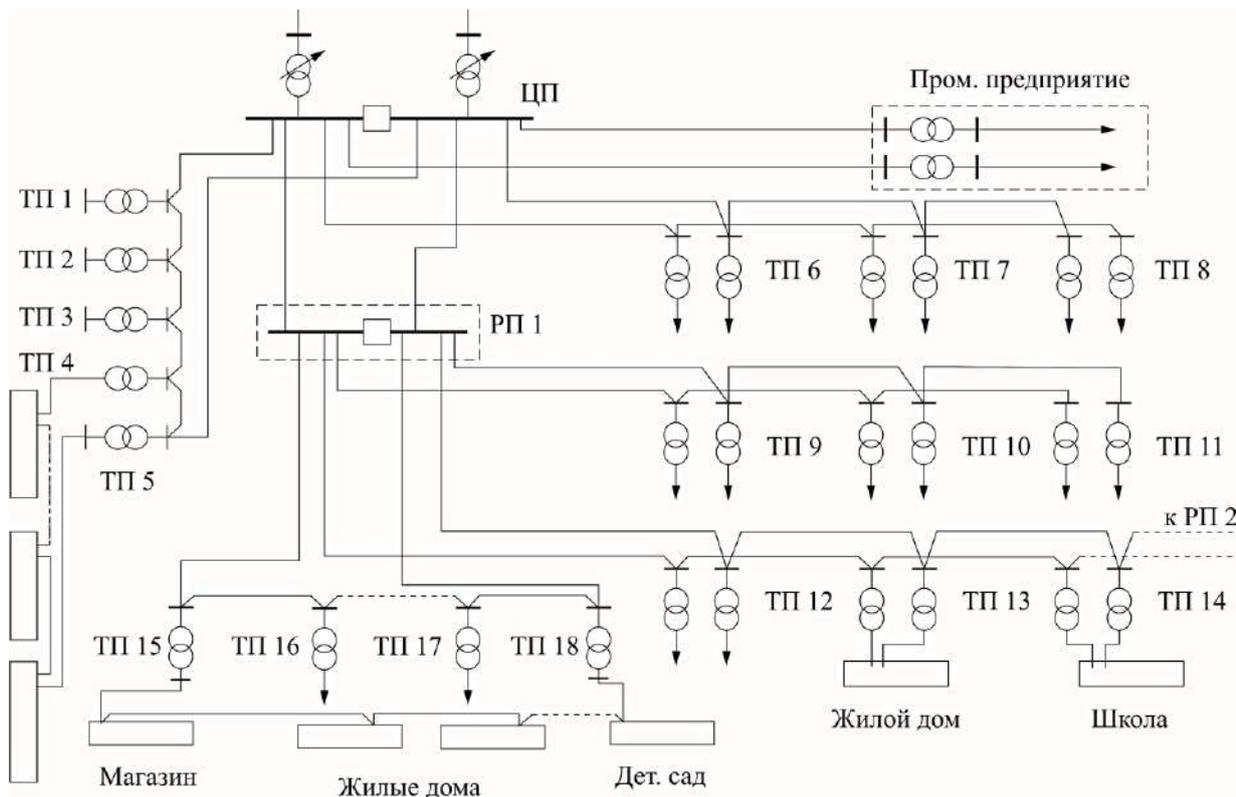


Рис. 7.4. Схема электроснабжения города

Целесообразность сооружения распределительного пункта 10(6) кВ (на [рис. 7.4](#) – РП1) должна обосновываться технико-экономическим расчетом. Нагрузка РП на расчетный срок должна составлять на шинах 10 кВ не менее 7 МВт, на шинах 6 кВ – не менее 4 МВт.

Распределительные пункты 10(6) кВ, как правило, следует выполнять с одной секционированной системой сборных шин с питанием по взаимно резервируемым линиям, подключенным к разным секциям. На секционном выключателе должно предусматриваться устройство АВР (автоматическое включение резерва).

При петлевой, замкнутой и радиальной схемах распределительных сетей 10 (6) кВ должны применяться ТП с одним трансформатором (ТП1 – ТП5 и ТП15 – ТП18).

Основным принципом построения распределительной сети 10 (6) кВ для электроснабжения электроприемников первой категории является двухлучевая схема с двухсторонним питанием при условии подключения взаим-

но резервирующих линий 10 (6) кВ к разным независимым источникам питания. На [рис. 7.4](#) это питание ТП12 – ТП14 от РП1 и РП2. При этом на шинах 0,38 кВ двухтрансформаторных ТП и непосредственно у потребителя (при наличии электроприемников 1 категории) должно быть предусмотрено АВР.

Следует также рассматривать питание электроприемников первой категории по сети 0,38 кВ от разных ТП, присоединенных к разным независимым источникам. При этом необходимо предусматривать необходимые резервы в пропускной способности элементов системы в зависимости от нагрузки электроприемников 1 категории.

Основным принципом построения распределительной сети 10(6) кВ для электроприемников 2 категории является сочетание петлевых схем 10(6) кВ, обеспечивающих двухстороннее питание каждой ТП, и петлевых схем 0,38 кВ для питания потребителей. При этом линии 0,38 кВ в петлевых схемах могут присоединяться к одной или разным ТП.

Рекомендуется параллельная работа трансформаторов на напряжении 0,38 кВ по схеме со «слабыми» связями или по полузамкнутой схеме при условии обслуживания указанных сетей 0,38 кВ электроснабжающей организацией, то есть размыкание петлевой схемы в нормальном режиме в точке потокоузла. На [рис. 7.4](#) это показано пунктирной линией между ТП5 и ТП4, ТП16 и ТП17.

Допускается применение автоматизированных схем (двухлучевых) для питания электроприемников 2 категории, если их применение приводит к увеличению приведенных затрат на сооружение сети не более чем на 5 %. На [рис. 7.4](#). это линии, соединяющие ТП6, ТП7 и т. д.

Основным принципом построения распределительной сети 10 (6) кВ для электроприемников 3 категории является сочетание петлевых линий 10 (6) кВ и радиальных линий 0,38 кВ к потребителям. При применении воздушных линий электропередачи для питания электроприемников 3 категории резервирование линий в сети 0,38 кВ кабельных линий должна учитываться возможность использования временных шланговых кабелей.

Для электроснабжения районов с электроприемниками 1 и 2 категорий рекомендуется применение на напряжении 10 (6) кВ комбинированной петлевой двухлучевой схемы с двухсторонним питанием.

Для жилых и общественных зданий с электрическими плитами, а также всех зданий высотой 9 этажей и более при питании от однострансформаторных ТП следует предусматривать резервирование сети 0,38 кВ от других ТП [\[21\]](#).

### **Контрольные вопросы**

1. Перечислите основные принципы построения системы электроснабжения города.
2. Опишите структурную схему электроснабжения крупного города.
3. На какие составные части принято делить схему электроснабжения города?
4. Перечислите преимущества кольцевых сетей электроснабжения города.
5. Приведите пример принципиальных схем глубоких вводов.
6. Как осуществляется выбор схем построения электрических сетей напряжением 0,38–20 кВ?
  7. Укажите основной принцип построения распределительной сети 10 (6) кВ для электроснабжения электроприемников первой категории.
  8. Укажите основной принцип построения распределительной сети 10 (6) кВ для электроснабжения электроприемников второй категории.
  9. Укажите основной принцип построения распределительной сети 10 (6) кВ для электроснабжения электроприемников третьей категории.

## **8. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА**

### **8.1. Выбор и расчет схем электрических сетей внешнего электроснабжения**

Электроснабжение производственных предприятий и населенных пунктов в сельской местности имеет свои особенности по сравнению с электроснабжением городов. Главная из них – необходимость подводить электроэнергию к огромному числу сравнительно маломощных объектов, рассредоточенных на большой площади. В результате протяжённость сетей (в расчёте на единицу мощности потребителей) во много раз больше, чем в других отраслях.

Все это говорит о сложности проблемы электроснабжения сельского хозяйства, от решения которой зависит экономическая эффективность применения электроэнергии в сельскохозяйственном производстве и быту.

Наряду с развитием систем электроснабжения сельского хозяйства происходит их реконструкция. Часть воздушных линий 0,38 и 10 кВ с неизолированными проводами заменяют самонесущими изолированными проводами (СИП).

Важный показатель системы электроснабжения – надёжность подачи электроэнергии. Любое отключение – как плановое (для ревизии и ремонта), так и (особенно!) аварийное – наносит огромный ущерб крупным сельскохозяйственным предприятиям (животноводческим фермам, птицефабрикам, тепличным комбинатам и др.). Поэтому необходимо применять эффективные меры по обеспечению требуемого уровня надёжности электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.

### **8.2. Выбор и расчет схем электрических сетей внешнего электроснабжения**

**Напряжение сетей.** К электрическим сетям сельскохозяйственного назначения относятся сети напряжением 0,38–110 кВ, от которых снабжаются электроэнергией преимущественно (более 50 % по расчетной нагрузке) сель-

скохозяйственные потребители, включая коммунально-бытовые, объекты мелиорации и водного хозяйства, а также предприятия и организации, предназначенные для бытового и культурного обслуживания сельского населения.

Основной системой напряжений в электрических сетях сельскохозяйственного назначения является 110/35/10/0,38 кВ с подсистемами напряжений 110/10/0,38; 35/10/0,38 кВ.

**Нормы надежности.** Сельскохозяйственные потребители и их электроприемники в отношении требований к надежности электроснабжения разделяются на три категории.

К потребителям *первой категории* относятся:

1. Животноводческие комплексы и фермы:

- по производству молока на 400 и более коров;
- по выращиванию и откорму молодняка крупного рогатого скота (КРС) на 5 тыс. и более голов в год;
- по выращиванию нетелей на 3 тыс. и более скотомест;
- площадки по откорму КРС на 5 тыс. и более голов в год;
- комплексы по выращиванию и откорму 12 тыс. и более свиней в год.

2. Птицефабрики:

- по производству яиц с содержанием 100 тыс. и более кур-несушек;
- мясного направления по выращиванию 1 млн. и более бройлеров в год;
- хозяйства по выращиванию племенного стада кур на 25 тыс. и более голов, а также гусей, уток и индеек 10 тыс. и более голов.

К потребителям *второй категории* относятся:

- животноводческие и птицеводческие фермы с меньшей производственной мощностью, чем указано ранее для потребителей первой категории;
- тепличные комбинаты;
- кормоприготовительные заводы и отдельные цехи при механизированном приготовлении и раздаче кормов;
- картофелехранилища емкостью более 500 т с холодоснабжением и активной вентиляцией;

- холодильники для хранения фруктов емкостью более 600 т;
- инкубационные цехи рыбководческих хозяйств и ферм [11].

