

*Памяти учителей наших  
посвящается*



**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**РЕДАКЦИОННЫЙ  
С О В Е Т**

*Председатель*

**Л.А. ПУЧКОВ**

---

*Зам. председателя*

**Л.Х. ГИТИС**

---

*Члены редсовета*

**И.В. ДЕМЕНТЬЕВ**

---

**А.П. ДМИТРИЕВ**

---

**Б.А. КАРТОЗИЯ**

---

**М.В. КУРЛЕНЯ**

---

**В.И. ОСИПОВ**

---

**Э.М. СОКОЛОВ**

---

**К.Н. ТРУБЕЦКОЙ**

---

**В.В. ХРОНИН**

---

**В.А. ЧАНТУРИЯ**

---

**Е.И. ШЕМЯКИН**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**

**ректор МГГУ,  
чл.-корр. РАН**

**директор  
Издательства МГГУ**

**академик РАЕН**

**академик РАЕН**

**академик РАЕН**

**академик РАН**

**академик РАН**

**академик МАН ВШ**

**академик РАН**

**профессор**

**академик РАН**

**академик РАН**

**ВЫСШЕЕ ГОРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ**

---

**Л.А. Плащанский**

**ОСНОВЫ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ГОРНЫХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ**

*Издание второе, исправленное*

*Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области горного дела в качестве учебника для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» (квалификация — горный инженер) направления подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии»*

**МОСКВА**

**ИЗДАТЕЛЬСТВО  
МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА**



---

**2 0 0 6**

УДК 621.31:622(075.8)

ББК 31.27:31.28

П 37

*Федеральная целевая программа «Культура России», подпрограмма  
«Поддержка полиграфии и книгоиздания России»*

*Экспертиза проведена*

*Учебно-методическим объединением высших учебных заведений  
Российской Федерации по образованию в области горного дела  
(протокол № 51 от 28.01.04)*

*Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным  
для взрослых. Сан ПиН 1.2.1253-03», утвержденным Главным государственным  
санитарным врачом России 30 марта 2003 г.*

**Рецензенты:**

- кафедра «Теоретическая электротехника и электрификация нефтяной и газовой промышленности» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина (зав. кафедрой проф., д-р техн. наук *М.С. Ершов*);
- действительный член Академии горных наук, проф., д-р техн. наук *А.Т. Ерыгин* (зав. отделом ИПКОП РАН);
- д-р техн. наук, проф. *С.И. Гамазин* [Московский энергетический институт (Технический университет)]

**Плащанский Л.А.**

П 37

Основы электроснабжения горных предприятий: Учебник для вузов.  
— 2-е изд., исправ. — М.: Издательство Московского государственного  
горного университета, 2006. — 499 с.: ил.

ISBN 5-7418-0441-1 (в пер.)

Приведены категории электроприемников с точки зрения надежности и их характеристики, методы определения электрических нагрузок. Рассмотрены переходные процессы, методы выбора напряжения и определения качества электрической энергии. Даны общие сведения о подстанциях, элементах и аппаратах системы электроснабжения. Изложены вопросы защиты электроустановок от аномальных режимов и перенапряжений, а также устройства заземляющей сети, автоматизации и эксплуатации систем электроснабжения. В каждом разделе даны контрольные вопросы и темы рефератов для самостоятельной работы.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов» (квалификация — горный инженер) направления подготовки дипломированных специалистов «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Может быть полезен студентам других специальностей, а также аспирантам и инженерно-техническим работникам горной промышленности.

УДК 621.31:622 (075.8)

ББК 31.27:31.28

ISBN 5-7418-0441-1

© Л.А. Плащанский, 2005, 2006

© Издательство МГГУ, 2005, 2006

© Дизайн книги. Издательство МГГУ, 2005, 2006

Учебник «Основы электроснабжения горных предприятий» написан по программе дисциплины «Основы электроснабжения» для специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов (квалификация — горный инженер) с учетом опыта чтения данного курса в Московском государственном горном университете.

Настоящий учебник для вузов развивает положения учебно-методических изданий кафедры электрификации горных предприятий.

В учебном плане курс «Основы электроснабжения» базируется на курсах «Теоретические основы электротехники», «Метрология», «Электрические и электронные аппараты», «Электрические машины», «Электрический привод», «Преобразовательная техника», «Физические основы электроники».

В свою очередь, содержание этой дисциплины служит базой для профилирующих курсов квалификационной специализации по электрификации горного производства (при открытом и подземном способах добычи полезного ископаемого), городского подземного строительства, управлению энергохозяйством горных предприятий.

Учитывая специфику отраслевого характера, горный инженер по указанной специальности должен обладать знаниями, умениями и навыками проектировщика, электромонтажника и наладчика при новом строительстве и техническом перевооружении действующего предприятия, а как специалист-эксплуатационник обеспечивать развитие систем электроснабжения и их безаварийную работу.

Система электроснабжения, используя выработанную и получаемую электроэнергию, эксплуатируя различное электротехническое оборудование, обеспечивает любой технологический процесс достаточной и качественной электроэнергией, способствуя росту производства.

Особые технические решения в области электроснабжения промышленных, а особенно горных предприятий, обнаружили уже в 20—30 годы прошлого столетия, когда в работах Н.В. Копытова и В.С. Либермана были сформулированы основные требования и положения по расчету электрических нагрузок, выбору силовых трансформаторов и их размещению, формированию электрических сетей, выбору напряжения и др. Дальнейшее фундаментальное развитие эти и смежные с ними вопросы нашли в трудах А.А. Ермилова, Г.М. Каялова, Т.А. Константинова, С.А. Ульянова, А.А. Гайца, А.А. Федорова, В.И. Гордеева, В.В. Шевченко, Л.В. Гладилина, М.И. Озерного, В.Н. Винославского, С.А. Волотковского, И.В. Жежеленко.

Основное отличие настоящего учебника заключается в необходимости дать будущему специалисту знания по более широкому кругу вопросов электроснабжения, поскольку в своей практической деятельности на горных

предприятиях ему придется решать задачи, связанные с электроприводом, электроснабжением и автоматикой, поэтому содержанием одного из базисных курсов в системе подготовки «горного инженера-электромеханика» является комплексное изучение вопросов, связанных с передачей, преобразованием и распределением электроэнергии между потребителями горных предприятий с различным способом добычи полезного ископаемого.

Особое внимание уделено методам расчетов, на которых базируется выбор электрооборудования, методам защиты электроустановок от перенапряжений, повреждений и аномальных режимов работы и защиты персонала от поражения электрическим током, а также технико-экономической оценке рассматриваемых схемных и конструктивных решений.

Автор благодарен рецензентам за ценные замечания и коллективу кафедры за поддержку в процессе подготовки рукописи.

Не считая книгу свободной от недостатков, автор с признательностью примет замечания и пожелания, касающиеся ее содержания.

*Глава 1*

---

СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ГОРНО-ПРОМЫШЛЕННЫХ  
РАЙОНОВ  
И ПРЕДПРИЯТИЙ





## 1.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

---

### 1.1.1. Система и ее составные части

Приемник электроэнергии — аппарат, машина, механизм, в котором происходит преобразование электрической энергии в механическую, световую, тепловую и другие виды для ее использования. Он присоединен непосредственно к электрической сети и получает питание от источника независимо от его местоположения.

Совокупность аппаратов, машин, линий, вспомогательного оборудования и помещений, предназначенных для производства, преобразования, распределения, накопления и передачи электроэнергии, называется электроустановкой.

Группа электроустановок, объединенных основным технологическим процессом или сопровождающих его в рамках целого предприятия, цеха или участка образует потребитель электрической энергии, а обеспечение потребителей электроэнергией называется электроснабжением.

С целью лучшего использования мощностей источников питания (электростанций) и достижения наиболее выгодных режимов они работают параллельно на общую сеть. В соответствии с правилами устройства электроустановок (ПУЭ) совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, связанных между собой общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической и тепловой энергии, называют электрической системой.

Составными частями электрической системы являются электрические станции, подстанции, линии электропередачи и тепловые сети. Электрической станцией называют электроустановки, служащие для производства электрической и тепловой энергии. Если тепловые электростанции вырабатывают только электроэнергию, то они называются конденсационными, так как отработанный пар направляется в конденсаторы, где теплота парообразования теряется в охлаждающей воде. Если же помимо электрической вырабатывается и тепловая энергия, то такие электростанции называются теплоэлектрическими (ТЭЦ).

Помимо электростанций в электрическую часть энергосистемы входят электрические сети, состоящие из подстанций, распределительных и переключательных пунктов, которые служат для передачи и распределения электрической энергии.

Подстанцией называется электроустановка, предназначенная для преобразования и распределения электроэнергии и состоящая из трансформаторов или других преобразователей энергии, распределительных устройств, устройств управления и вспомогательных сооружений. В зависимости от выполняемой функции они могут быть трансформаторными (ТП) или преобразовательными (ПП). Если трансформатор поставляется комплектно с

распредустройствами напряжением до и выше 1 кВ, то такое сочетание образует комплектную трансформаторную подстанцию (КТП или КПП).

Распределительным устройством называется электроустановка, служащая для приема и распределения электроэнергии, содержащая коммутационные аппараты, сборные и соединительные шины, устройства защиты и автоматики, а также вспомогательные устройства. В зависимости от исполнения они могут быть открытыми (ОРУ) и закрытыми (ЗРУ). Распредустройства могут состоять полностью или частично из закрытых шкафов со встроенными в них аппаратами, устройствами защиты и автоматики, приборами, т.е. подготовленными для монтажа — комплектными для внутренней установки (КСО или КРУ) и для наружной (КРУН).

Линиями электропередачи называется система проводов, служащих для передачи электроэнергии от электростанций к потребителям и распределения между электроприемниками.

Часть электрической системы, состоящая из генераторов, распределительных устройств, электрических сетей и электроприемников, называется электрической системой, а часть энергетической системы, включающая все ее составные части, кроме электроприемников, называется системой электроснабжения.

### ***1.1.2. Климатические условия работы и классификация электрооборудования по защите от внешней среды***

Надежная работа электрооборудования зависит от места расположения его при эксплуатации. В соответствии с этим ГОСТ устанавливает пять категорий электрических изделий.