Все остальные сельскохозяйственные потребители и электроприемники относятся к *третьей категории*.

*Особую группу потребителей II категории* составляют потребители, перерыв в электроснабжении которых не должен превышать 0,5 часа. К ним отнесены:

- на комплексах и фермах молочного направления – системы поения коров в стойлах, в доильных залах, рабочее освещение в доильных залах, системы промывки молокопроводов и подогрева воды, локального обогрева и облучения телят, дежурного освещения в родильных отделениях;

- на свиноводческих комплексах и фермах – отопительно-вентиляционные системы в свинарниках-откормочниках и в свинарниках для поросят;

- на птицефабриках и птицефермах – системы поения птицы, локального обогрева цыплят в первые 20 дней, вентиляции в птичниках с напольным и клеточным содержанием, инкубации яиц и вывода цыплят, сортировки яиц и цыплят, транспортировки, санитарно-убойного пункта, котельных, мазутного хозяйства, градирни, хлораторной станции обезжелезивания, канализационной насосной станции;

- для всех сельскохозяйственных предприятий установки пожаротушения и котельные с котлами высокого и среднего давления.

Для резервного питания электроприемников 1 и 2 категорий надежности, не допускающих перерывов в электроснабжении длительностью более 0,5 часа, должна предусматриваться установка автономных источников резервного питания дополнительно к резервному питанию по электрическим сетям.

В качестве автономных источников резервного питания могут быть использованы стационарные или передвижные электростанции (ДЭС) и стационарные или передвижные источники питания с приводом от трактора.

**Требования к схемам электрических сетей.** Основным направлением развития электрических сетей сельскохозяйственного направления должно быть преимущественное развитие сетей напряжением 35–110 кВ.

Основу электрической сети 35–110 кВ сельскохозяйственного назначения должны составлять воздушные одноцепные взаимно резервирующие секционированные магистральные линии электропередачи с комплектными трансформаторными подстанциями 110–35/10 кВ.

Взаимно резервирующие линии 35–110 кВ должны питаться от шин разных трансформаторных подстанций или разных систем (секций) шин одной трансформаторной подстанции.

Ввод резервного питания осуществляется автоматически. Автоматический ввод резерва выполняется, как правило, двусторонним.

Опорные трансформаторные подстанции (ОТП) напряжением 35–110 кВ должны размещаться в узлах сети 35–110 кВ с учетом развития открытого распределительного устройства (ОРУ) в перспективе.

Вновь сооружаемые трансформаторные подстанции 35–110 кВ должны, как правило, присоединяться к ОРУ 35–110 кВ действующих подстанций, в расщелку линий электропередачи 35–110 кВ, а также по схеме отвлечения от существующей ВЛ 35–110 кВ с учетом ее пропускной способности.

В случае параллельного следования действующей ВЛ 35 кВ и намечаемой к строительству ВЛ 110 кВ необходимо рассматривать целесообразность перевода действующей подстанции 35/10 кВ на напряжение 110/10 кВ.

Если в направлении ВЛ, намечаемой к строительству, в перспективе потребуется сооружение линии более высокого напряжения, то эта линия должна проектироваться на более высокое напряжение с временным использованием сроком до 5 лет на более низком напряжении.

Основу электрической сети 10 кВ должны составлять воздушные взаимно резервирующие секционированные магистральные линии электропередачи, опорные трансформаторные подстанции (ОТП) 10/0,4 кВ и распределительные пункты 10 кВ (РП).

ОТП 10/0,4 кВ представляют собой подстанции 10/0,4 кВ с развитым распределительным устройством 10 кВ (РУ 10 кВ), предназначенным для присоединения радиальных линий электропередачи 10 кВ, автоматического секционирования и резервирования магистрали, размещения устройств автоматики и телемеханики.

ОТП следует устанавливать у потребителей первой категории, на хозяйственных дворах центральных усадеб колхозов, совхозов. ОТП присоединяются в расщепки магистрали линий электроснабжения.

РП должны оборудоваться устройствами АВР на секционном выключателе 10 кВ.

Магистральная линия 10 кВ должна иметь сетевой резерв от независимого источника питания.

### **8.3. Схемы электроснабжения**

В отличие от промышленных потребителей с трехфазной нагрузкой, питающихся от кабельных сетей, сельские потребители питаются от воздушных разветвленных электрических сетей. Сельские потребители имеют относительно небольшие, но разные по значению мощности, нагрузки, которые удалены одна от другой на большие расстояния даже в пределах одного хозяйства.

К любой точке электрической сети может быть присоединено большое число потребителей с самыми разнообразными характеристиками. В отдельных случаях питание мелких нагрузок осуществляется от маломощных однофазных трансформаторов.

Особую группу составляют предприятия по производству сельскохозяйственной продукции на промышленной основе (комплексы по откорму свиней, крупного рогатого скота, птицефабрики и т. п.). Схемы электроснабжения этих комплексов по сложности приближаются к схемам промышленных предприятий.

Для сокращения протяженности сельских распределительных сетей их формируют в разветвленные радиальные сети. Площадь сечения проводов

и токовые нагрузки в начале таких линий выше, чем в конце. Существенно различаются между собой значения напряжений в различных точках сети, что влияет на качество напряжения в сельских сетях.

Технологический процесс сельскохозяйственного производства имеет свои особенности, которые приводят к повышенным нагрузкам в утренние и вечерние часы, резким снижениям их в дневное время и почти отсутствию ночью. Например, на животноводческих фермах во время утренней и вечерней доек раздают корм и кормят животных, убирают навоз, обрабатывают животных, моют посуду и т. п. При этом на производственную (силовую) нагрузку дополнительно добавляется осветительная нагрузка производственных помещений и жилого сектора хозяйств.

Неравномерный график потребления электроэнергии в течение суток усложняет проблему получения высокого качества электроэнергии, увеличивает потери энергии в сельских электроустановках. Однофазная осветительная нагрузка всегда приводит к неравномерности токов по фазам и искажению в них напряжения. В сельском хозяйстве находят применение однофазные силовые потребители (сварочные трансформаторы, электродрели, бытовые электронасосы, электронагреватели, электроплиты и т. п.), которые влияют на асимметрию напряжения по фазам. При относительно малой мощности силовых трансформаторов, питающих сельских потребителей, при значительной неравномерности нагрузки по фазам иногда происходит искажение линейных напряжений на клеммах потребителей.

В сельскохозяйственном производстве все чаще начинает применяться полупроводниковая техника, имеющая нелинейные характеристики. Ее работа в сетях вызывает высшие гармонические составляющие и искажение синусоидальной формы кривой напряжения, что приводит к дополнительным потерям мощности и электроэнергии в сельских установках.

Таким образом, схемы электроснабжения сельских потребителей, их структура и режим работы имеют особенности, которые снижают качество электроэнергии и увеличивают ее потери.

Показатели качества электрической энергии:

- отклонение частоты;
- колебания частоты;
- отклонение напряжения;
- колебания напряжения;
- несинусоидальность формы кривой напряжения;
- смещение нейтрали;
- несимметрия напряжений.

Из всех показателей первостепенное значение имеют отклонения и колебания напряжения. Это обусловлено двумя причинами: во-первых, отклонение напряжения существенно влияет на технико-экономические параметры всех видов электрооборудования; во-вторых, отклонение напряжения в большей мере, чем другие показатели, не соответствует норме.

Степень влияния отклонений напряжения зависит от их значения, знака и продолжительности, а также типа электроприемника. Особенно чувствительны к изменению напряжения осветительные установки.

Электронагревательные установки также чувствительны к отклонениям напряжения. Их мощность связана с напряжением квадратичной зависимостью. Отрицательные отклонения сильно снижают производительность, а положительные – снижают срок службы. Выбор оптимального режима осуществляют регулированием мощности электронагревателя.

Напряжение влияет практически на все характеристики асинхронного электродвигателя. Особенно неблагоприятные последствия обнаруживаются по отношению к моменту двигателя, потребляемому току, а следовательно, его нагреву и сроку службы.

Снижение напряжения существенно уменьшает крутящий момент. Например, при снижении напряжения на 10 % момент уменьшается на 19 %. Отрицательное отклонение может настолько снизить момент, что затруднит пуск электродвигателя или вызовет его «опрокидывание» при работе с нагрузкой. При эксплуатации электроприводов сельскохозяйственных машин эти

факторы необходимо учитывать. Наряду с оптимизацией загрузки электродвигатель должен быть проверен на возможность пуска в конкретных условиях.

Зависимость тока электродвигателя и потерь в нем от напряжения имеет экстремальный характер. Наименьшее значение тока наблюдается, как правило, при номинальном напряжении. Для двигателя, имеющего неизменную номинальную нагрузку, с ростом напряжения активная составляющая тока холостого хода уменьшается, а намагничивающая – увеличивается. Если ток холостого хода превышает 50 % номинального, то в результате общий ток увеличивается. Для двигателей с меньшим током холостого хода зависимость обратная. Считают, что отклонения напряжения до +10 % не изменяют ток двигателя.

Снижение напряжения в большей мере увеличивает активную составляющую тока, чем уменьшает намагничивающую, поэтому общий ток возрастает. При отклонении напряжения на –10 % ток увеличивается на 10 %.

Если двигатель длительно работает при пониженном напряжении, то из-за большего нагрева износ изоляции ускоряется и срок службы уменьшается. При отклонении напряжения на –5 % срок службы изоляции уменьшается в 1,5 раза.

#### **8.4. Энергоэффективность в сельском хозяйстве**

Исследования в этой области показали, что энергоносителями в сельскохозяйственном производстве являются [23, 16]: электрическая энергия, тепловая энергия, твердое и жидкое топливо, моторное топливо и природный газ.

На [рис. 8.1](#) представлен график средних значений потребления энерго-ресурсов в процентном выражении.

Жидкое топливо используется сезонно для работы теплогенераторов зерносушилок. Однако потребление дизельного топлива для сушки составляет менее 5 % от потребления моторного топлива.

Газ используется в котельных небольшой мощности для отопления контор. Возобновляемые источники энергии не используются.