Изделия, предназначенные для работы на открытом воздухе, относятся к первой категории.

Изделия, предназначенные для работы под навесом или в помещениях, где колебания температуры воздуха и влажности практически не отличаются от колебаний на открытом воздухе, относятся ко второй категории. Для этих условий эксплуатации характерен сравнительно свободный доступ наружного воздуха.

К третьей категории относится оборудование для работы в закрытых помещениях с естественной вентиляцией, где климатические условия не регулируются, колебания температуры и влажности, а также воздействие пыли и песка значительно меньше, чем на открытом воздухе (каменные, бетонные, деревянные помещения, металлические с теплоизоляцией).

Если электрооборудование предназначено для работы в отапливаемых или охлаждающихся, хорошо вентилируемых производственных помещениях и выработках (подземных), то оно относится к четвертой категории, так как ограждено от воздействия солнечной радиации, атмосферных осадков, воздействия песка и пыли.

К пятой категории относится электрооборудование, предназначенное для работы во влажных помещениях (в том числе в подземных выработках), в почве, т. е. в местах длительного наличия воды или частой конденсации влаги.

Степень защиты электрооборудования от прикосновения и попадания посторонних предметов и влаги имеет буквенное обозначение IP по международной системе обозначений и двойное цифровое: первая цифра (от нуля до шести) означает защиту персонала и степень защиты от попадания твердых тел, а вторая цифра (от нуля до восьми) — степень защиты от попадания воды в электрооборудование. Например, IP21 означает, что предусмотрена защита от проникновения внутрь оболочки пальцев или предметов длиной более 80 мм и от проникновения твердых тел размером более 50 мм, а вторая цифра — 1 — означает, что капли воды, вертикально падающие на оболочку, не должны оказывать воздействие на изделие.

По защите от внешней среды различают: взрывозащищенные машины (аппарат) специального назначения, предназначенные для работы во взрывоопасной среде; влагостойкие, предназначенные для работы в условиях повышенной влажности окружающей среды; морозостойкие — для работы в условиях пониженных температур; химически стойкие аппараты для работы в условиях агрессивной окружающей среды и тропические — для работы в условиях тропического климата.

Степень защиты персонала от соприкосновения с движущимися и токоведущими частями электрооборудования условно выражается цифрами согласно рекомендациям МЭК.

Классификация взрывоопасных и пожароопасных зон, необходимая для обоснованного выбора типа и места размещения электрооборудования и электрических сетей, подробно изложено в ПУЭ.

### **1.1.3. Номинальные напряжения и ряды номинальных токов**

В качестве стандартных напряжений источников и приемников электроэнергии рекомендуются значения, приведенные в табл. 1.1 и 1.2.

Для потребителей электроэнергии, работающих на постоянном токе, используются средние напряжения: для контактной сети городского транспорта — 600 В; метрополитенов — 825 В; электрифицированных железных дорог — 1650 и 3300 В.

На открытых горных работах, где эксплуатируются троллейбусы и электровозы, используются напряжения 600, 825, 1650 и 3300 В.

Электролизные установки работают на напряжении 230 — 850 В, а дуговые печи — 75 В.

Таблица 1.1

#### **Номинальные напряжения до 1 кВ**

Постоянный ток, В		Переменный ток, В			
Источники и преобразователи	Сети и приемники	Источники и преобразователи		Сети и приемники	
		Однофазный ток	Трехфазный ток	Однофазный ток	Трехфазный ток
6; 12; 28,5; 48; 62; 115; 230; 460	6; 12; 27; 48; 60; 110; 220; 440	6; 12; 28,5; 48; 62; 115; 230	42; 62; 230; 400; 690; 1200	6; 12; 27; 48; 60; 110; 220	40; 60; 220; 380; 660; 1140

## Номинальные напряжения выше 1 кВ

Сети и приемники	Генераторы и синхронные компенсаторы	Трансформаторы с РПН	
		Первичные обмотки	Вторичные обмотки
(3)	(3,15)	—	(3,15)
(6)	(6,3)	6 и 6,3	(6,3) и (6,6)
10	10,5	10 и 10,5	10,5 и 11,0
20	21,0		
35	—	35 и 36,75	— и 38,5
110	—	110 и 115	115 и 121
(150)	—	165 (158)	(158) 165
220	—	220 и 230	230 и 242

Примечание. Напряжения, указанные в скобках, для вновь проектируемых сетей не рекомендуются.

Допускаются в эксплуатации еще уровни напряжения: 24 В (50Гц) для приемников общепромышленного назначения; 42 В для однофазного и трехфазного тока; 127 В — для ранее разработанного электрооборудования.

В соответствии с ГОСТ 6827 — 76 предпочтительны следующие значения номинальных токов электрооборудования и приемников электроэнергии: 1; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3 А, а также десятичные кратные и дольные значения этих токов.

## 1.2. ХАРАКТЕРИСТИКА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И ПРИЕМНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Потребителями электроэнергии являются крупные промышленные предприятия: фабрики, заводы, электрический транспорт, шахты, горно-обогатительные комбинаты, разрезы, жилые и общественные здания и сооружения, предприятия общественного назначения и др., имеющие разнообразные электроприемники.

Электрические установки подразделяются на электроустановки напряжением до и выше 1 кВ. Электроустановки напряжением до 1 кВ переменного тока выполняются как с глухозаземленной, так и с изолированной нейтралью, а установки постоянного тока — с изолированной и глухозаземленной нулевой точкой. Установки напряжением выше 1 кВ подразделяются: с изолированной нейтралью (до 35 кВ); с компенсированной нейтралью, включенной через индуктивное сопротивление для компенсации емкостных токов. В электроустановках напряжением 110 кВ и выше нейтраль заземляется наглухо.

По роду тока различают электроприемники, работающие: от сети переменного тока номинальной промышленной частоты; от сети переменного тока повышенной или пониженной частоты; от сети постоянного тока.

По характеру использования электроэнергии все многообразие приемников можно разделить на четыре основные группы:

1. Электроприводы производственных механизмов занимают наибольшее место среди электроприемников промышленных предприятий. Режимы и особенности работы определяются характером основного технологического производства (металлургия, горно-добывающие и перерабатывающие предприятия, машиностроение), что предопределяет выбор типа и мощности электроприводов от нескольких десятков ватт до мегаватт.

2. Светотехнические установки обладают той особенностью, что их небольшая мощность и огромное количество создают специфические особенности их эксплуатации.

3. Электротехнологические установки, в которых электрическая энергия используется непосредственно для различных технологических процессов (электролизные установки, гальванокрытие, устройства для создания электромагнитных полей).

4. Электротермические установки, в которых электроэнергия преобразуется в тепловую (электропечи, нагревательные установки).

По общности технологического процесса электроприемники подразделяются на производственные механизмы, общепромышленные установки, подъемно-транспортное оборудование, преобразовательные установки, электросварочное оборудование.

Различные предприятия имеют электрические нагрузки от сотен до миллиона киловатт. Особенно характерно это для горно-добывающей промышленности; где горно-обогащительные комбинаты (ГОКи) помимо добычи полезного ископаемого производят дробление, измельчение, обогащение и агломерацию руд. Установленная мощность отдельных приемников (дробилки, мельницы) достигает 2500 кВт и более.

Горные предприятия можно разделить на две основные группы: предприятия с подземной добычей полезного ископаемого и предприятия с открытой добычей.

На предприятиях с подземной добычей электроприемники располагаются как на поверхности, так и в подземных выработках. На поверхности располагаются подъемные установки с мощностью приводов до 5000 кВт и более, вентиляторные установки с синхронными электродвигателями (до 3500 кВт), компрессоры с синхронными электродвигателями мощностью до 5000 кВт. Напряжение питания таких приемников — 6÷10 кВ. Помимо этого большую нагрузку напряжением 6÷10 / 0,4 кВ представляют электроприемники технологического комплекса и вспомогательного производства.

На добычных и подготовительных участках в подземных выработках работают очистные и проходческие комплексы с установленной мощностью 450÷800 кВт.

На современных открытых горных работах суммарная мощность экскаваторов достигает 8000 кВт, отвальных мостов — 5000 кВт, а у комплекса роторного экскаватора — до 12000 кВт при напряжении 6÷10 кВ. Помимо упомянутых, на открытых работах применяют насосы, буровые станки, мощные осветительные приборы и т. д.

В установках, не требующих регулирования скорости, применяются электроприводы переменного тока (асинхронные и синхронные). Электроприводы переменного тока — основной потребитель электроэнергии — на их долю приходится около 70 % суммарной мощности.

Преобразование переменного тока в постоянный требует дополнительных капитальных вложений на установку преобразовательных агрегатов и аппаратуры управления, однако это оправдано, если регулируемый электропривод постоянного тока обеспечит широкое, плавное и быстрое изменение частоты вращения или реверсирование двигателя.

### **1.3. КАТЕГОРИИ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ**

Электроприводы, а также электротехнологические, электротермические и светотехнические устройства и установки представляют собой совокупность электроприемников, от надежной работы которых зависит нормальное течение технологического процесса.

Каждый из этих приемников по-разному влияет на технологический процесс и поэтому требует различной степени надежности электроснабжения.

На предприятии могут быть такие приемники, перерыв в электроснабжении которых недопустим даже на короткий срок, необходимый дежурному персоналу на переключения, связанные с восстановлением питания.

Иногда перерывы в электроснабжении могут привести к образованию взрывоопасных концентраций газов (например, в шахте), что опасно для жизни людей. Другие производства при перерывах в электроснабжении несут большие потери от невыпуска продукции.

В соответствии с характером ущерба электроприемники в отношении обеспечения надежности согласно ПУЭ разделяются на три категории.

1-я категория — электроприемники, нарушение электроснабжения, которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный ущерб производства в масштабах страны, повреждения оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение особо важных элементов коммунального хозяйства. Примером могут служить электроприемники доменных печей, водоотливные установки шахт и карьеров; вентиляторные установки шахт, метрополитенов; флотационные машины и т. д.

Из состава электроприемников 1-ой категории следует выделить особую группу электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения основного дорогостоящего оборудования.

2-я категория — электроприемники, перерыв в электроснабжении которых приводит к массовому недоотпуску продукции, длительным простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта. Примером является электроприемники прокатных цехов; скиповые подъемные установки шахт

и рудников; измельчительные, классификационные механизмы обогатительных фабрик и т.п.

3-я категория — все остальные электроприемники, не подходящие под определение 1-ой и 2-ой категорий: вспомогательные производства, транспорт породы, механические мастерские и т. д.

В соответствии с требованиями ПУЭ допускаются перерывы в электропитании:

а) электроприемников 1-ой категории на время автоматического ввода резервного питания при условии электроснабжения их от двух независимых источников питания.

Для электроснабжения особой группы электроприемников должно предусматриваться питание от третьего независимого источника (аккумуляторные батареи, дизель-электрические станции).

Если резервированием нельзя обеспечить необходимой непрерывности технологического процесса или если резервирование электроснабжения экономически нецелесообразно, должно быть осуществлено технологическое резервирование, например, путем установки взаиморезервирующих технологических агрегатов, специальных устройств безаварийного останова технологического процесса, действующих при нарушении электроснабжения;

б) электроприемников 2-ой категории — на время, необходимое для включения резервного питания дежурным персоналом или выездной оперативной бригадой.

Допускается питание для этой категории по одной воздушной линии (ВЛ), в том числе с кабельной вставкой, если аварийный ремонт линии продлится не более суток. Вставка выполняется двумя кабелями, каждый из которых выбирается по максимальной нагрузке ВЛ. Если питание осуществляется кабельной линией, то она должна состоять не менее чем из двух кабелей, присоединенных к общему аппарату.

Также возможно питание от одного трансформатора при наличии резервного и возможности замены поврежденного за время не более суток;

в) электроприемников 3-ей категории — на время, необходимое для ремонта или замены поврежденного элемента системы электроснабжения, но не более суток.

ПУЭ регламентирует только порядок продолжительности перерывов, но не ограничивает их число.

Таким образом, отнесение потребителей к той или иной категории определяет степень резервирования, что влияет на капитальные вложения, поэтому в каждом конкретном случае необходимо степень резервирования подтверждать технико-экономическим обоснованием.

## **1.4. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ (СЭ)**

Система электроснабжения предприятия включает источник питания; линии электропередачи для канализации электроэнергии; понизительные, распределительные и преобразовательные подстанции с соединяющими их

воздушными и кабельными линиями, а также токопроводы, обеспечивающие подвод электроэнергии к потребителям.

К электроснабжению предприятий предъявляется ряд требований, зависящих от потребляемой ими мощности, характера их электрической нагрузки, особенностей технологического процесса, климатических условий, факторов окружающей среды.

В зависимости от суммарной установленной мощности электроприемников все предприятия условно подразделены на малые (до 5000 кВт), средние (до 75 000 кВт) и крупные (с установленной мощностью до 100 МВт и более).

Схемы и конструктивная реализация системы электроснабжения должны обеспечивать перспективу развития и роста электропотребления без коренной реконструкции системы.

При построении СЭ необходимо учитывать специфические условия предприятия, в частности, наличие загрязнения и агрессивной среды; электроприемников особой группы 1-ой категории, требующих повышенной надежности питания; электроприемников с нелинейной, резкопеременной нагрузкой и др. Необходимо учитывать также специфику технологического процесса, режимы работы ответственных установок. Требования технологии могут оказать решающее влияние на степень резервирования, что связано с затратами.

Разработка основных положений проекта электроснабжения должна производиться одновременно с разработкой технологической и строительной частями и общего генплана предприятия. Основные положения зависят от принятых технологических решений. Следует различать принятие технологических решений на проектных стадиях (технические и тендерные предложения, техническое обоснование — ТО и технико-экономическое обоснование — ТЭО) и на стадии рабочей документации (РД), когда выпускаются рабочие чертежи на установку электрооборудования и прокладку линии.

Исходными данными, на основе которых разрабатывается предварительная схема электроснабжения и делается запрос в энергосистему на выдачу технических условий, являются: а) технические задания, требования и условия; б) электрические ограничения и правила.

Для правильного решения вопросов надежности электроснабжения необходимо учитывать аварийный и послеаварийный режимы. Под аварийным понимается кратковременный переходный режим, вызванный нарушением работы системы или отдельных ее элементов до отключения поврежденного звена или элемента. Продолжительность отключения зависит от времени срабатывания релейной защиты и действия автоматики. Послеаварийный режим возникает после отключения аварийного режима и продолжается до восстановления нормальных условий работы.

С учетом изложенного, основные требования сводятся к следующему:

- источники высшего напряжения максимально приближаются к потребителям путем устройства глубоких вводов напряжением 110, 220 кВ с наименьшим числом ступеней промежуточной трансформации; сооружения подстанций вблизи центров нагрузки и т. п.;



- выбор элементов схемы осуществляется из условия их постоянной работы под нагрузкой;
- работа всех элементов схемы должна предусматриваться отдельной, так как это способствует снижению токов короткого замыкания (КЗ), упрощению релейной защиты и коммутации;
- схема электроснабжения должна строиться с учетом глубокого секционирования шин во всех звеньях системы распределения электроэнергии;
- проектирование электроснабжения следует выполнять с возможностью резервирования для крупных предприятий на 20 лет, для средних — 5÷10 лет и для малых на 1÷2 года;
- система электроснабжения должна быть надежной, экономичной и обеспечивать предприятие электроэнергией высокого качества (напряжение, частота, колебание, отклонение напряжения, не синусоидальность, не симметрия);
- при проектировании СЭ необходимо предусматривать экономичность ее работы в период малых нагрузок (ночной, выходные, праздничные дни) по возможности без больших затрат на дополнительные сетевые устройства;
- при проектировании генеральных планов, а также цехов и объектов должно учитываться рациональное размещение электротехнических сооружений и линий электропередач;
- переход к проектированию и созданию СЭ должен быть системным с соблюдением ее иерархических свойств;
- широкое применение автоматического повторного включения (АПВ) и автоматического включения резерва (АВР).

При проектировании, создании и эксплуатации систем электроснабжения предприятий следует стремиться к гибкости системы, оптимизируя параметры, технические условия на присоединение к энергосистеме, электрические нагрузки, число и мощность трансформаторов, схемы и конструкций распределительных и питающих сетей и т. п.

## **1.5. ХАРАКТЕРНЫЕ СХЕМЫ ПИТАЮЩИХ И РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ**

*Источником питания (ИП)* называется распределительное устройство генераторного напряжения электростанции или распределительное устройство вторичного напряжения понизительной подстанции энергосистемы или подстанции 35÷220 кВ промышленного предприятия, к которому присоединены распределительные сети предприятия.

Основными источниками питания большинства предприятий являются электростанции и сети энергосистем. На отдельных крупных предприятиях со значительным теплотреблением могут быть сооружены теплоэлектростанции (ТЭС) или теплоэлектроцентрали (ТЭЦ).

Характер источника питания и их количество определяется, наряду с прочим, категорией электроприемников. Питание электроприемников должно осуществляться не менее чем от двух независимых источников.

Независимым источником питания называется источник, на котором сохраняется напряжение при исчезновении его на другом или других источниках. При этом напряжение на этом ИП должно соответствовать действующим нормативам и способствовать устойчивой работе электроприемников в условиях послеаварийного режима. Оно должно сохраняться на уровне  $0,6U_{ном}$  в течение действия релейной защиты и автоматики в питающей сети при аварийном режиме.

Независимыми источниками могут считаться две секции или системы шин одной или двух электростанций и подстанций при одновременном соблюдении двух условий: 1) каждая из секций или систем шин в свою очередь питается от независимого источника питания; 2) секции или системы шин не связаны между собой или имеют связь, автоматически отключающуюся при нарушении нормальной работы одной из секций.

При наличии особой группы 1-ой категории обязателен третий независимый источник.

Следует иметь в виду, что двойную систему шин на ИП, если рабочая система не секционирована, нельзя рассматривать как два независимых источника питания, так как при повреждении несекционированной системы все отходящие линии потеряют питание. Переключение этих линий на неповрежденную систему шин требует много времени, так как практически не может быть автоматизировано. В этих случаях питание отходящих линий разделяют между двумя системами шин (фиксированное присоединение), шиносоединительный выключатель становится межсекционным.

*Пунктом приема электроэнергии (ППЭ)* называется электроустановка, служащая для приема электроэнергии от ИП и распределения ее между электроприемниками предприятия непосредственно или с помощью других электроустановок.

Типы пунктов приема и их число определяется мощностью предприятия и характером распределения электрической нагрузки на его территории. При сравнительно компактном расположении нагрузок и соответствующей категории электроприемников электроэнергия может быть подведена к одной трансформаторной подстанции и распределительному пункту. При разбросанности нагрузок электроэнергия подводится к двум и более подстанциям, что определяется технико-экономическими расчетами.

Если предприятие потребляет значительное количество электроэнергии и ИП удален, то прием электроэнергии производится на узловых распределительных подстанциях (УРП) или на главных понизительных подстанциях (ГПП) напряжением  $35 \div 220$  (330) кВ.

УРП называется центральная подстанция предприятия напряжением  $35 \div 220$  (330) кВ, получающая электроэнергию от энергосистемы и распределяющая (преобразующая) электроэнергию на более низком напряжении ( $6 \div 35$  кВ) по всему предприятию или отдельному его району.

ПГВ называется подстанция с первичным напряжением 35÷220 кВ, выполненная, как правило, по упрощенной схеме коммутации на первичном напряжении. Она получает питание непосредственно от энергосистемы или УРП данного предприятия и предназначена для питания отдельного объекта или района предприятия.

Если ИП находится на близком расстоянии от промплощадки предприятия, а потребляемая мощность обеспечивается пропускной способностью линии 6÷10 кВ, то электроэнергия подводится к центральному распределительному пункту (ЦРП) или к распределительному пункту (РП).

ЦРП называется установка, получающая питание непосредственно от энергосистемы или подстанции предприятия при напряжении 6÷20 кВ и распределяющая ее при этом же напряжении по всему предприятию.