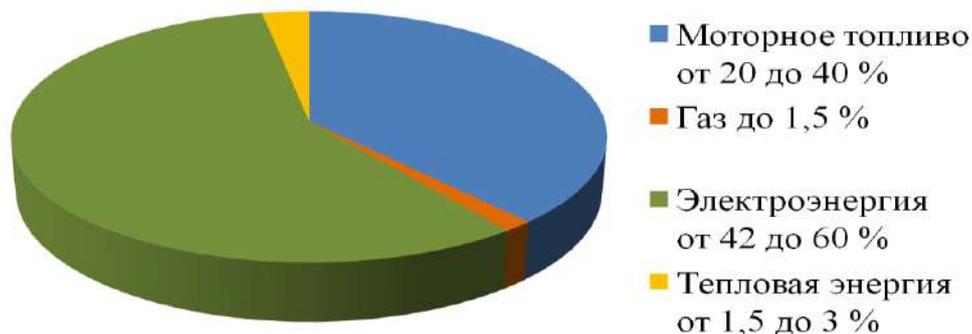


Рис. 8.1. Фактическое потребление энергоресурсов

На рисунке видно, что наиболее затратным энергоносителем является электрическая энергия (до 60 %). Затраты на моторное топливо, в основном дизельное, сопоставимы с затратами на потребленную электроэнергию. Доля тепловой энергии, газа и др. источников значительно меньше – до 6 %.

Для сельскохозяйственных предприятий молочного направления характерно преимущественное потребление электроэнергии животноводческими комплексами и фермами ([рис. 8.2](#)).

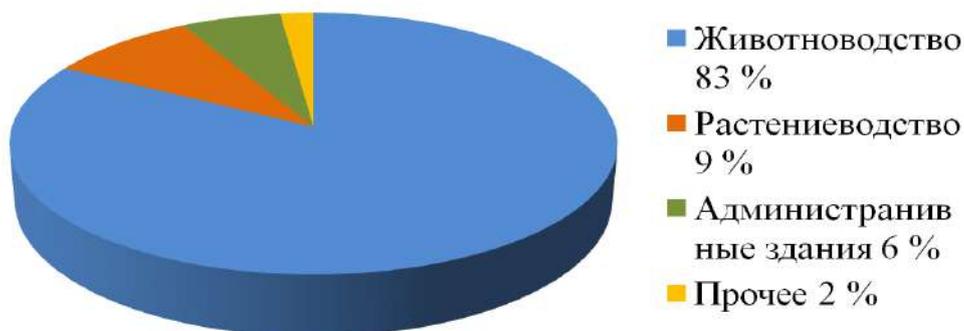


Рис. 8.2. Структура потребления электроэнергии сельхозпредприятиями

Использование электроэнергии в сельскохозяйственном производстве происходит в следующих направлениях: освещение, электронагрев, электропривод машин и механизмов, электротехнология и системы управления. Затраты на последнее – минимальные. Электротехнология применяется незначительно. Затраты на электропривод тесно связаны с технологией производ-

ства (доение, уборка навоза и т. д.) и трудно регулируются. Снижение затрат на электропривод повлечет изменение технологии производства, однако большое число двигателей в настоящее время эксплуатируются с минимальной загрузкой. Наибольший расход электроэнергии в хозяйствах приходится на электроосвещение (30–45 %) и обогрев, в том числе нагрев воды на технологические нужды. При этом в большинстве случаев используются неэкономичные системы освещения и водонагрева. На [рис. 8.3](#) представлен расход электроэнергии по основным технологическим процессам.

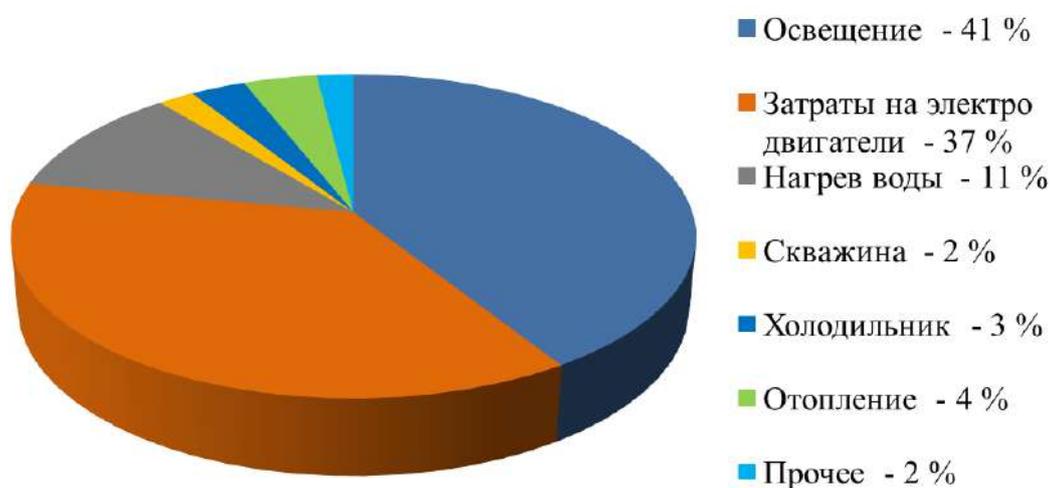


Рис. 8.3. Структура потребления на нужды в хозяйстве

Как видно из [рис. 8.3](#), наибольшее потребление электроэнергии происходит на нужды освещения (41 %). Снижая потребление электроэнергии на нужды освещения, возможно снизить энергоемкость производства основной продукции и уменьшить доли платы за энергоресурсы в стоимости произведенной продукции. Таким образом, одним из основных методов энергосбережения является совершенствование системы освещения. Совершенствование системы освещения может быть достигнуто следующими способами:

- заменой ламп (светильников) на энергосберегающие;
- внедрением автоматизированной системы управления.

**Контрольные вопросы**

1. Как классифицируются сельскохозяйственные потребители и их электроприемники в отношении требований к надежности электроснабжения?
2. Перечислите требования к схемам электрических сетей.
3. Раскройте особенности схем электроснабжения сельскохозяйственных потребителей.
4. Чем определяется энергоэффективность в сельском хозяйстве.

## 9. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

### 9.1. Структура потребления электрической энергии на железной дороге

Системы электроснабжения электрических железных дорог по сравнению с системами электроснабжения промышленных предприятий отличаются условиями работы, оборудованием и устройством. Поэтому имеются особенности в теории их работы, методах расчета и проектирования.

Потребители электрической энергии подразделяются на два типа – предприятия железнодорожного транспорта и посторонние железнодорожному транспорту предприятия. Структура потребления электрической энергии на железной дороге представлена на [рис. 9.1](#).



Рис. 9.1. Потребление электрической энергии на железной дороге

Предприятия железнодорожного транспорта обеспечивают потребление электрической энергии на тягу поездов и на нетяговые нужды. К последним относится обеспечение эксплуатационной работы и подсобно-вспомогательной деятельности. Эксплуатация включает в себя потребление электрической энергии, связанное с перевозочным процессом и с прочими производственными нуждами. Подсобно-вспомогательная деятельность предполагает потребление электрической энергии на производство промышленной продукции, коммунально-бытовое и др.

Предприятия, посторонние железнодорожному транспорту, могут быть самые разнообразные: промышленные, сельскохозяйственные, для оказания услуг населению и пр.

Вся совокупность устройств, начиная от генератора электрической станции и кончая тяговой сетью, линиями электропередач, составляет систему электроснабжения железной дороги, обеспечивающую питание электрической энергией – как электрической тяги, так и нетяговой нагрузки.

Основной задачей системы электроснабжения является обеспечение эксплуатационной работы железной дороги. При этом необходимо обеспечить мощность всех элементов системы такой, чтобы удовлетворялась потребность мощности каждого локомотива в любых условиях работы. Отсюда следует, что параметры системы электроснабжения должны быть выбраны так, чтобы обеспечивалась работа оборудования в допустимых для него пределах по нагрузке с учетом соответствующего резерва. При этом затраты должны быть минимальными.

Питание различных стационарных потребителей, а также прилегающих к железной дороге районов, осуществляется от одной и той же системы электроснабжения. При этом питание железнодорожных потребителей связано с работой конкретного участка железной дороги и поэтому должно обеспечиваться высокой надежностью.

## 9.2. Системы тягового электроснабжения железных дорог

Система электроснабжения электрифицированной железной дороги состоит из внешней части системы электроснабжения, включающей в себя устройства выработки, распределения и передачи электрической энергии до тяговых подстанций (исключительно); тяговой части системы электроснабжения, состоящей из тяговых подстанций линейных устройств и тяговой сети. Тяговая сеть, в свою очередь, состоит из контактной сети, рельсового пути, питающих и отсасывающих линий (фидеров), а также других проводов и устройств, присоединяемых по длине линии и контактной подвески непосредственно или через специальные автотрансформаторы [15].

Основным потребителем электрической энергии в тяговой сети является локомотив. Вследствие случайного расположения поездов неизбежны случайные сочетания нагрузок (например, пропуск поездов с минимальным межпоездным интервалом), которые могут существенным образом повлиять на режимы работы системы тягового электроснабжения.

Наряду с этим поезда, удаляющиеся от тяговой подстанции, питаются электрической энергией при более низком напряжении, что влияет на скорость движения поезда и, как следствие, на пропускную способность участка.

Кроме тяговых двигателей, приводящих в движение поезд, на локомотивах имеются вспомогательные машины, выполняющие различные функции. Производительность этих машин также связана с уровнем напряжения на их зажимах. Отсюда следует, что в системах тягового электроснабжения весьма важным является поддержание заданного уровня напряжения в любой точке тяговой сети.

Питание электрифицированного участка железной дороги осуществляется от энергосистемы конкретного региона. Принципиальная схема электроснабжения электрифицированной железной дороги показана на [рис. 9.2](#).

Внешняя система электроснабжения (I) включает в себя электрическую станцию 1, трансформаторную подстанцию 2, линию электропередачи 3. Тя-

говая система электроснабжения (II) содержит тяговую подстанцию 4, питающие фидеры 5, отсасывающий фидер 6, контактную сеть 7 и тяговый рельс 9, а также линейные устройства.