РП предназначен для приема и распределения электроэнергии при одном напряжении 6÷20 кВ. Он может быть совмещен с трансформаторной подстанцией, обслуживая примыкающие к нему приемники.

Количество приемных пунктов на предприятии определяется общей схемой электроснабжения, величиной необходимой мощности, размещением нагрузок на промплощадке, требуемой степенью бесперебойности. Тип приемного пункта зависит от подводимой мощности и величины питающего напряжения. Все пункты приема электроэнергии от системы должны быть связаны между собой кабельными или воздушными линиями или токопроводами.

Системы электроснабжения разделяют на внешние и внутренние. Под системой внешнего электроснабжения понимают комплекс сооружений, обеспечивающих передачу электроэнергии от источника питания до приемных подстанций предприятия. Система внутреннего электроснабжения — комплекс подстанций и сетей, находящихся на территории предприятия.

Для крупных предприятий наиболее экономичной и надежной является система электроснабжения с применением глубокого ввода 35÷220 кВ, при котором высшее напряжение максимально приближено к потребителям электроэнергии. В большинстве случаев глубокий ввод осуществляется непосредственно от энергосистемы.

В системах электроснабжения, как правило, применяется глубокое секционирование всех звеньев системы от ИП до сборных шин ТП напряжением до 1 кВ. При построении системы электроснабжения исходят из раздельной работы линий и трансформаторов. Однако это не исключает параллельную работу вводов и трансформаторов, если не удастся добиться необходимого быстрого действия восстановления питания; если при питании секций подстанции от разных источников возможно их несинхронное включение при действии АВР (например, от ТЭЦ) и для обеспечения нормируемых показателей качества электроэнергии при резкопеременных ударных нагрузках.

Электрическая энергия от источников питания к пунктам приема электроэнергии на предприятия подается, как правило, по радиальным (рис. 1.1) или магистральным (рис. 1.2) линиям.

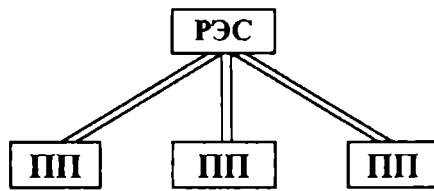


Рис. 1.1. Схема питания ППЭ по двум радиальным линиям

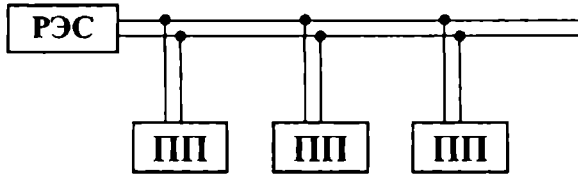


Рис. 1.2. Схема питания ППЭ по двойной магистральной линии

Распределение электроэнергии по промплощадке предприятия производится по радиальным, магистральным или смешанным схемам в зависимости от размещения нагрузок, их значения, требуемой надежности питания и ряда других особенностей проектируемого предприятия.

Схемы строятся по ступенчатому принципу. Число ступеней распределения электроэнергии определяется потребляемой мощностью, топологией электрических нагрузок на территории предприятия. Обычно применяют две-три ступени, так как при большем их числе ухудшаются условия эксплуатации и технико-экономические показатели.

Первой ступенью распределения электроэнергии является сетевое звено между источником питания (УРП, ТЭЦ, ГПП) и ПГВ, если распределение производится при напряжении 110÷220 кВ, или между ГПП и РП 6 (10) кВ, если напряжение распределительной сети 6 (10) кВ.

Под второй ступенью распределения электроэнергии подразумевается сетевое звено между РП и РУ вторичного напряжения ПГВ и трансформаторными подстанциями (ТП) или же отдельными электроприемниками напряжением 6÷10 кВ: электродвигателями, преобразователями и др. Как правило, это звено выполняется кабелями напряжением 6 (10) кВ.

Третья ступень — сетевое звено между ТП и приемниками электроэнергии напряжением до 1кВ.

Радиальные схемы питания могут быть одиночными для потребителей 3-ей категории, а также 2-ой, если прекращение их работы не ведет к значительному ущербу (рис.1.3, а). Для потребителей 1-ой категории и ответственных 2-ой — применяют двойные радиальные линии (рис.1.3, б). Для обособленных потребителей (группы) также применяют радиальные схемы.

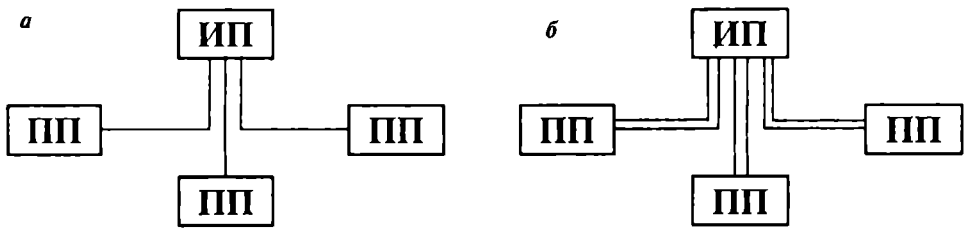


Рис. 1.3. Радиальные схемы распределения электроэнергии

При передаче электроэнергии в одном направлении широко применяют магистральные линии с односторонним питанием. При воздушных линиях применяют, в основном, одиночные (рис. 1.4, а) или (рис. 1.4, б) линии с глухими отпайками. При кабельных линиях применяют цепочные линии — одиночные или двойные — с заводом магистральной линии на РП или к потребителю (рис. 1.5, а, б).

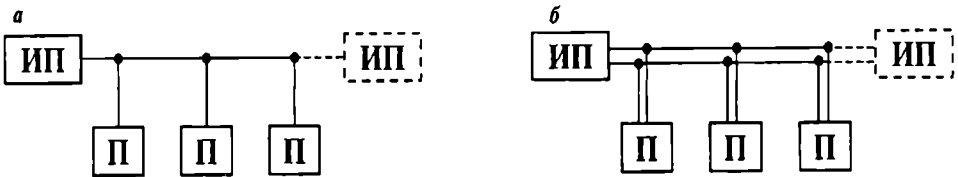


Рис. 1.4. Магистральные схемы распределения электроэнергии с глухими отпайками

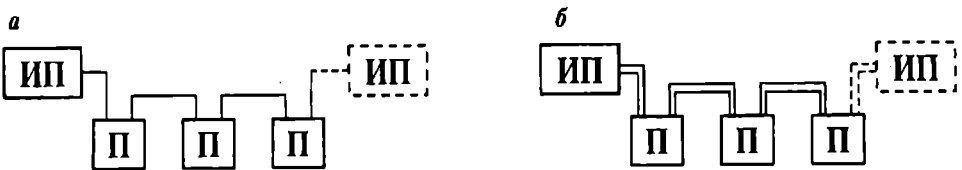


Рис. 1.5. Цепочные магистральные линии

Радиальные магистральные схемы с односторонним питанием могут быть одноступенчатыми и двухступенчатыми (рис. 1.6). При этом в ряде случаев может оказаться целесообразным сочетание радиальной схемы на первой ступени с магистральной на второй ступени (рис. 1.7) или наоборот (рис. 1.8). На любой ступени возможно питание одной части электроприемников по радиальной схеме, а другой — по магистральной.

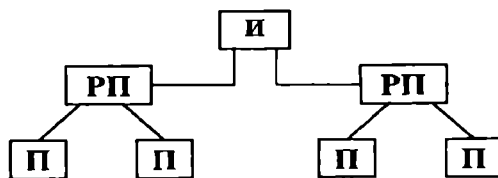


Рис. 1.6. Радиальная двухступенчатая схема

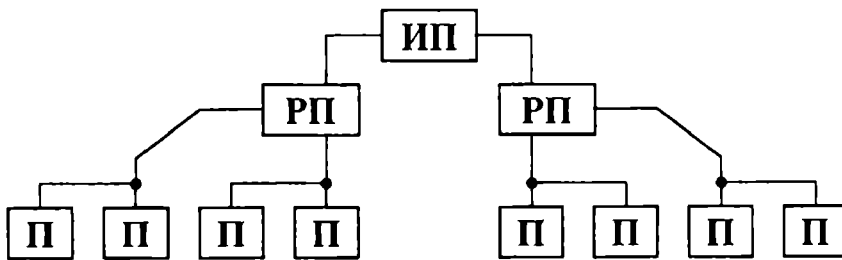


Рис. 1.7. Сочетание радиальной схемы распределения на первой ступени с магистральной на второй ступени

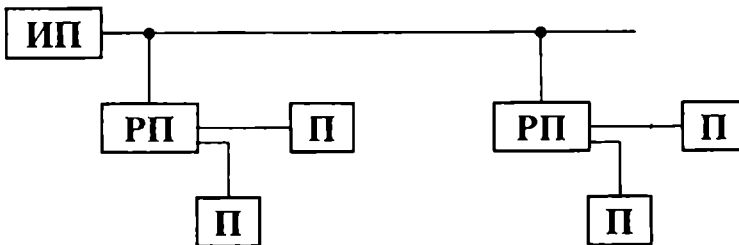


Рис. 1.8. Сочетание магистральной схемы на первой ступени с радиальной на второй ступени

Одноступенчатые схемы чаще применяются на предприятиях малой мощности, а также для сосредоточенных нагрузок большой мощности на средних и крупных предприятиях. Двухступенчатые схемы применяются для питания от РП удаленных обособленных групп электроприемников.

Одиночные и двойные магистральные линии с двусторонним питанием применяют при питании от двух независимых источников по условиям надежности.

Кольцевые магистрали применяют при таком расположении потребителей, при котором целесообразен охват их одной кольцевой линией (рис. 1.9).

Обычно на предприятиях распределение электроэнергии осуществляется по смешанным схемам, составленным из отдельных основных схем. При этом целесообразность применения схемы глубокого ввода и степень дробления определяется технико-экономическими расчетами с учетом конкретных условий предприятия — размеров промплощадки, концентрации нагрузки, их величины, характера и пр.

Глубокие вводы напряжением 35÷220 кВ выполняются по двум схемам:

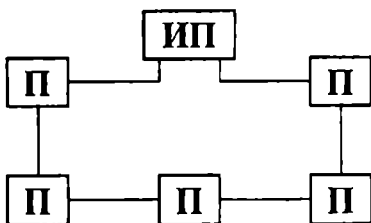


Рис. 1.9. Магистральная кольцевая схема распределения электроэнергии

а) в виде магистральных воздушных линий от энергосистемы с отпайками – ответвлениями по упрощенным схемам к разукрупненным подстанциям 35÷220 / 6÷10 кВ и 35 / 0,4÷0,69 кВ, размещенных в центрах нагрузок;

б) в виде кабельных или радиальных воздушных линий к подстанциям 35÷220 кВ, располагаемым в центре нагрузок отдельных групп потребителей и питаемым от узловых подстанций на границе предприятия или же от ближайшей подстанции энергосистемы.

Подробно вопросы внутреннего электроснабжения горно-добывающих и перерабатывающих предприятий рассматриваются в специальных дисциплинах.

## **1.6. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА ПРИСОЕДИНЕНИЕ К ИСТОЧНИКУ ПИТАНИЯ**

Для любого промышленного предприятия технический проект является основным документом, решающим все принципиальные вопросы и в полном объеме разрабатывающим экономическую часть проекта. Итогом технического проекта являются спецификации для заказа электрооборудования и кабельной продукции, а также сводная смета. Он же является основой для разработки рабочих чертежей.

Одним из основных вопросов технического проекта является выбор точки присоединения предприятия к энергосистеме.

Технические условия на присоединение выдаются энергосистемой на основе данных о предполагаемых нагрузках предприятия, его расположении на плане района и требований о степени надежности электроснабжения.

Проектирование электроснабжения предприятия производится с обязательным учетом технических условий на присоединение, в которых указываются:

- электрическая мощность собственной электростанции (если такая имеется) и условия ее связи с энергосистемой;
- данные о других потребителях в районе строительства предприятия, которые необходимо обеспечить электроэнергией;
- точка присоединения к энергосистеме (подстанция, электростанция или линия электропередачи);
- напряжения, при которых возможно выполнение питающих воздушных или кабельных линий;
- ожидаемый уровень напряжения и способы его регулирования;
- необходимость работ по усилению сетей энергосистемы в связи со строительством предприятия (увеличения сечения проводов, замена или увеличение мощности трансформаторов);
- расчетные токи короткого замыкания в точке присоединения;

- необходимость определения числа цепей и сечения воздушных линий электропередачи или кабельных линий от точки присоединения до приемных пунктов предприятия;

- требования к прокладке трасс линий электропередач, учитывающие перспективы развития энергетических сооружений в данном районе;

- требования к релейной защите, автоматике, изоляции, защите от перенапряжений на участке от точки присоединения до приемного пункта электроэнергии предприятия, включая сторону высшего напряжения.

В технических условиях на присоединение могут указываться рекомендуемые мероприятия по компенсации реактивной мощности, требования к учету электроэнергии и ряд других, связанных со спецификой конкретного предприятия.

На основании технических условий на присоединение разрабатываются технический проект внутреннего электроснабжения предприятия и рабочие чертежи.

### ***Контрольные вопросы***

1. Охарактеризуйте составные части энергосистемы.

2. В чем отличие подстанции глубокого ввода от трансформаторной подстанции?

3. Как классифицируются условия работы электрооборудования?

4. На какие номинальные токи и номинальные напряжения следует ориентироваться при проектировании электроснабжения предприятий и конструировании электрооборудования?

5. Как делятся приемники по характеру использования электроэнергии?

6. В чем специфика отдельных категорий электроприемников?

7. Каковы допустимые перерывы в электроснабжении для потребителей различной категории по надежности?

8. Перечислите основные требования к построению системы электроснабжения.

9. Что такое источник питания?

10. Каковы характерные системы питающих и распределительных линий?

11. Что собой представляют технические условия на присоединение к энергосистеме?



*Глава* **2**

---

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
НАГРУЗКИ



## 2.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

---

Основой рационального решения сложного комплекса проектирования электроснабжения современного предприятия является определение ожидаемых электрических нагрузок. Значение электрических нагрузок определяет выбор всех элементов системы электроснабжения, а это, в свою очередь, инвестиционные вложения, потери электроэнергии и эксплуатационные издержки.

При определении ожидаемых электрических нагрузок возникают определенные трудности, связанные с вероятностным характером их проявления и необходимостью прогноза на расчетный период. Эти трудности связаны, прежде всего, с тем, что нагрузки многих приемников не соответствуют фактическим, а режимы их работы отличны от продолжительного и не связаны между собой во времени.

Электрическая нагрузка характеризует потребление электроэнергии отдельными приемниками, их группой или предприятием в целом. Под электрической нагрузкой в данный момент времени понимается ее действующее значение, фиксируемое приборами (рис. 2.1). При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения основными является три вида нагрузок: активная мощность  $P$ , реактивная мощность  $Q$  и ток  $I$ .

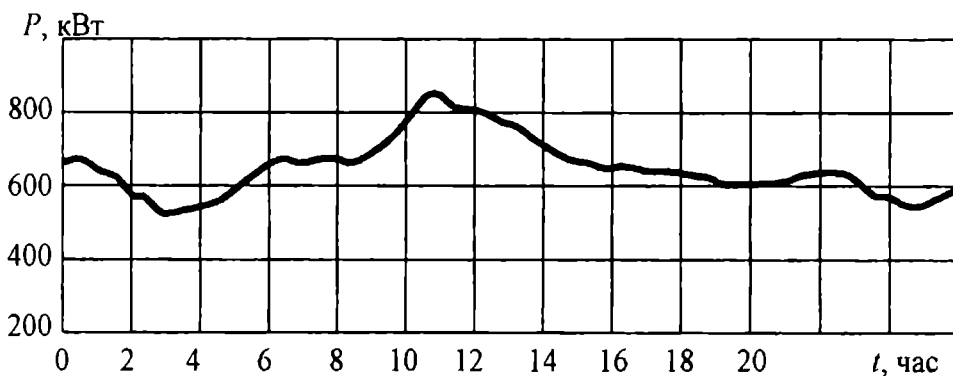


Рис. 2.1. Регистрограмма нагрузки для экскаватора

Исходной базой для определения электрических нагрузок является номинальная мощность, обозначенная в паспорте электродвигателя, силового, специального трансформатора или на колбе источника света.

Под номинальной мощностью электродвигателя ( $P_{\text{ном}} = P_{\text{пасп}}$ ) понимается мощность на валу электродвигателя при номинальном напряжении; для трансформаторов и источников света — мощность, потребляемая из сети.

Под номинальной реактивной мощностью приемника  $Q_{\text{ном}}$  подразумевается реактивная мощность, потребляемая из сети или отдаваемая в сеть при активной номинальной мощности и номинальном напряжении.

Групповая номинальная мощность — это сумма номинальных мощностей отдельных приемников электроэнергии:

$$P_{\text{ном.гр.}} = \sum_1^n P_{\text{ном.}i} ; Q_{\text{ном.гр.}} = \sum_1^n Q_{\text{ном.}i} . \quad (2.1)$$

Номинальная мощность приемников зависит от соответствующего режима работы. Для повторно-кратковременного режима, характеризуемого продолжительностью включения (ПВ), номинальная мощность определяется по выражениям

$$\begin{aligned} P_{\text{ном.ПКР}} &= P_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}} ; \\ Q_{\text{ном.ПКР}} &= Q_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}} . \end{aligned} \quad (2.2)$$

где ПВ — продолжительность включения электродвигателя при повторно-кратковременном режиме;  $P_{\text{пасп}}$  — номинальная или паспортная мощность электродвигателя;  $Q_{\text{пасп}} = P_{\text{ном}} \text{tg} \varphi$  — номинальная реактивная мощность электродвигателя.

Для трансформаторов:

$$\begin{aligned} P_{\text{ном.ПКР}} &= S_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}} \cos \varphi_{\text{пасп}} ; \\ Q_{\text{ном.ПКР}} &= S_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}} \sin \varphi_{\text{пасп}} . \end{aligned} \quad (2.3)$$

Для газоразрядных ламп номинальной мощностью считается мощность, указанная на колбе или цоколе лампы с учетом потерь в пускорегулирующей аппаратуре.

Номинальные токи определяются аналогично по формулам

$$I_{\text{ном.ПКР}} = i_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}} ; i_{\text{ном.ПКР}} = \frac{S_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} ; I_{\text{ном}} = \frac{\sqrt{P_{\text{ном}}^2 + Q_{\text{ном}}^2}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} . \quad (2.4)$$

Определение ожидаемых расчетных нагрузок играет определяющую роль при выборе защитно-коммутационной аппаратуры, сечения и материала проводников, экономичных способов передачи электрической энергии, топологии сети, местоположения подстанций и т. п.

Увеличение нагрузки вызывает повышенные расходы электроэнергии, ускоряет износ электрооборудования, предварительное старение изоляции, снижение надежности системы электроснабжения. Замена же линий и электрооборудования в процессе эксплуатации достаточно тяжела и сложна. Уменьшение расчетных нагрузок влечет за собой неполное использование электрооборудования, линий, что в ряде случаев также приводит к потере электроэнергии.

## 2.2. ПОНЯТИЕ О ГРАФИКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК, ИХ ВИДАХ И ПОКАЗАТЕЛЯХ

Графиком нагрузки называется кривая изменения нагрузки во времени  $P = f(t)$ ;  $Q = f(t)$ ;  $I = f(t)$ . Запись графика нагрузки может быть в виде непрерывной кривой, но на практике чаще пользуются ступенчатым графиком, полученным по показаниям счетчиков активной (реактивной) энергии, фиксируемым через определенные равные интервалы времени. Следует различать индивидуальные и групповые графики нагрузки. Индивидуальные графики будем обозначать  $P_i(t)$ ;  $Q_i(t)$ ;  $I_i(t)$ . Вследствие однотипности оборудования и повторяемости технологических процессов наблюдается повторение цикличности работы оборудования, поэтому индивидуальные графики более или менее регулярны.