Электроснабжение железных дорог осуществляется по линиям 35, 110, 220 кВ, 50 Гц. Система тягового электроснабжения может быть как постоянного, так и переменного тока

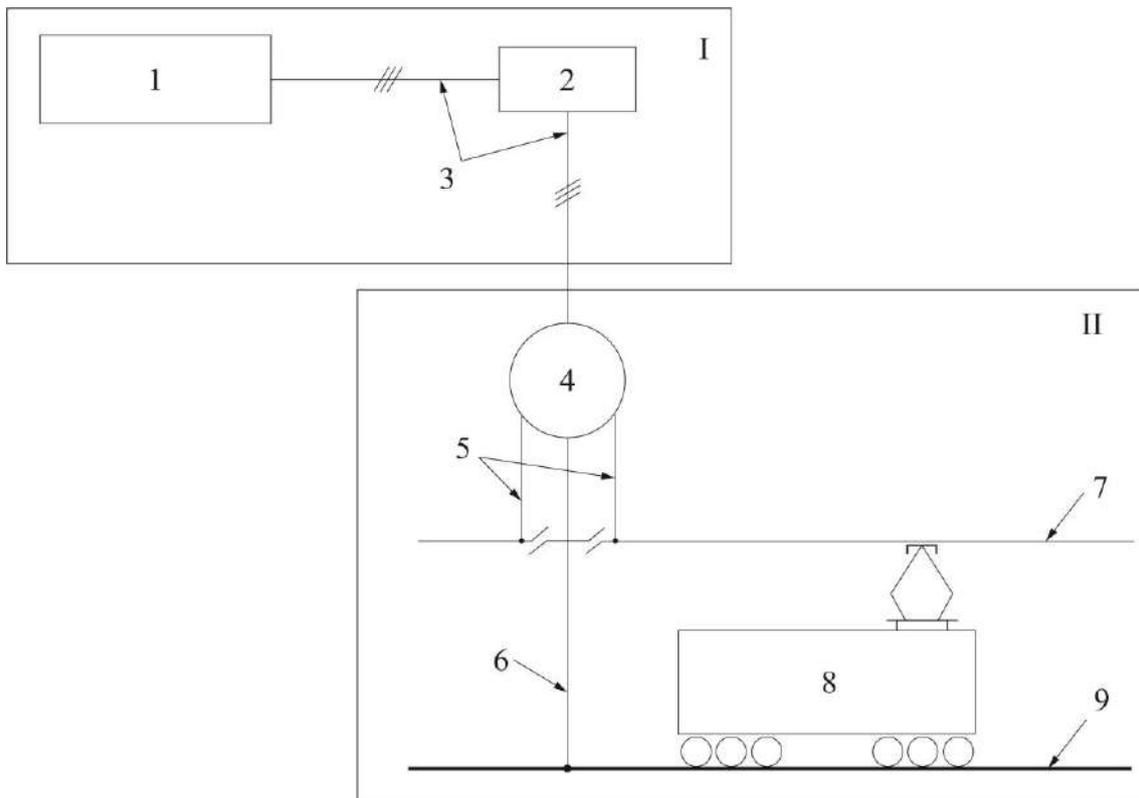


Рис. 9.2. Принципиальная схема электроснабжения электрифицированной железной дороги: 1 – районная электрическая станция; 2 – повышающая трансформаторная подстанция; 3 – трехфазная линия электропередачи; 4 – тяговая подстанция; 5 – питающая линия (фидер); 6 – отсасывающая линия (фидер); 7 – контактная сеть; 8 – электрический локомотив; 9 – рельсы

На железных дорогах нашей страны две системы электрической тяги: постоянного тока напряжением 3 кВ и переменного тока напряжением 25 кВ промышленной частоты 50 Гц. Система тяги определяется родом тока и значением напряжения в тяговой сети. Для обеих названных систем тяги создан и эксплуатируется разнообразный электроподвижной состав (ЭПС).

Одно и то же напряжение в тяговой сети при заданном роде тока можно получить несколькими способами, поэтому различают системы тяги и системы тягового электроснабжения, реализующие их. Под системой тягового электроснабжения понимают комплекс электротехнических устройств, предназначенных для получения напряжения, подаваемого в тяговую сеть.

В нашей стране используют три вида систем тягового электроснабжения: систему постоянного тока 3,3 кВ, систему однофазного переменного тока 25 кВ и систему однофазного переменного тока  $2 \times 25$  кВ. Система тяги переменного тока 25 кВ реализуется при применении двух последних систем тягового электроснабжения.

### **9.3. Система тягового электроснабжения постоянного тока напряжением 3 кВ**

Схема питания электрифицированного участка железной дороги постоянного тока показана на [рис. 9.3](#).

Питание тяговой сети в большинстве случаев осуществляется от шин 110 (220) кВ через понизительный трансформатор, который обеспечивает снижение напряжения до 10 кВ. К шинам 10 кВ подключен преобразователь, который состоит из тягового трансформатора и выпрямителя. Последний обеспечивает преобразование переменного тока в постоянный напряжением на шинах 3,3 кВ. Контактная сеть подключается к «плюс шине», а рельсы – к «минус шине».

Принципиальный признак системы тягового электроснабжения постоянного тока – электрическая связь тягового двигателя с контактной сетью, т. е. имеется контактная система токосъема. Тяговые двигатели для электропоездов и электропоездов постоянного тока предусмотрены на номинальное напряжение 1,5 кВ. Парно последовательное соединение таких двигателей позволяет иметь в тяговой сети напряжение 3 кВ.

Достоинство системы постоянного тока определяются качеством сервисного двигателя постоянного тока, характеристика которого в большей мере удовлетворяет требованиям, предъявляемым к тяговым двигателям.

Недостатки системы тягового электроснабжения постоянного тока можно назвать следующие:

– вследствие низкого напряжения в тяговой сети токовыми нагрузками и большими потерями электроэнергии (полный коэффициент полезного действия (КПД) системы электрической тяги постоянного тока оценивается равным 22 %);

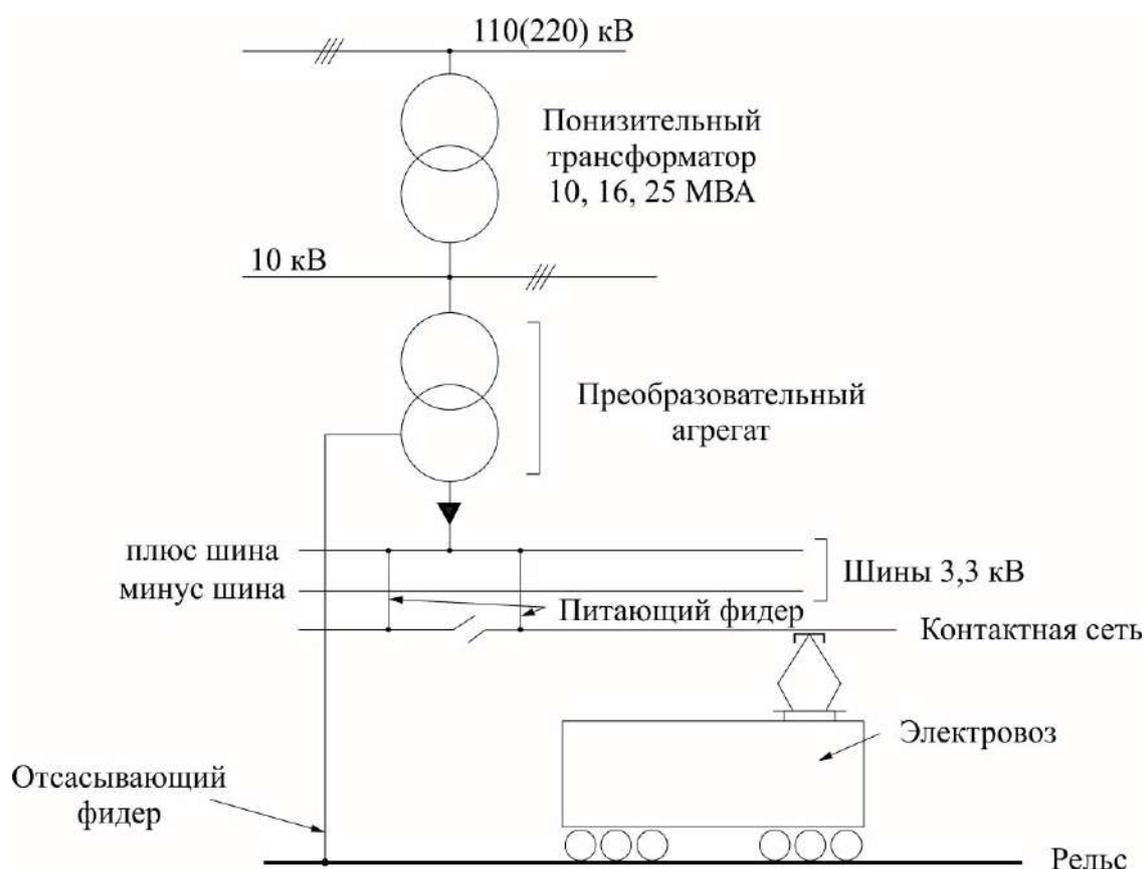


Рис. 9.3. Принципиальная схема питания электрифицированного участка железной дороги постоянного тока с напряжением в контактной сети 3 кВ

– при больших токовых нагрузках расстояние между тяговыми подстанциями равно 20 км и менее, что определяет высокую стоимость системы электроснабжения и большие эксплуатационные расходы;

– большие токовые нагрузки определяют необходимость иметь контактную подвеску большего сечения, что вызывает значительный перерасход дефицитных цветных металлов, а также возрастание механических нагрузок на опоры контактной сети;

– система электрической тяги постоянного тока характеризуется большими потерями электрической энергии в пусковых реостатах электровозов при разгоне (для пригородного движения они составляют примерно 12 % от общего расхода электрической энергии на тягу поездов);

– при электрической тяге постоянного тока имеет место интенсивная коррозия подземных металлических сооружений, в том числе опор контактной сети;

– применявшиеся до последнего времени на тяговых подстанциях шестипульсовые выпрямители имели низкий коэффициент мощности (0,88–0,92) и вследствие несинусоидальности кривой потребляемого тока являлись причиной ухудшения показателей качества электрической энергии (особенно на шинах 10 кВ).

На дорогах постоянного тока различают централизованную и распределенную схемы питания. Основное различие этих схем заключается в числе выпрямительных агрегатов на подстанциях и методах резервирования мощности. При схеме централизованного питания агрегатов на подстанции должно быть не менее двух. В случае распределенного питания все подстанции одноагрегатные, а расстояние между тяговыми подстанциями сокращается.

Существует требование, чтобы в случаях выхода из работы одного агрегата обеспечивались нормальные размеры движения. В первой схеме для резервирования используются дополнительные (резервные) агрегаты, а во второй – сознательный отказ от резервирования оборудования подстанций по узлам и переход к резервированию подстанций целиком.

#### 9.4. Система тягового электроснабжения однофазного переменного тока напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц

На железных дорогах, электрифицированных на переменном токе, наибольшее распространение получила система электроснабжения напряжением 25 кВ, частотой 50 Гц. Принципиальная схема питания электрифицированного участка показана на [рис. 9.4](#).

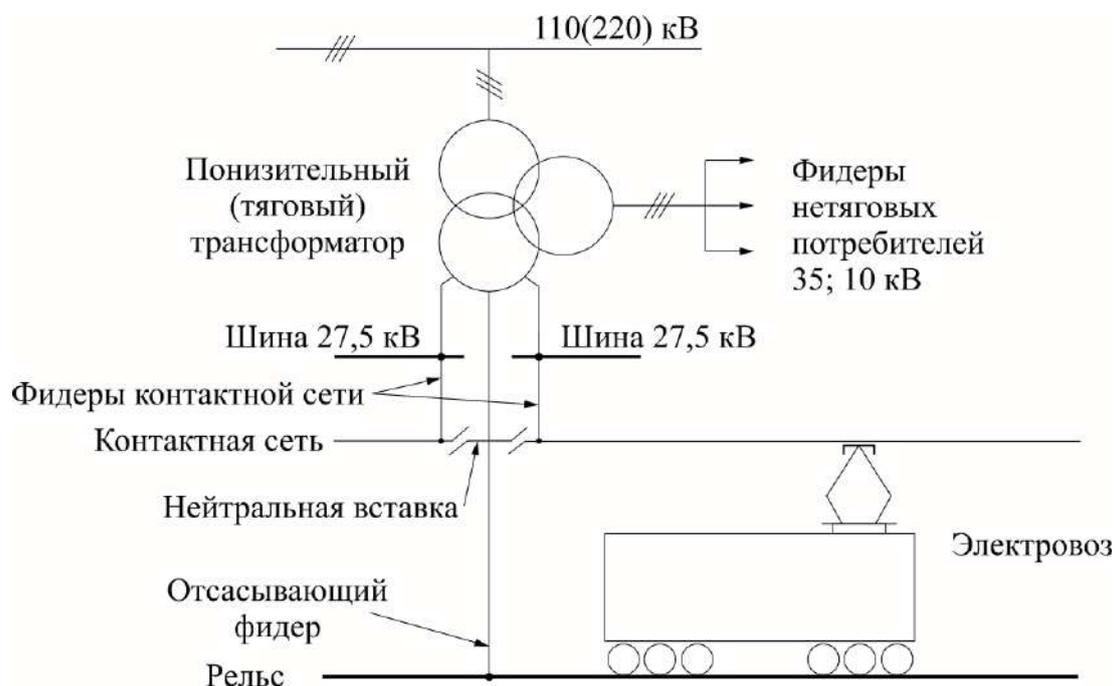


Рис. 9.4. Принципиальная схема питания электрифицированного участка железной дороги переменного тока напряжением в контактной сети 25 кВ, частотой 50 Гц

Питание тяговой сети осуществляется от шин 110 (220) кВ через пони- зительный (тяговый) трансформатор. Он имеет три обмотки:

I – обмотка высокого напряжения 110 (220) кВ;

II – обмотка низкого (среднего) напряжения 27,5 кВ для питания кон- тактной сети;

III – обмотка среднего (низкого) напряжения 35, 10 кВ для питания не- тяговых потребителей.

К шинам 27,5 кВ подключены фидеры контактной сети. При этом фазы А и В питают разные плечи тяговой подстанции. Для разделения фаз на контактной сети устраивается нейтральная вставка. Фаза С подключается к рельсам.

Принципиальный признак системы тягового электроснабжения переменного тока – электромагнитная связь тягового двигателя с контактной сетью – обеспечивается посредством трансформатора электровоза.

Достоинства системы:

- установлены независимые режимы напряжения в контактной сети и на тяговом двигателе при сохранении тягового двигателя постоянного тока;
- повышено напряжение в контактной сети до 25 кВ переменного тока, вследствие чего уменьшается ток нагрузки при одинаковой передаваемой мощности и уменьшаются потери напряжения и мощности;
- увеличено расстояние между тяговыми подстанциями и уменьшено их число (в два-три раза);
- уменьшен срок строительства и повышены темпы электрификации;
- сокращен расход цветных металлов.

Недостатки системы тягового электроснабжения переменного тока:

- несимметричный режим работы трехфазных трансформаторов (на двухплечевую нагрузку) и, как следствие, ухудшение показателей качества электрической энергии и значительное снижение их располагаемой мощности. Заметим, что под располагаемой мощностью трансформатора, работающего в несимметричном режиме, понимается мощность, соответствующая току прямой последовательности при такой нагрузке, когда ток в одной из фаз трансформатора принимает значение номинального;
- несинусоидальность системы потребляемых токов и также ухудшение качества электрической энергии в питающей системе электроснабжения (в кривой потребляемого электровозами тока при установленной на них двухпульсовой выпрямительной установке содержатся негативные высшие гармоники 3, 5, 7, ... с большим численным значением);

– низкий коэффициент мощности электровозов переменного тока (коэффициент полезного действия системы электрической тяги в целом оценивается равным 26 %);

– тяговая сеть переменного тока является источником электромагнитного влияния на смежные устройства, в том числе на линии связи, что определяет необходимость применения специальных мер, направленных на снижение электромагнитного влияния;

– наличие при двухсторонней схеме питания тяговой сети переменного тока уравнительных токов, а следовательно, дополнительных больших потерь электрической энергии.

### **9.5. Схема внешнего электроснабжения тяговых подстанций для систем электрической тяги постоянного и переменного тока**

Схемы питания электрифицированных железных дорог от энергосистемы весьма разнообразны. Они в большей мере зависят от применяемой системы электрической тяги, а также от конфигурации самой энергосистемы [14].

Рассмотрим принципиальные схемы питания при системах электрической тяги постоянного ([рис. 9.5](#)) и переменного ([рис. 9.6](#)) тока.

Обычно линия электропередачи частотой 50 Гц получает питание от энергосистемы и расположена вдоль железной дороги.

Под напряжением системы электрической тяги понимают номинальное напряжение, на которое изготавливается электроподвижной состав (ЭПС). Оно же является номинальным напряжением в контактной сети, напряжение на шинах подстанции обычно принимают на 10 % выше этого значения.

На [рис. 9.5](#) и 9.6 обозначено: 1 – энергосистема; 2 – линия электропередачи; 3 – тяговые подстанции (с выпрямителями подстанции постоянного тока и трансформаторные – переменного); 4 – контактная сеть; 5 – рельсы; 6 – электровоз.

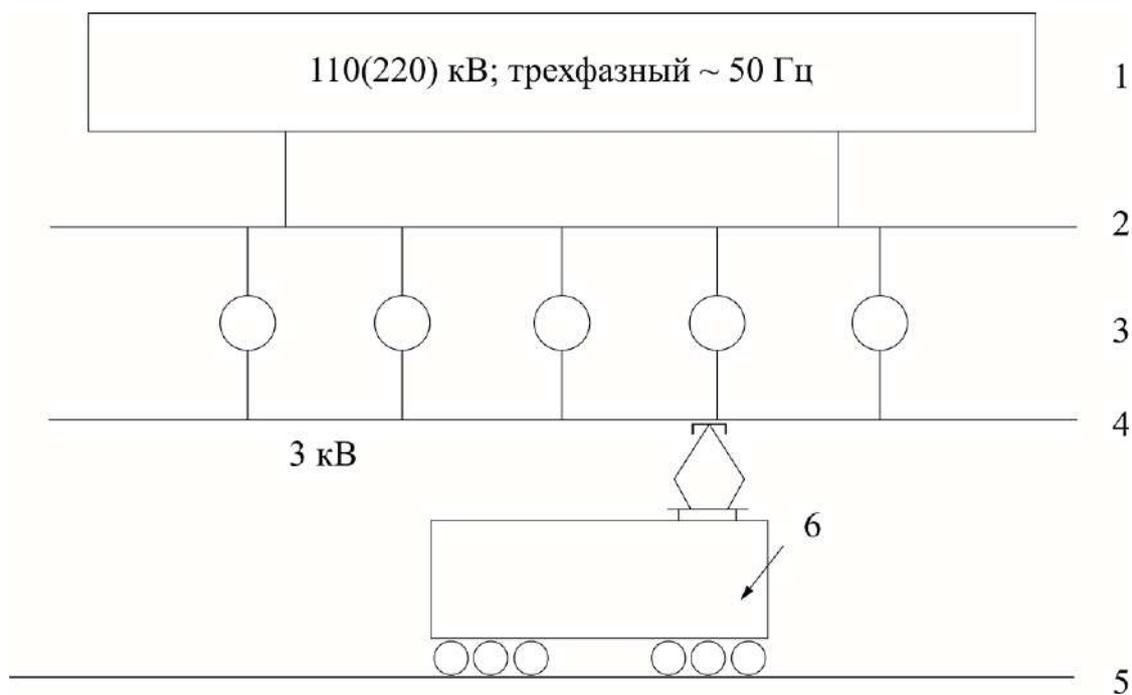


Рис. 9.5. Принципиальная схема питания железной дороги постоянного тока

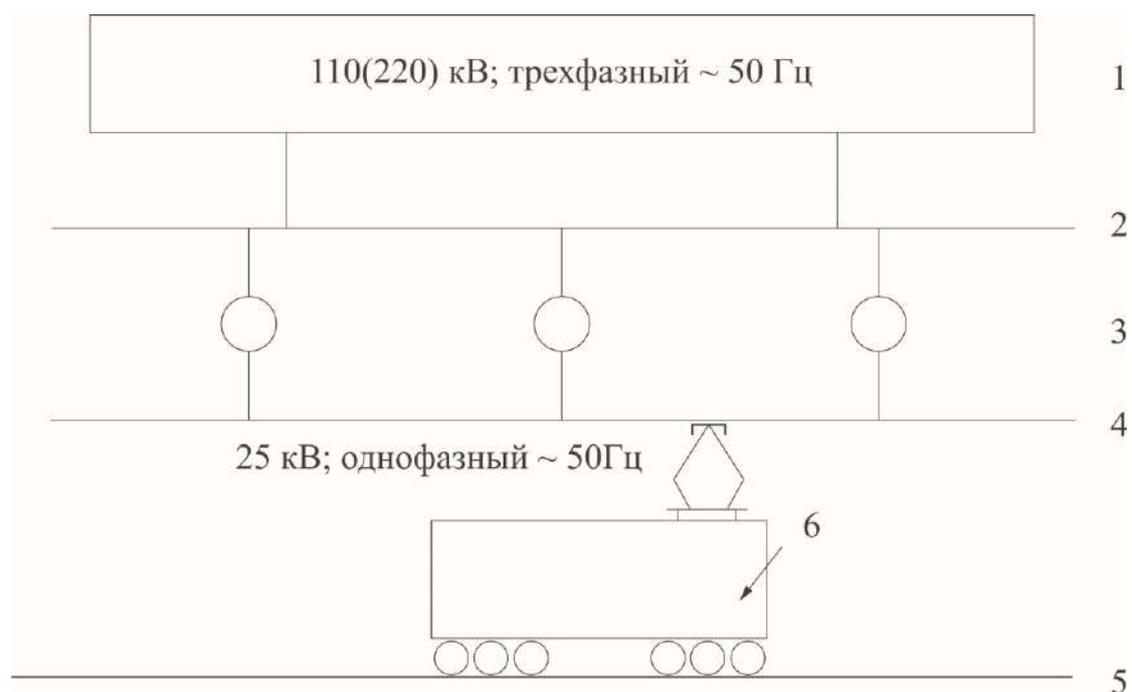


Рис. 9.6. Принципиальная схема питания железной дороги переменного тока

Электрифицированные железные дороги относятся к потребителям первой категории. Для таких потребителей предусмотрено питание от двух независимых источников электроэнергии. Таковыми считаются отдельные районные подстанции, разные секции шин одной и той же подстанции – районной

или тяговой. Поэтому схема питания тяговых подстанций от энергосистемы должна быть такой, чтобы выход из работы одной из районных подстанций или линии передачи не мог бы быть причиной выхода из строя более одной тяговой подстанции. Достичь этого можно путем выбора рациональной схемы питания тяговых подстанций от энергосистемы.