Степень регулярности учитывается режимами работы электроприемников, от которых зависит форма графиков нагрузки. Различают три характерных режима работы:

- непрерывный или продолжительный;
- кратковременный;
- повторно-кратковременный.

По виду графиков нагрузки приемники продолжительного режима делятся на две группы:

1. С непрерывным или однородным режимом работы;
2. С неоднородным режимом работы электроприемников, отключаемых в процессе работы (рис. 2.2, а, б).

Электроприемники продолжительного режима характеризуются коэффициентом включения:

$$k_B = \frac{t_B}{t_B + t_{\text{н}}} = \frac{t_B}{t_{\text{ц}}}, \quad (2.5)$$

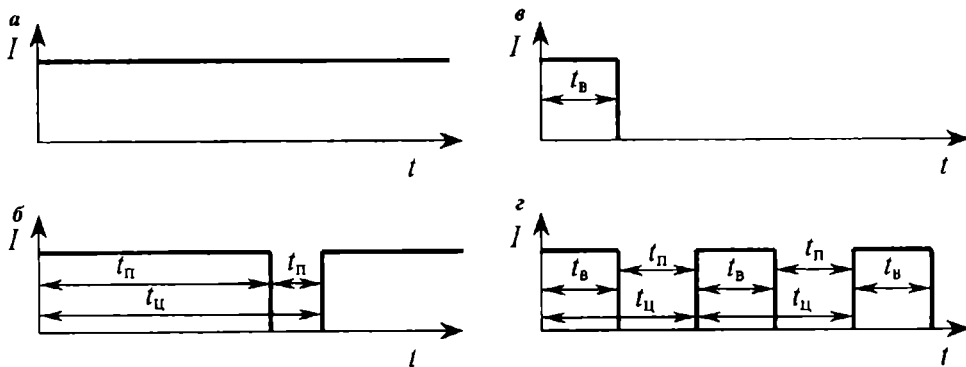


Рис. 2.2. Графики нагрузки электроприемников: а — продолжительный непрерывный режим работы; б — продолжительный режим с перерывами; в — кратковременный режим; г — повторно-кратковременный режим

где  $t_b$ ,  $t_n$ ,  $t_u$  — соответственно продолжительность включения, паузы и цикла.

Величина  $t_u$  в этом режиме работы должна быть более 10 мин.

Кратковременный режим характеризуется работой не более 4 мин (соответственно и нагревом), за чем следует длительный период охлаждения (рис. 2.2, в).

Повторно-кратковременный режим характеризуется работой не более 4 мин, затем непродолжительное охлаждение при отключенной нагрузке. Общая продолжительность цикла должна быть не более 10 мин (рис. 2.2, г). Данный режим работы характеризуется продолжительностью включения ПВ, которая определяется по формуле

$$ПВ = \frac{t_b}{t_b + t_n} \cdot 100\% = \frac{t_b}{t_u} \cdot 100\% . \quad (2.6)$$

По виду изменения нагрузки, времени включения  $t_b$  и пауз  $t_n$  индивидуальные графики (рис. 2.3) делятся на периодические (а), циклические (б), нециклические (в), нерегулярные (г).

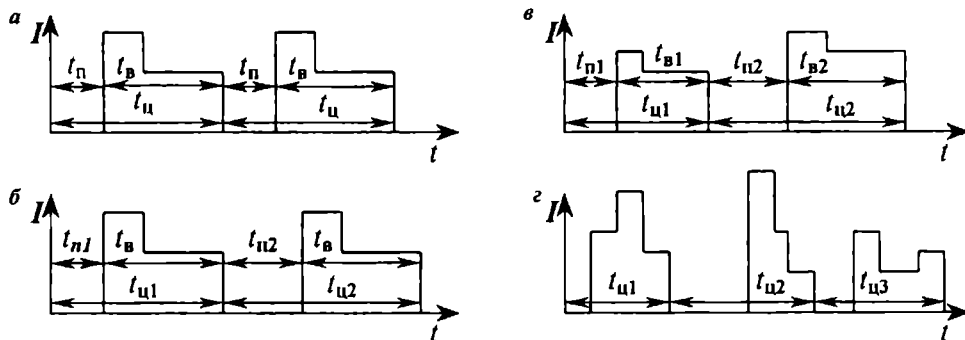


Рис. 2.3. Индивидуальные графики различных типов

Периодические графики отвечают ритмичному производству с одинаковыми токами и временем  $t_b$ ,  $t_n$ ,  $t_u$ . Циклические графики имеют электроприемники поточных линий, время  $t_n$  и  $t_u$  у таких графиков изменяется по случайному закону. Нециклические графики характерны для электроприемников, у которых выполняемые операции по времени строго не равны, при этом  $t_b$ ,  $t_n$  и  $t_u$  меняются от цикла к циклу. Нерегулярные графики характерны для технологических процессов с неустановившимся характером работы, например бурение скважин.

Первые три типа указанных графиков характеризуются стабильностью величины потребления электроэнергии  $W$  за время цикла. Графики четвертого типа характеризуются нестабильностью потребления электроэнергии, а величины  $t_b$  и  $t_n$  — различны.

Групповой график нагрузки складывается из индивидуальных графиков приемников, входящих в определенную технологическую группу. Взаимо-

связь нагрузок отдельных приемников согласно технологическому режиму работы и типы индивидуальных графиков определяют степень регулярности групповых графиков. Различают два вида такой взаимосвязи: а) между значениями нагрузки данного электроприемника в различные моменты времени; б) между значениями нагрузок двух различных электроприемников в данный момент времени.

Для периодических графиков (см. рис. 2.3, а), для которых время цикла  $t_{ц}$  равно периоду работы установки, заданное значение  $P_i(t)$  в момент времени  $t$  определяет и значение  $P_i(t + \Delta t)$  в последующий момент  $(t + \Delta t)$ , т. е. связи здесь жесткие. Наоборот, для циклического и нециклического графиков (см. рис. 2.3, б, в) однозначная связь между величинами  $P_i(t)$  и  $P_i(t + \Delta t)$  не наблюдается, однако при достаточно малых  $\Delta t$  эти связи все же сохраняются, не являясь жесткими и однозначными.

Взаимосвязи между нагрузками в разные моменты времени носят вероятностный характер и называются корреляционными.

Для любого технологического процесса, в котором задействовано различное оборудование, характерна взаимосвязь нагрузок между различными приемниками в данный момент времени.

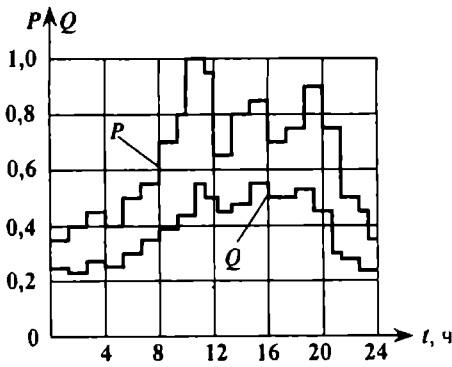
В зависимости от взаимосвязи между нагрузками отдельных приемников различают:

- приемники, включаемые в сеть только разновременно;
- приемники, включаемые в сеть только совместно, но нагрузки за время включения корреляционной связи не имеют;
- приемники, включаемые в сеть только одновременно, нагрузки их жестко связаны пропорционально или растут и убывают одновременно;
- независимые приемники, включаемые в сеть как совместно, так и раздельно;
- приемники, включаемые как независимые, но имеющие корреляционную связь, так как вероятность включения одного зависит от того, включен ли другой (например, комбайн очистного комплекса включается, если включена станция орошения).

Групповые графики нагрузки по степени регулярности подразделяются на три типа: периодические, почти периодические и нерегулярные. Основное применение получили первые два типа графиков: первый тип отвечает строго ритмичному производству при условии, что длительность периодов  $t_{ц}$  всех индивидуальных графиков одинакова и совпадает с периодом группового цикла  $t_{г}$ ; второй тип — групповой непериодический график — при установленном режиме работы удовлетворяет стабильности расхода электроэнергии.

При построении графиков нагрузки могут использоваться различные интервалы времени: 15 мин, 30 мин, час, смена, сутки, декада, месяц, год, в соответствии с чем они называются сменными, суточными, декадными, месячными, годовыми. В разные периоды года суточные графики нагрузки отличаются друг от друга, так как характеризуют потребление электроэнергии в летнее и зимнее время (рис. 2.4).

Рис.2.4. Суточный график нагрузки



Из годовых графиков нагрузки наиболее широко используются так называемые годовые графики по продолжительности, в которых все значения мощности расположены в порядке убывания. Они показывают продолжительность работы при данной мощности, а начальная ордината его равна наибольшей нагрузке (рис. 2.5).

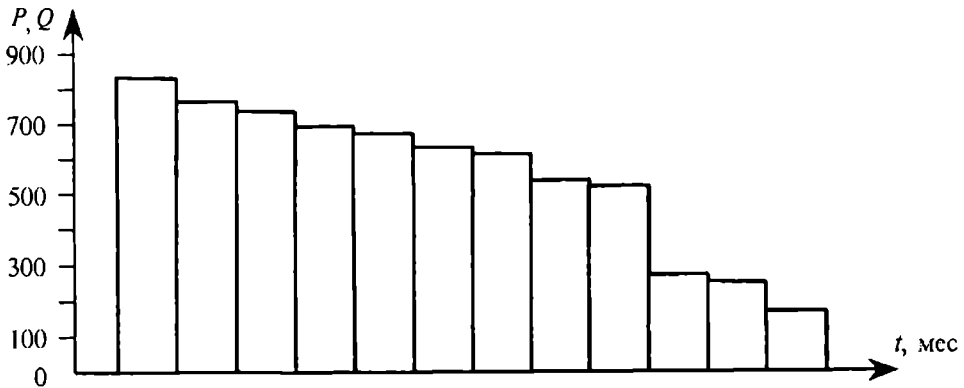
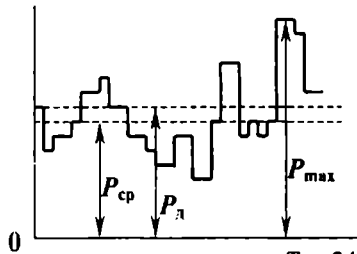


Рис.2.5. Годовой график нагрузки по продолжительности

Площадь, ограниченная суточным графиком нагрузки или графиком нагрузки по продолжительности и осями координат, в определенном масштабе дает расход активной  $W_a$  или реактивной  $W_p$  энергии за соответствующее время  $T$  (рис. 2.6).