### 9.6. Схемы присоединения тяговых подстанций к линиям электропередачи

Схема питания тяговых подстанций от ЛЭП показана на [рис. 9.7](#).

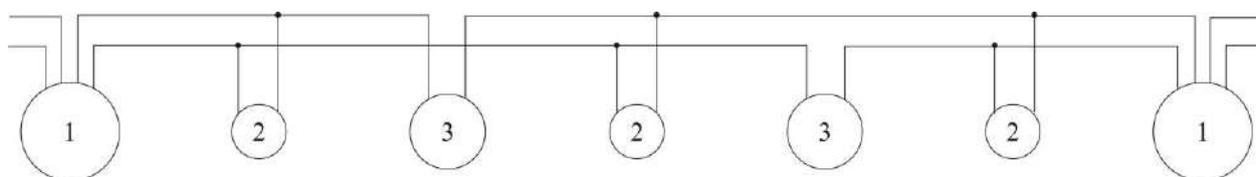


Рис. 9.7. Схема двустороннего питания тяговых подстанций  
от двухцепной линии электропередач

В общем случае схема питания тяговых подстанций зависит от конфигурации районной сети, резерва мощности электрических станций и подстанций, возможности их расширения и др. Во всех случаях для большей надежности стремятся иметь схему двухстороннего питания тяговых подстанций ([рис. 9.7](#)). На [рис. 9.7](#) обозначено:

1 – опорная тяговая подстанция (не менее трех вводов высоковольтных линий). Оснащается комплексом высоковольтных коммутационных аппаратов и устройств автоматической защиты от повреждений.

2 – промежуточная отпаячная подстанция. Высоковольтные выключатели не устанавливаются, за счет чего удешевляется система электроснабжения.

3 – промежуточная транзитная подстанция, обеспечивается секционирование высоковольтных линий для ремонта или отключения при повреждениях.

Обеспечение надежности системы электроснабжения достигается: использованием двухцепной линии высокого напряжения, обеспечением двухстороннего питания каждой сети ЛЭП, секционированием ЛЭП на транзитных подстанциях, наличием быстродействующей автоматической защиты на опорных, транзитных тяговых и районных подстанциях.

Обеспечение экономичности системы электроснабжения достигается сокращением высоковольтной аппаратуры (выключателей) за счет промежуточных подстанций, не имеющих таких выключателей. При повреждениях на этих подстанциях быстродействующей защитой отключаются линии на опорных подстанциях, а в бестоковую паузу – на промежуточных. Неповрежденные подстанции включаются системой автоматического повторного включения.

При питании от одноцепной линии передачи присоединение подстанций на отпайках не допускается. Все подстанции включаются в разрез линии, причем на каждой подстанции промежуточные линии передачи секционируются выключателем.

### **9.7. Особенности схем питания тяговой сети однофазного тока промышленной частоты**

На дорогах однофазного переменного тока питание тяговой сети осуществляется от трехфазной линии передачи электрической энергии через трансформаторы, обмотки которых соединены в ту или иную схему.

На отечественных железных дорогах применяют в основном трехфазные трехобмоточные трансформаторы, включаемые по схеме «звезда – звезда – треугольник», типа ТДТНГЭ, мощностью 20, 31,5 и 40,5 МВ·А. Первичное напряжение – 110 или 220 кВ, вторичное на тягу – 27,5 кВ, для районных потребителей – 38,5 и 11 кВ.

Для питания только тяговой нагрузки применяют трехфазные двухобмоточные трансформаторы типа ТДГ и ТДНГ со схемой соединения обмоток

«звезда – треугольник». Мощность указанных трансформаторов такая же, как и у трехобмоточных трансформаторов. Соединение тяговой обмотки «треугольником» позволяет получить более пологую внешнюю характеристику. Одну вершину «треугольника» присоединяют к рельсам, а две другие – к разным секциям контактной сети.

Схема питания тяговой сети однофазного переменного тока от трехфазного трансформатора с соединением обмоток «звезда – треугольник» показана на [рис. 9.8](#).

При питании тяговой нагрузки от трех фаз секции тяговой сети слева и справа от подстанции должны питаться от разных фаз. Следовательно, они имеют напряжения, не совпадающие по фазе друг с другом.

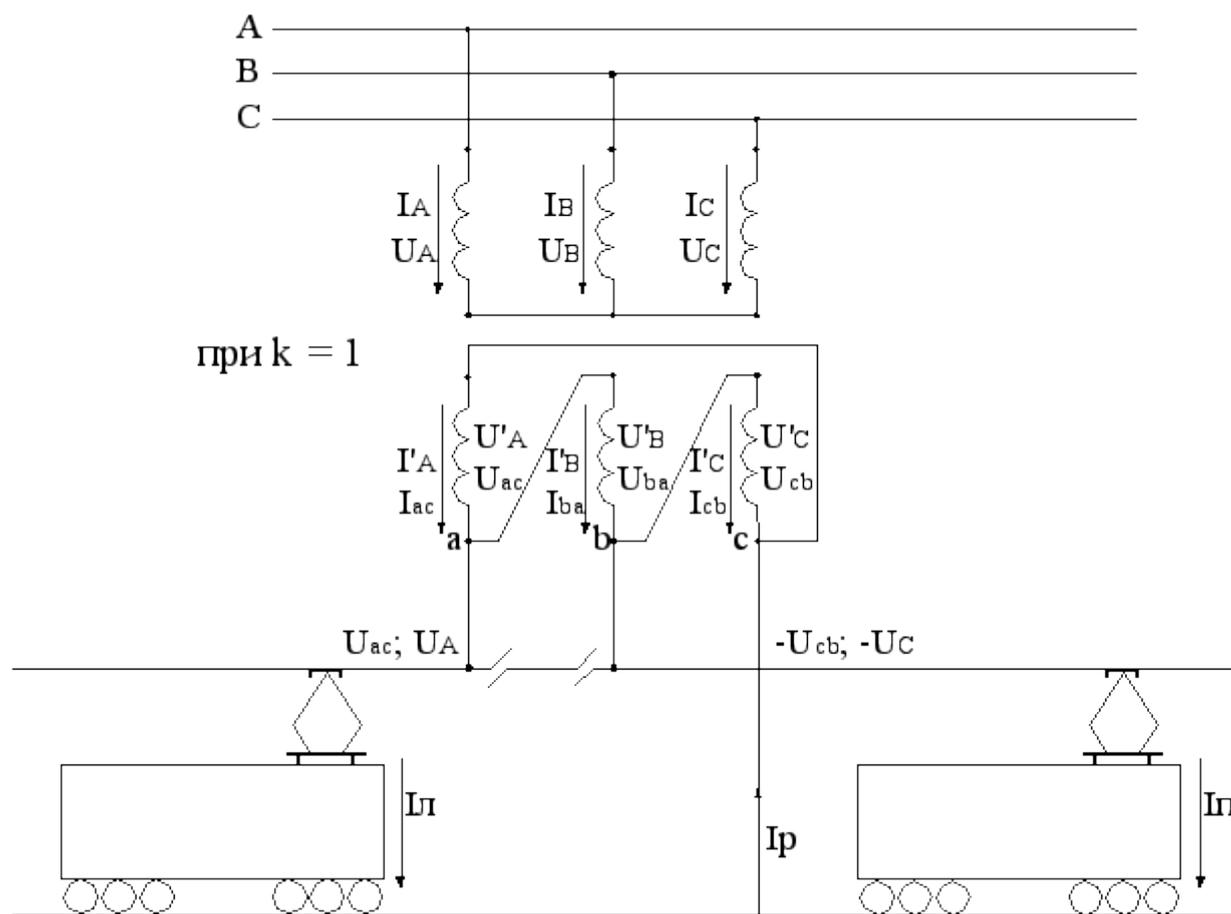


Рис. 9.8. Схема питания тяговой сети однофазного переменного тока от трехфазного трансформатора с соединением обмоток «звезда – треугольник»

Токи в фазах можно получить непосредственно из уравнений Кирхгофа. Если в рассматриваемый момент времени слева от подстанции нагрузка  $I_{\text{л}}$  и справа  $I_{\text{п}}$ , то можно записать:

$$I_{ac} = I_{ba} + I_{\text{л}}; \quad (9.1)$$

$$I_{ba} = I_{cb} + I_{\text{п}}; \quad (9.2)$$

$$I_{cb} = I_{ac} - I_{\text{л}} - I_{\text{п}}; \quad (9.3)$$

$$I_{ac} + I_{ba} + I_{cb} = 0. \quad (9.4)$$

Из уравнения [\(9.4\)](#) следует:

$$I_{ba} = -I_{ac} - I_{cb}. \quad (9.5)$$

Выражение [\(9.5\)](#) подставим в уравнение [\(9.1\)](#):

$$I_{ac} = -I_{ac} - I_{cb} + I_{\text{л}}. \quad (9.6)$$

Подставив формулу [\(9.3\)](#) в выражение [\(9.6\)](#), получим:

$$I_{ac} = -I_{ac} - I_{ac} + I_{\text{л}} + I_{\text{п}} + I_{\text{л}};$$

$$3I_{ac} = 2I_{\text{л}} + I_{\text{п}};$$

$$I_{ac} = \frac{2}{3}I_{\text{л}} + \frac{1}{3}I_{\text{п}}. \quad (9.7)$$

Подставив формулу (9.7) в выражение (9.3), получим:

$$I_{cb} = \frac{2}{3}I_{л} + \frac{1}{3}I_{п} - I_{л} - I_{п};$$

$$I_{cb} = \frac{1}{3}I_{л} - \frac{2}{3}I_{п}. \quad (9.8)$$

Подставив формулу (9.8) в выражение (9.2), получим:

$$I_{cb} = -\frac{1}{3}I_{л} - \frac{2}{3}I_{п} + I_{п};$$

$$I_{ba} = -\frac{1}{3}I_{л} + \frac{1}{3}I_{п}.$$

## 9.8. Система электроснабжения наземного электрического транспорта

К числу наземного электрического транспорта относят трамваи и троллейбусы, которые используются в основном как городские транспортные средства. Для питания этого вида транспорта системы электроснабжения могут быть централизованными и распределенными.

Централизованная система электроснабжения – это система, в которой каждая тяговая подстанция питает протяженный район контактной сети по многим кабелям, децентрализованная – система, как правило, с двумя плюсовыми и двумя минусовыми кабелями, выводимыми на контактную сеть, каждая секция которой питается с двух сторон от двух тяговых подстанций.

Питание тяговых подстанций производится по кабельным линиям напряжением 6 или 10 кВ, присоединяемым к распределительному устройству высшего напряжения. Современные тяговые подстанции служат для преобразования трехфазного тока напряжением 6 или 10 кВ, частотой 50 Гц в постоянный. Для городского электрического наземного транспорта принято

напряжение постоянного тока: на шинах тяговой подстанции – 600 В, на токоприемнике трамвая и троллейбуса – 550 В. Структурная схема тяговой подстанции приведена на [рис. 9.9](#).

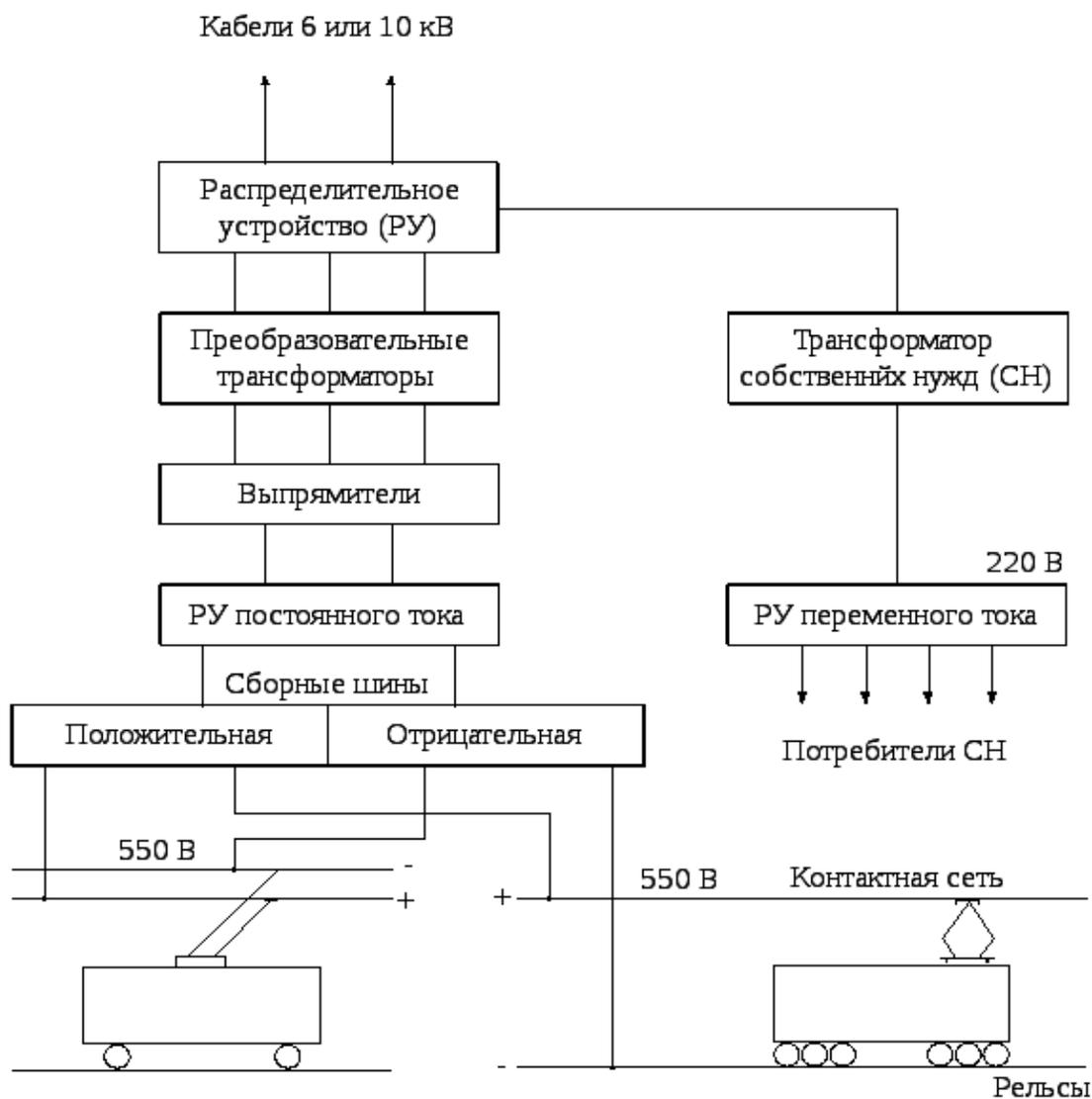


Рис. 9.9. Структурная схема тяговой подстанции и тяговой сети электрического транспорта

Классификация тяговых подстанций может быть проведена по нескольким показателям: по назначению подстанции бывают трамвайные, троллейбусные, трамвайно-троллейбусные; наибольшее распространение в практике получили наземные подстанции. Для централизованного электроснабжения трамвая и троллейбуса их строят трехагрегатными, а децентрализованного – одно- и двухагрегатными.

## 9.9. Электроснабжение нетяговых потребителей

Основной особенностью электрификации железных дорог России является то, что системам электроснабжения, создаваемым для питания железных дорог, определяются и функции системы, питающей районных потребителей. В этом есть одно из достоинств системы тягового электроснабжения.

Питание районных потребителей осуществляется либо специальными линиями электропередачи 10–35 кВ непосредственно от тяговой подстанции, либо от ЛЭП продольного электроснабжения, т. е. от линии передачи, подвешенной на опорах контактной сети, также получающей питание от тяговой подстанции. Такая система позволяет закрыть мелкие электрические станции, выработка энергии на которых всегда сопряжена со значительными расходами.

При электрификации на постоянном токе, где расстояние между подстанциями небольшое, принимают напряжение в продольной ЛЭП 10 кВ. На этих подстанциях при двойной трансформации используется вторичное напряжение тех же трансформаторов, от которых получают питание и преобразовательные агрегаты. В тех случаях, когда для района желательно иметь и 35, и 10 кВ, в качестве понижающих применяются трехобмоточные трансформаторы. Третья обмотка в этом случае имеет напряжение 35 кВ и обеспечивает питание нетяговых потребителей.

При электрификации на однофазном токе продольная линия электропередачи имеет напряжение 25 кВ ([рис. 9.10](#)).

Она обслуживает электропотребителей, расположенных в полосе до 30–50 км от железной дороги. Осуществляется такая линия передачи на дорогах однофазного тока путем подвески двух дополнительных (к контактной подвеске) проводов на опорах контактной сети и с использованием рельсов как третьего провода трехфазной сети. Такую линию принято называть линией ДПР (два провода – рельсы).

Линия ДПР получает питание с одной стороны консольно во избежание перетоков энергии по этой относительно маломощной линии или из-за того, что смежные подстанции на вторичной стороне имеют разные фазы.

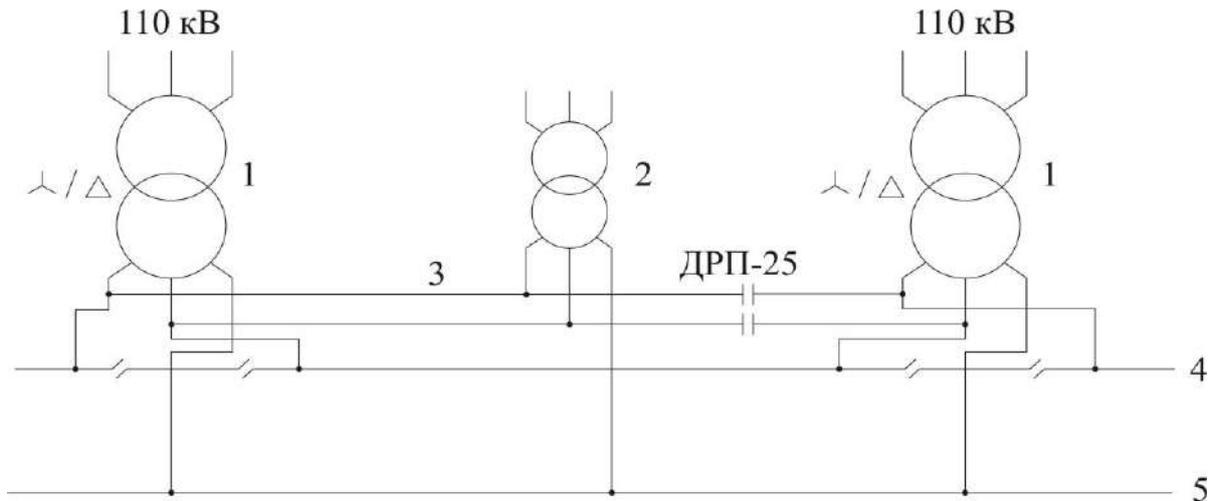


Рис. 9.10. Схема питания нетяговых потребителей по линии ДПР (два провода – рельсы): 1 – тяговый трансформатор; 2 – понижающий трансформатор потребителя; 3 – линия питания нетяговых потребителей; 4 – контактная сеть; 5 – рельсы