На графиках нагрузки обычно выделяют среднюю, максимальную и среднеквадратическую мощность, позволяющие установить показатели, характеризующие графики нагрузки и учитывающие режим работы электроприемников по степени их использования во времени или по мощности.

Отношение расхода электроэнергии к времени дает среднюю активную  $P$ , кВт (реактивную) мощность:



$T = 24 \text{ ч}$  Рис. 2.6. Суточный график активной нагрузки



$$P_{\text{ср}} = \frac{W_a}{T}; \quad Q_{\text{ср}} = \frac{W_p}{T} \quad \text{или}$$

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^n (P_i t_i)}{\sum_1^n t_i}; \quad Q_{\text{ср}} = \frac{\sum_1^n (Q_i t_i)}{\sum_1^n t_i}. \quad (2.7)$$

Основными показателями графика нагрузки являются:

- *коэффициент использования*, равный отношению средней потребляемой мощности к суммарной установленной мощности,

$$K_{\text{иа}} = \frac{P_{\text{ср}}}{\sum_1^n P_{\text{ном. } i}}; \quad K_{\text{ип}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{\sum_1^n Q_{\text{ном. } i}}. \quad (2.8)$$

Коэффициент использования относится к режиму наибольшей загрузки приемников и зависит от потери мощности в потребителях и сетях.

- *коэффициент загрузки*, равный отношению фактической средней нагрузки  $P_{\text{ср } i}$  ( $Q_{\text{ср } i}$ ) приемника за время включения к номинальной мощности,

$$K_{\text{за}} = \frac{P_{\text{ср } i}}{P_{\text{ном. } i}}; \quad K_{\text{зр}} = \frac{Q_{\text{ср } i}}{Q_{\text{ном. } i}}; \quad (2.9)$$

- *коэффициент максимума* определяется как отношение максимальной мощности к средней,

$$K_{\text{макс а}} = \frac{P_{\text{макс}}}{P_{\text{ср}}}; \quad K_{\text{макс р}} = \frac{Q_{\text{макс}}}{Q_{\text{ср}}}; \quad (2.10)$$

- *коэффициент заполнения* графика, равный отношению средней мощности к максимальной,

$$K_{\text{за}} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{макс}}} = \frac{1}{K_{\text{макс а}}}; \quad K_{\text{зр}} = \frac{Q_{\text{ср}}}{Q_{\text{макс}}} = \frac{1}{K_{\text{макс р}}}; \quad (2.11)$$

- *коэффициент спроса* определяется отношением максимальной мощности к суммарной установленной мощности,

$$K_{\text{са}} = \frac{P_{\text{макс}}}{\sum_1^n P_{\text{ном. } i}}; \quad K_{\text{ср}} = \frac{Q_{\text{макс}}}{\sum_1^n Q_{\text{ном. } i}}, \quad (2.12)$$

$$K_{\text{са}} = \frac{K_{\text{макс а}} P_{\text{ср}} K_{\text{иа}}}{P_{\text{ср}}} = K_{\text{макс а}} K_{\text{иа}}; \quad K_{\text{ср}} = K_{\text{макс р}} K_{\text{ип}}. \quad (2.13)$$

Коэффициент спроса является обобщенным показателем, учитывающим степень загрузки приемников, их коэффициенты полезного действия и коэффициент полезного действия сети, а также режим работы и несовпадение максимумов нагрузки отдельных потребителей во времени. Отсюда следует, что  $K_c$  выше для потребителей с продолжительным режимом, чем для потребителей с кратковременным и повторно-кратковременным режимами.

Число часов максимума нагрузки, равное отношению расхода электроэнергии за соответствующее время к величине максимума нагрузки,

$$T_{на} = \frac{W_a}{P_{max}} = \frac{P_{cp} T}{K_{max a} P_{cp}} = \frac{T}{K_{max a}} = K_{за} T, \quad (2.14)$$

$$T_{нр} = K_{зр} T \quad \text{или} \quad T_{max} = \frac{P_{cp}}{P_{max}} 8760.$$

Коэффициент формы графика, равный отношению средней квадратичной нагрузки  $P_{ск}$  ( $Q_{ск}$ ) к средней нагрузке,

$$K_{\phi a} = \frac{P_{ск}}{P_{cp}}; \quad K_{\phi p} = \frac{Q_{ск}}{Q_{cp}}. \quad (2.15)$$

Средняя квадратичная нагрузка определяется по формулам

$$P_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i^2 t_i}{T}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i^2}{n}}; \quad (2.16)$$

$$Q_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_1^n Q_i^2 t_i}{T}} = \sqrt{\frac{\sum_1^n Q_i^2}{n}},$$

где  $n = \frac{T}{t}$  — число интервалов, на которые разделен график.

Этот коэффициент характеризует неравномерность графика во времени; свое наименьшее, равное единице, значение он принимает при неизменной во времени нагрузке. Он может быть стабилен для каждого данного типа предприятия.

Коэффициент одновременности максимумов нагрузки есть отношение суммарного расчетного максимума активной мощности узла системы электроснабжения к сумме расчетных максимумов активной мощности отдельных групп приемников, входящих в данный узел,

$$K_{pm} = \frac{P_{max\Sigma}}{\sum_1^n P_{расч. i}}. \quad (2.17)$$

Этот коэффициент характеризует смещение максимумов нагрузки отдельных групп приемников во времени, что способствует снижению общего суммарного максимума по сравнению с суммой максимумов отдельных групп приемников. Коэффициент  $K_{рм_а} \leq 1$ , его значение определяется отраслевыми нормативами. При расчетах принимают  $K_{рм_а} = 0,85 \div 1,0$  для линий напряжением выше 1 кВ системы внутреннего электроснабжения и  $K_{рм_а} = 0,95 \div 1,0$  для шин ГПП и ЛЭП внешнего электроснабжения.

Приведенное число приемников группы различных по номинальной мощности и режиму приемников одинаковой мощности, которое обуславливает ту же расчетную нагрузку, что и рассматриваемая группа различных по номинальной мощности и режиму работы приемников,

$$n_{пр} = \frac{\left( \sum_1^n P_{ном. i} \right)^2}{\sum_1^n P_{ном. i}^2}, \tag{2.18}$$

где  $P_{ном. i}$  — номинальная мощность  $i$ -го приемника.

**Пример:** На подстанции, начиная с 0 до 24 ч, через час снимались показания счетчика активной энергии (кВт): 3600; 3200; 3200; 3500; 3300; 3400; 3500; 4000; 4800; 5600; 6000; 5800; 4800; 5200; 5300; 4700; 5200; 5600; 6000; 5800; 5300; 4600; 4100; 3700. Построить суточный график нагрузки, определить коэффициент заполнения суточного графика, коэффициент максимума, число часов использования максимальной нагрузки и количество электроэнергии, переданное через подстанцию в течение суток (рис. 2.7).

*Решение.*

1. Определяем среднюю нагрузку:

$$P_{ср} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\sum_1^n t_i} = \frac{3600 \cdot 1 + 3200 \cdot 1 + 3200 \cdot 1 + 3500 \cdot 1 + 3300 \cdot 1 + 3400 \cdot 1 + 3500 \cdot 1 + 4000 \cdot 1 + 4800 \cdot 1 + 5600 \cdot 1 + 6000 \cdot 1 + 5800 \cdot 1 + 4800 \cdot 1 + 5200 \cdot 1 + 5300 \cdot 1 + 4700 \cdot 1 + 5200 \cdot 1 + 5600 \cdot 1 + 5800 \cdot 1 + 6000 \cdot 1 + 5300 \cdot 1 + 4600 \cdot 1 + 4100 \cdot 1 + 3700 \cdot 1}{1+1} = 4591,7 \text{ кВт.}$$

2. Коэффициент заполнения графика нагрузки:

$$K_{за} = \frac{P_{ср}}{P_{max}} = \frac{4591,7}{6000} = 0,765.$$

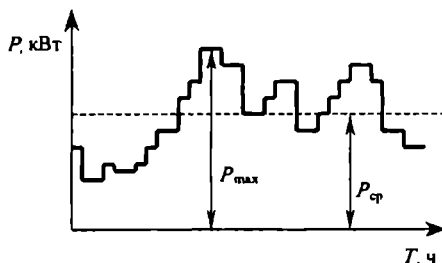


Рис. 2.7. Суточный график нагрузки подстанции

3. Коэффициент максимума:

$$K_{\max} = \frac{P_{\max}}{P_{\text{ср}}} = \frac{6000}{4591,7} = 1,306.$$

4. Число часов использования максимума нагрузки:

$$T_{\max} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\max}} 8760 = \frac{4591,7}{6000} 8760 = 6703 \text{ ч.}$$

5. Количество электроэнергии, переданное через подстанцию в течение суток:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W_0}{T}; W_0 = P_{\text{ср}} T = 4591,7 \cdot 24 = 110200,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч.}$$

## 2.3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

### 2.3.1. Понятие о расчетной нагрузке

Расчетная величина электрической нагрузки определяет основные технические решения по построению системы электроснабжения.

При определении нагрузки в системе электроснабжения рассматриваются шесть уровней распределения приемников и электроустановок, различающихся характером электропотребления и соответственно, способом расчета электрических нагрузок:

I уровень — линии электрической сети, связывающие отдельные приемники с распределительным пунктом, откуда они получают питание;

II уровень — распределительные сети напряжением до 1 кВ, обеспечивающие связь распределительных щитов, щитов управления, вводно-распределительных устройств (ВРУ), а также магистральные шинопроводы;

III уровень — включает щит низкого напряжения трансформаторной подстанции 6(10)/0,4 кВ или сам трансформатор;

IV уровень — шины РП 6 (10) кВ и линии, подходящие к ним, при отсутствии указанных РП — уровни IV и V — одинаковы;

V уровень — шины низшего напряжения ГПП, ПГВ, опорной подстанции района;

VI уровень — граница раздела предприятия и энергосистемы.