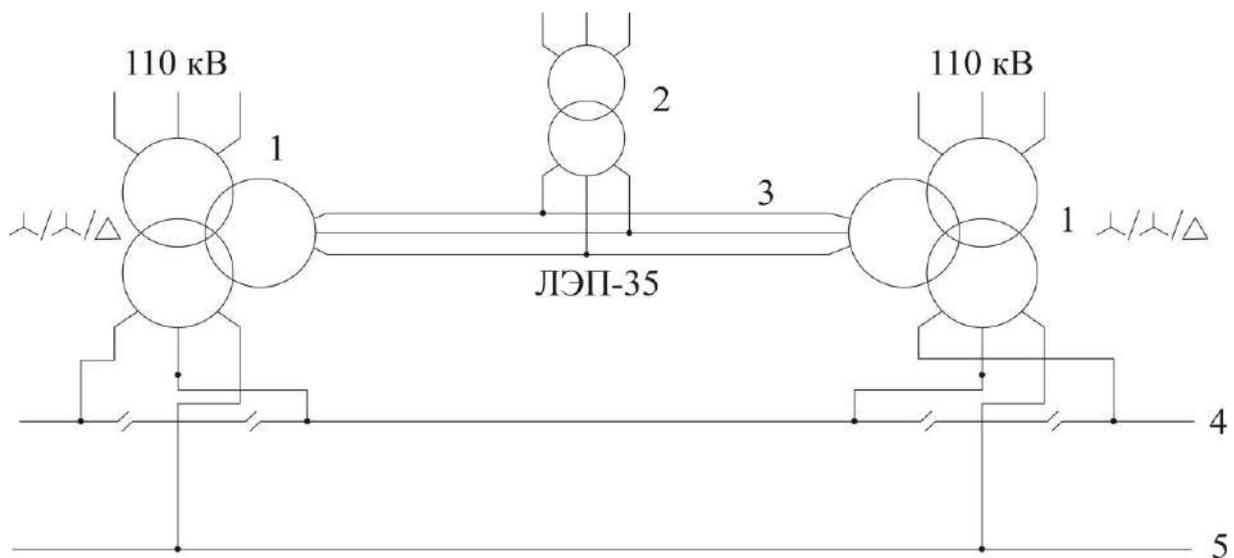


Рис. 9.11. Схема питания нетяговых потребителей от трехфазной ЛЭП 35 кВ: 1 – тяговый трансформатор; 2 – понижающий трансформатор потребителя; 3 – линия питания нетяговых потребителей; 4 – контактная сеть; 5 – рельсы

Отбор мощности от таких линий передачи осуществляется обычно при помощи КТП. При мощных потребителях напряжение этой линии может быть увеличено до 35 кВ ([рис. 9.11](#)).

**Контрольные вопросы**

1. Обоснуйте принципиальную схему электроснабжения электрифицированной железной дороги.
2. Приведите пример схемы питания электрифицированного участка железной дороги постоянного тока.
3. Приведите пример схемы питания электрифицированного участка железной дороги переменного тока напряжением в контактной сети 25 кВ, частотой 50 Гц.
4. Раскройте особенности схем питания тяговой сети однофазного тока промышленной частоты.
5. Раскройте особенности системы электроснабжения наземного электрического транспорта.
6. Раскройте особенности электроснабжения нетяговых потребителей.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Анчарова, Т. В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений [Текст] : учебник / Т. В. Анчарова, М. А. Рашевская, Е. Д. Стебунова. – М. : ИНФРА-М, 2012. – 416 с.
2. Гужов, Н. П. Системы электроснабжения [Текст] : учебник / Н. П. Гужов – Ростов н/Д : Феникс, 2011. – 382 с.
3. Коннов, А. А. Электрооборудование жилых зданий [Текст] / А. А. Коннов. – 6-е изд., стереотип. – М. : Додэка-XXI, 2010. – 254 с.
4. Конюхова, Е. А. Электроснабжение объектов : учеб. пособие для студ. / Е. А. Конюхова. – 4-е изд., стер. – М. : Академия, 2007. – 320 с.
5. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий [Текст]: учебник / Б. И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2007. – 672 с. : ил.
6. Ополева, Г. Н. Схемы и подстанции электроснабжения : справочник / Г. Н. Ополева. – М. : ИД ФОРУМ : ИНФРА-М, 2010. – 480 с.
7. Ополева, Г. Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов [Текст] : учеб. пособие; / Г. Н. Ополева. – М. : ИД ФОРУМ : ИНФРА-М, 2018. – 416 с.
8. Основы современной энергетики. Часть 2. Современная электроэнергетика : учебник / под ред. Е. В. Аметистова. – М. : Издательский дом МЭИ, 2010. – 632 с. – (ЭБ НЭЛБУК).
9. Постановление Правительства РФ от 01.12.2009 № 977 «Об инвестиционных программах субъектов электроэнергетики» // Собрание законодательства РФ. – 07.12.2009. – № 49 (2 ч.). – Ст. 5978.
10. Правила устройства электроустановок. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями. – М. : КНОРУС, 2010.
11. Приказ Минэнерго России от 14.10.2013 г. № 718 (ред. от 27.10.2014 г.) «Об утверждении Методических указаний по расчету уровня

надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций» (Зарегистрировано в Минюсте России 31.12.2013 г. № 30988).

12. Сивков, А. А. Основы электроснабжения [Текст] : учеб. пособие / А. А. Сивков, А. С. Сайгаш, Д. Ю. Герасимов. – 2-е изд., испр. и доп. – М : Юрайт, 2016. – 173 с. СТО 34.01-21.1-001-2017. Распределительные электрические сети напряжением 0,4–110 кВ.

13. Требования к технологическому проектированию [Электронный ресурс] : стандарт организации ПАО «РОССЕТИ». – Дата введения: 02.08.2017. – Режим доступа : <http://docplayer.ru/71083884-Raspredelitelnye-elektricheskie-seti-napryazheniem-0-4-110-kv-trebovaniya-k-tehnologicheskomu-proektirovaniyu.html>

14. Схема внешнего электроснабжения тяговых подстанций для систем электрической тяги постоянного и переменного тока [Электронный ресурс] // Электрические сети : сайт. – Режим доступа : <http://leg.co.ua/arhiv/podstancii/elektrosnabzhenie-elektrificirovannyh-zheleznih-dorog-3.html>

15. Тер-Оганов, Э. В. Электроснабжение железных дорог : учеб. для студентов университета (УрГУПС) / Э. В. Тер-Оганов, А. А. Пышкин. – Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2014. – 432 с.

16. Тимофеев Е. В. Повышение энергоэффективности в сельском хозяйстве / Е. В. Тимофеев, А. Ф. Эрк, В. Н. Судаченко, В. А. Размук // Молодой ученый. – 2017. – № 4. – С. 213–217. – URL : <https://moluch.ru/archive/138/38851/> (дата обращения: 28.07.2018).

17. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. – 30.11.2009. – № 48. – Ст. 5711.

18. Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике» // Собрание законодательства РФ. – 31.03.2003. – № 13. – Ст. 1177.

19. Фролов, Ю. М. Основы электроснабжения [Текст] : учеб. пособие / Ю. М. Фролов, В. П. Шелякин; – СПб. : Лань, 2012. – 480 с.

20. Хорольский, В. Я. Эксплуатация систем электроснабжения [Текст] : учеб. пособие / В. Я. Хорольский, М. А. Таранов – М. : ИНФРА-М, 2013. – 288 с.

21. Щербаков, Е. Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях [Текст] : учеб. пособие / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов. – М. : Форум, 2014. – 596 с.

22. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. – Режим доступа : <https://meganorm.ru/Index2/1/4293748/4293748262.htm>

23. Эрк, А. Ф. Методы энергосбережения и повышения энергоэффективности сельскохозяйственного производства / А. Ф. Эрк, В. Н. Судаченко // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства / ИАЭП. – СПб., 2015. – № 87. – С. 233–239.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АВР – автоматическое включение резерва  
АЭС – атомная электростанция  
ВВП – валовой внутренний продукт  
ВДТ – вольтодобавочный трансформатор  
ВЛ – воздушная линия  
ГОСТ – государственный стандарт  
ГПП – главная понизительная подстанция  
ГРЭС – государственная районная электростанция  
ГЭС – гидроэлектростанция  
ДПР – линия «два провода – рельсы»  
ЕНЭС – единая национальная энергетическая сеть  
ЕЭС – единая энергетическая система  
ЖКХ – жилищно-коммунальное хозяйство  
ЗРУ – закрытое распределительное устройство  
ИП – источник питания  
ИРМ – источник реактивной мощности  
КБ – конденсаторная батарея  
КЗ – короткое замыкание  
ККУ – комплектная конденсаторная установка  
КЛ – кабельная линия  
КРУ – комплектное распределительное устройство  
КРУН – КРУ наружной установки  
КТП – комплектная трансформаторная подстанция  
КТПН – КТП наружной установки  
ЛЭП – линия электропередач  
НН – низкое напряжение  
ОГК – оптовая генерирующая компания  
ОРУ – открытое распределительное устройство  
ОРЭ – открытый рынок электрической энергии и мощности  
ОЭС – объединенная энергосистема  
ПГВ – подстанция глубокого ввода  
ПКЭ – показатели качества электроэнергии  
ПРА – пускорегулирующая аппаратура  
ПС – подстанция  
ПУЭ – правила устройства электроустановок  
Р – разъединитель  
РЗА – релейная защита и автоматика  
РП – распределительный пункт  
РПН – регулирование под нагрузкой  
РТП – распределительный трансформаторный пункт  
РУ – распределительное устройство  
РУНН – распределительное устройство низкого напряжения  
СВ – секционный выключатель  
СД – синхронный двигатель  
СКРМ – средство компенсации реактивной мощности  
СР – сопротивление разрядное  
СТП – столбовая трансформаторная подстанция  
СЭС – система электроснабжения  
ТГК – территориальная генерирующая компания

ТДТНГЭ – трансформатор трехфазный, масляный, с принудительным охлаждением – ду-  
тьем, трехобмоточный, с регулированием напряжения под нагрузкой, грозоупорный, для  
электрической тяги

ТН – трансформатор напряжения

ТП – трансформаторная подстанция

ТСН – трансформатор собственных нужд

ТЭК – топливно-энергетический комплекс

ТЭО – технико-экономическое обоснование

ТЭС – тепловая электростанция

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль

ЦЭН – центр электрических нагрузок

ШМА – шинопровод магистральный алюминиевый

ШОС – шинопровод осветительный

ШР – шкаф распределительный

ШРА – шинопровод распределительный алюминиевый

ЭП – электроприемник

ЭСПП – электроснабжение промышленных предприятий

ЭУ – электроустановка

ЭЭ – электрическая энергия

ЭЭС – электроэнергетическая система