Поскольку закон изменения нагрузки во времени достаточно сложен и уравнение теплового баланса также сложно, выбор сечения проводников по нагреву производят не по максимальной температуре перегрева, а по расчетной нагрузке  $I_{\text{расч}}$ . В качестве расчетной нагрузки принимают среднюю нагрузку по активной мощности

$$P_{\text{расч}} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} P(t) dt, \quad 0 \leq t \leq T - \Delta t$$

за период реализации  $T$ , связанный с постоянной времени нагрева  $T_n$ . Условно принимают  $T_n = 10$  мин, тогда  $\Delta t = 3T = 30$  мин, что определяет понятие получасового максимума  $P_{\max}$ , являющегося основой всех расчетов.

Для проводников и электрических аппаратов любого назначения в качестве расчетной принимают получасовой максимум. Это объясняется тем,

что постоянная времени нагрева проводников сравнительно невелика (минуты) и они за короткий срок нагреваются до установившейся температуры. Эта же величина принимается для определения уровней напряжения в узлах нагрузки и отклонений напряжения на зажимах приемников. При выборе трансформаторов исходят из того, что их постоянная времени нагрева достаточно велика (часы) и они допускают перегрузку в часы максимума в зависимости от продолжительности работы с неполной нагрузкой в остальное время суток.

Таким образом, для правильного выбора всего комплекса оборудования и линий питания необходимо знать получасовой максимум нагрузки, который в дальнейшем будем называть расчетным максимумом. Помимо выбора электрооборудования его величина определяет объем электропотребления, вопросы присоединения к энергосистеме, капитальные вложения и штатное расписание.

### 2.3.2. Средние нагрузки

Для приемников первого уровня определяют только средние нагрузки за наиболее загруженную смену  $P_{см}$  и  $Q_{см}$ .

Расчеты участковых (цеховых) нагрузок на всех уровнях до трансформаторных подстанций (участковых) проводятся по расчетным коэффициентам с последующей привязкой расчетной нагрузки по удельным расходам электроэнергии.

Средние нагрузки за наиболее загруженную смену силовых приемников с одинаковыми режимами работы определяются по формулам

$$\begin{aligned} P_{см} &= K_n P_{ном} , \\ Q_{см} &= K_n P_{ном} \operatorname{tg} \varphi_{см} . \end{aligned} \quad (2.19)$$

Реактивные нагрузки приемников с опережающим током (синхронные машины, батареи конденсаторов) принимаются со знаком минус.

Для группы конденсаторов средняя реактивная мощность:

$$Q_{см.к} = Q_{ном.к} \left( \frac{U_{факт}}{U_{ном}} \right)^2 .$$

Для нескольких групп приемников разного режима:

$$P_{см} = \sum_1^n P_{см.i} ; \quad Q_{см} = \sum_1^n Q_{см.i} . \quad (2.20)$$

Если известен годовой расход активной  $W_{аг}$  и реактивной  $W_{рг}$  электроэнергии, то средние нагрузки могут быть определены по формулам

$$P_{см} = \frac{W_{аг}}{T_r a} ; \quad Q_{см} = \frac{W_{рг}}{T_r a} , \quad (2.21)$$

где  $T_r$  — число часов работы предприятия за год;  $a$  — годовой коэффициент энергоиспользования, учитывающий неравномерность нагрузки по сменам,

сезонные колебания нагрузки, а также работу в предпраздничные и праздничные дни.

Расчетные коэффициенты силовых нагрузок для горно-добывающей промышленности приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Расчетные коэффициенты электрических нагрузок электроприемников

Электроприемники	Коэффициенты		
	$K_n$	$\cos \varphi$	$K_c$
Компрессоры стационарные мощностью, кВт:			
до 200	0,75	0,75	0,8
до 400	0,8—0,85	0,8	0,85
выше 400	0,9	0,8	0,95
Насосы мощностью, кВт:			
до 50	0,7	0,75	0,7
до 200	0,75	0,8	0,8
до 500	0,8	0,8	0,85
выше 500	0,9	0,85	0,9
Вакуум—насосы	0,8	0,85	0,95
Вентиляторы местного проветривания	0,65	0,8	0,7
Вентиляторы главного проветривания мощностью, кВт:			
до 200	0,7	0,8	0,8
до 800	0,8	0,8	0,9
выше 800	0,9	0,85	0,95
Толкатели, опрокидыватели, качающиеся площадки, шахтные двери, бункерные затворы, скреперные лебедки мощностью до 15 кВт и выше, лебедки маневровые, откаточные, подъемные до 200 кВт	0,5—0,6	0,65	0,5—0,7
Подъемы мощностью, кВт:			
до 1000	0,65	0,75	0,75
до 2000	0,7	0,8	0,75
выше 2000	0,8	0,8	0,95
Погрузочные машины	0,65	0,65	0,7
Экскаваторы одноковшовые с приводом на постоянном токе по системе генератор—двигатель на добыче и на вскрыше	0,65	—	0,7—0,75
Экскаваторы одноковшовые с приводом на переменном токе	0,65	—	0,44—0,8
Экскаваторы одноковшовые	0,75	—	0,6—0,8
Землесосы и песковые насосы мощностью, кВт:			
до 50	0,8	0,8	0,8
выше 50	0,85	0,8	0,9
Дробилки — агрегаты крупного дробления, щековые и конусные с двухдвигательным приводом, дробилки конусные крупного дробления с однодвигательным приводом, дробилки конусные и щековые среднего дробления, одновалковые и четырехвалковые дробилки мелкого дробления	0,7	0,75	0,75—0,8
Питатели пластинчатые и тарельчатые, лотковые тяжелые (мощностью выше 10 кВт), классификаторы спиральные	0,7	0,8	0,8

Электроприемники	Коэффициенты		
	$K_{и}$	$\cos \varphi$	$K_{с}$
Питатели ленточные, барабанные, лотковые (мощностью до 10 кВт), грохоты разные	0,6	0,72	0,7
Конвейеры легкие мощностью до 4,5 кВт, питатели реакгентные, лебедки	0,65	0,65	0,7
Конвейеры тяжелые с шириной ленты до 1400 мм, шнеки, элеваторы, механические топки, питатели пластинчатые и тарельчатые	0,7	0,75	0,8
Конвейеры сверхтяжелые с шириной ленты 1600 — 2000 мм	0,8	0,85	0,8
Элеваторы — шнеки	0,7	0,75	0,75
Электровибрационные механизмы	0,6	0,65	0,7
Вагонопрокидыватели	0,45	0,5	0,5

Средняя нагрузка для осветительной сети принимается равной максимальной:

$$P_{\text{см осв.}} = K_{с} \sum_1^n P_{\text{ном осв. } i} , \quad (2.22)$$

где  $P_{\text{ном осв. } i}$  — установленная мощность светильника с учетом потерь в пускорегулирующей аппаратуре.

$$Q_{\text{см осв.}} = P_{\text{см осв.}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{см осв.}} , \quad (2.23)$$

где  $\varphi_{\text{см осв.}}$  — коэффициент реактивной мощности.

Если известны удельные нормы расхода электроэнергии, годовой расход электроэнергии определяется по формуле:

$$W_{г} = W_{\text{уд}} A , \quad (2.24)$$

где  $W_{\text{уд}}$  — удельный расход электроэнергии;  $A$  — выпуск продукции за рассматриваемый период.

При отсутствии удельных норм годовой расход может быть определен по выражениям:

$$\begin{aligned} W_{аг} &= a P_{\text{см}} T_{г} ; \\ W_{рг} &= a Q_{\text{см}} T_{г} . \end{aligned} \quad (2.25)$$

Годовой расчет энергии для освещения:

$$\begin{aligned} W_{а г осв.} &= P_{\text{см осв.}} T_{\text{мах осв.}} ; \\ W_{р г осв.} &= Q_{\text{см осв.}} T_{\text{мах осв.}} , \end{aligned} \quad (2.26)$$

где  $T_{\text{мах осв.}}$  — годовое число часов использования максимума осветительной нагрузки.

### 2.3.3. Методы определения расчетных нагрузок

Методы определения расчетных нагрузок условно можно разделить на две группы:

1) интерполяционные и эмпирические — расчет нагрузок по техническим нормам; по расходу электроэнергии и числу часов использования максимума; по коэффициенту спроса и др.;

2) вероятностные — метод упорядоченных диаграмм, статистический метод, метод вероятностного моделирования графиков нагрузки.

*Метод технологического графика* основан на определении расчетной нагрузки по групповому графику, построенному наложением и суммированием индивидуальных графиков, известным по условиям технологического процесса. Этот метод требует знания индивидуальных графиков нагрузки и их относительных сдвигов во времени.

*Метод удельного расхода* электроэнергии заключается в определении расхода электроэнергии по формуле (2.24), а максимальная расчетная нагрузка определяется как:

$$P_{\text{расч}} = \frac{W_{\text{уд}} A}{T}. \quad (2.27)$$

Данный метод рекомендуется применять для электроприемников, индивидуальные и групповые нагрузки которых неизменны или мало меняются во времени.

*Метод удельной нагрузки* на единицу производственной площади заключается в определении расчетной нагрузки группы электроприемников, размещенных на площади  $F$ :

$$P_{\text{расч}} = \gamma F, \quad (2.28)$$

где  $\gamma$  — удельная плотность нагрузки (кВт/м<sup>2</sup>).

Данный метод используют для ориентировочных расчетов на стадии проектного задания при равномерно распределенной нагрузке по производственной площади.

*Метод коэффициента спроса* широко распространен и позволяет получить расчетную нагрузку по номинальной мощности и значению коэффициента спроса (см. табл. 2.1).

Физический смысл коэффициента спроса можно уяснить из выражения:

$$K_c = K_o K_s,$$

где  $K_o$  — коэффициент одновременности работы приемников;  $K_s$  — коэффициент загрузки.

Расчетная нагрузка для группы однородных приемников по режиму работы определяется по формулам: