



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Институт повышения квалификации
и переподготовки

Кафедра «Электроснабжение»

ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

ПОСОБИЕ

для слушателей специальности переподготовки

9-09-0712-04 «Диагностика и техническое

обслуживание энергооборудования

организаций»

заочной формы обучения

Гомель 2024

УДК 621.31(075.8)
ББК 31.29я73
П64

*Рекомендовано кафедрой «Электроснабжение»
ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 02.09.2024 г.)*

Составители: *В. В. Бахмутская, С. Г. Жуковец*

Рецензенты: зав. каф. «Электротехника» Белорусского государственного университета транспорта канд. техн. наук, доц. *В. Н. Галушко*;
доц. каф. «Физика и электротехника» ГГТУ им. П. О. Сухого
канд. техн. наук, доц. *А. В. Козлов*

П64 **Потребители** электроэнергетики : пособие для слушателей специальности переподготовки 9-09-0712-04 «Диагностика и техническое обслуживание энергооборудования организаций» заоч. формы обучения / сост.: В. В. Бахмутская, С. Г. Жуковец. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – 80 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Рассмотрены формулировки основных понятий и дано описание классификации, характеристик электроприемников и потребителей электроэнергии, характерных групп электроприемников и особенностей их режимов работы, графиков электрических нагрузок и их показателей, а также методы определения расчетных электрических нагрузок, расхода электроэнергии, потерь мощности и энергии потребителей.

Для студентов специальности переподготовки 9-09-0421-02 «Экономическое право» ИПКиП.

УДК 621.31(075.8)
ББК 31.29я73

© Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| 1. Энергосбережение и эффективное потребление энергии..... | 5 |
| 2. Характеристика и режимы работы приемников и потребителей электрической энергии..... | 10 |
| 2.1. Характеристика приемников и потребителей | 10 |
| 2.2. Графики электрических нагрузок | 26 |
| 3.Расчётная нагрузка потребителей электроэнергии..... | 35 |
| 3.1 Расчетная нагрузка..... | 35 |
| 3.2. Определение расчетной электрической нагрузки различными методами..... | 41 |
| 4.Расчёт электрических сетей напряжением до 1 кВ | 49 |
| 5. Потери мощности и электроэнергии в элементах систем электроснабжения..... | 56 |
| 6. Повышение энергетической эффективности энергооборудования организаций..... | 62 |
| Литература | 80 |

ВВЕДЕНИЕ

Электрическая энергия оказывает значительное влияние на все отрасли народного хозяйства, а также на уровень развития и технический прогресс любого государства. Поэтому электроэнергетика наиболее объективно определяет уровень экономического развития страны. Проектирование систем электроснабжения требует комплексного подхода к выбору и оптимизации схем электрических сетей, техническому обоснованию решений, определяющих состав, структуру, внешние и внутренние связи, динамику развития и надежность работы системы в целом и ее отдельных элементов.

Цель изучения данной дисциплины состоит в получении теоретических знаний и практических навыков по электрооборудованию, электропотреблению и режимам работы различных потребителей, а также по формированию и влиянию электрических нагрузок на элементы системы электроснабжения.

Задачами дисциплины являются: изучение классификации и характеристик электроприемников и потребителей электроэнергии, характерных групп электроприемников и особенностей их режимов работы, графиков электрических нагрузок и их показателей; освоение методов определения расчетных электрических нагрузок, расхода электроэнергии, потерь мощности и энергии потребителей; ознакомление с путями повышения эффективности электропотребления; оценка влияния качества электроэнергии на работу электроприемника; ознакомление с взаимоотношением потребителей с энергоснабжающей организацией и взаимодействиями с органами Госэнергонадзора, региональными энергетическими комиссиями и другими организациями.

Предлагаемое пособие предназначено для слушателей электроэнергетических специальностей.

ТЕМА 1 ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭФФЕКТИВНОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ

Энергетика – область человеческой деятельности, связанная с производством, передачей потребителям и использованием энергии. В мире наиболее развито производство электроэнергии, что обусловлено совершенством и сравнительной простотой преобразователей этой энергии в механическую, тепловую и другие виды энергии, возможностью транспортировки и дробления для использования многими потребителями, а также экологической чистотой использования электроэнергии в подавляющем большинстве производств. К недостаткам электроэнергии следует отнести несовершенство и громоздкость устройств для хранения и накопления электроэнергии. Поскольку большая часть электроэнергии вырабатывается на теплоэлектростанциях, к энергетике относят и топливдобывающие предприятия. Обычно рассматривают топливно-энергетический комплекс страны. Энергосбережение направлено на экономное расходование топливно-энергетических ресурсов, запасы которых на земле ограничены.

Определение: **Энергосбережение** – это организационная, научная, практическая, информационная деятельность государственных органов, юридических и физических лиц, направленная на снижение расхода (потерь) топливно-энергетических ресурсов в процессе их добычи, переработки, транспортировки, хранения, производства, использования и утилизации.

Определение: **Эффективное использование топливно-энергетических ресурсов** – это использование всех видов энергии экономически оправданными, прогрессивными способами при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдении законодательства.

Определение: **Показатели энергоэффективности** – научно обоснованная абсолютная или удельная величина потребления топливно-энергетических ресурсов (с учётом их нормативных потерь) на производство единицы продукции (работ, услуг) любого назначения, установления нормативными документами.

Определение: **Топливо-энергетические ресурсы (ТЭР)** – это совокупность всех природных и преобразованных видов топлива и энергии, используемых в республике.

Определение: **Вторичные энергетические ресурсы (ВЭР)** – это энергия, полученная, в ходе любого технологического процесса в результате недоиспользования первичной энергии или в виде побочного продукта основного производства и не применяемая в этом технологическом процессе.

Определение: **Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов** – это достижение максимальной эффективности использования ТЭР при существующем уровне развития техники и технологий и соблюдении законодательства.

Определение: **Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии** – это источники электрической и тепловой энергии, использующие энергетические ресурсы рек, водохранилищ и промышленных водостоков, энергию ветра, солнца, редуцируемого природного газа, биомассы (включая древесные отходы), сточных вод и твёрдых бытовых отходов.

Определение: **Пользователи топливно-энергетических ресурсов** – это субъекты хозяйствования независимо от форм собственности, зарегистрированные на территории РБ в качестве юридических лиц или предпринимателей без образования юридического лица, а также другие лица, которые в соответствии с законодательством РБ имеют право заключать хозяйственные договоры, и граждане, использующие ТЭР.

Определение: **Производители топливно-энергетических ресурсов** – это субъекты хозяйствования независимо от форм собственности, зарегистрированные на территории Республики Беларусь в качестве юридических лиц, для которых любой из видов топливно-энергетических ресурсов, используемых в республике, является товарной продукцией.

Основное количество электроэнергии в республике потребляется в промышленности. Большую часть производимой электроэнергии дают тепловые электростанции, которые работают на привозном топливе (мазут, природный газ). Более 50 % электроэнергии вырабатывается в Минской и Гомельской областях. Мощной тепловой электростанцией в Республике Беларусь является Лукомльская ГРЭС мощностью 2,4 млн. кВт (2,4 ГВт), расположенная в Витебской области. Около 1 ГВт имеет мощность Березовская ГРЭС, меньшую - Смоленская и Василевичская ГРЭС. Часть электроэнергии вырабатывается на ТЭЦ, которые размещены в крупных городах (Минск, Витебск, Гомель и др.), а также на ТЭЦ при некоторых предприятиях Беларуси:

сахарных заводах, объединении «Беларускалий», Добрушской бумажной фабрике. В энергосистему страны входит и патриарх отечественной энергетики - БелГРЭС, которая была воздвигнута в 1930 г. Она разместилась в недрах торфяных болот в двух десятках километров от Орши в городском поселке Ореховск Оршанского района.

В 2021 году в Республике Беларусь введена в эксплуатацию Белорусская АЭС, которая состоит из двух энергоблоков суммарной мощностью до 2400 (2x1200) МВт. Место ее размещения – Островецкая площадка Гродненской области. Для белорусской АЭС выбран российский проект «АЭС-2006» с водо-водяными реакторами (ВВЭР) третьего поколения. Поколение 3 – усовершенствованные реакторы повышенной безопасности и надежности. Данный проект соответствует современным международным требованиям по ядерной и радиационной безопасности.



Рис. 1.1. Структура электропотребления в Беларуси.

В Минэнерго отмечен рост потребления электроэнергии в нашей стране. В 2023 г. электропотребление в Беларуси превысило 41 млрд кВтч. Так, за январь – ноябрь 2023 года выросло электропотребление: реальным сектором экономики – на 8,5%, населением для нужд отопления и горячего водоснабжения – на 38,4%, электротранспортом – на 23%.

Для сравнения показателей топливопотребляющего оборудования и устройств, проведения экономических расчетов и планирования введено понятие так называемого условного топлива.

Условное топливо представляет собой единицу учета органического топлива, применяемую для сопоставления эффективности различных видов топлива и суммарного учета. Использование условного топлива особенно удобно для сопоставления экономичности различных теплоэнергетических установок.

В качестве единицы условного топлива применяется 1 кг топлива с теплотой сгорания 7000 ккал/кг (29,3 МДж/кг), что соответствует хорошему малозольному сухому углю.

Для сравнения укажем, что бурые угли имеют теплоту сгорания менее 24 МДж/кг, а антрациты и каменные угли - 23-27 МДж/кг.

Отношение $Q/7000$ называется калорийным коэффициентом, и его принимают для:

- нефти - 1,43;
- природного газа - 1,15;
- торфа - 0,34-0,41 (в зависимости от влажности);
- торфобрикетов - 0,45 - 0,6 (в зависимости от влажности);
- дизтоплива - 1,45;
- мазута - 1,37.

Теплотворная способность различных видов топлива, ккал/кг, составляет примерно:

| | |
|-----------------------|----------------------------------|
| нефть | - 10 000; |
| природный газ | - 8 000 (ккал/ м ³); |
| каменный уголь | - 7 000; |
| дрова влажностью 10 % | - 3 900; |
| 40% - | 2 400; |
| торф влажности 10% | - 4 100; |
| 40% | - 2 500. |

Политика энергосбережения в Республике Беларусь. Государственная Программа РБ «Энергосбережение».

Еще 30 лет назад страны Европы обратили внимание на проблему недостатка собственных энергоресурсов. Первая заявила об этом Дания и разработала Программу энергосбережения. Политика энергосбережения в Республике Беларусь была начата в 90-х годах, когда в стране стали считать затраты на приобретение ТЭР, большей частью покупая их из-за границы.

Первый этап в политике энергосбережения в Республике Беларусь был связан с модернизацией производства в таких отраслях как:

- Электроника;
- Приборостроение;
- Производство средств связи;
- Химико-фармацевтическая промышленность;
- Промышленность полимерных и конструкционных материалов.

При отсутствии начальных средств важный рычаг в политике энергосбережения – привлечение *инвестиций*.

Второй этап – достижение финансовой активности и отладка инвестиционного механизма объектами технического перевооружения производств с наукоемкими и ресурсосберегаемыми технологиями, реформирование агропромышленного комплекса (АПК) и перевооружение отраслей народного хозяйства, обеспечивающих жилищное строительство.

Особенно большой потенциал энергосберегающих мероприятий заложен в жилищно-коммунальном секторе, где возможно внедрение конструкционных материалов с новыми свойствами, использование новых учетов и контроля потребляемой энергии, ведение компьютерных систем регулирования теплопотребления.

В 1997 году Правительством Республики Беларусь был создан Государственный комитет по энергосбережению и энергетическому надзору (сокращённо – Госкомэнергосбережение или ГК), а с 28 мая 1998 согласно Постановления Совета Министров РБ начал работу экспертный Совет Государственного комитета по энергосбережению и энергетическому надзору в РБ (Совет).

Основной целью деятельности этого Совета является *разработка* технических направлений энергосберегающей политики и стратегического развития этих направлений. Так же экспертный совет будет проводить *экспертизу* научно-технический и технико-экономических разработок, проектов строительства новых, расширение и реконструкцию действующих объектов, разработку и рассмотрение новых стандартов, норм и правил, технических условий (ТУ), технологий оборудования, приборов учета, регулирования относящихся к сфере использования топливно-энергетических ресурсов.

19 июня 1998 палатой представителей РБ и Советом Министров принят *Закон* Республики Беларусь «*Об энергосбережении*», *который* подписан Президентом РБ. Закон имеет 5 глав, где даны основные понятия терминов, используемых в энергосбережении, и указаны все стороны взаимоотношений в процессе деятельно-

сти физических и юридических лиц в РБ в сфере энергосбережения, записаны цели и задачи политики энергосбережения в нашей стране.

Законодательство Республики Беларусь об энергосбережении состоит из названного выше Закона и иных актов Законодательства РБ, регулирующих вопросы энергосбережения. На сегодняшний день Закон имеет более 20 дополнений принятых Советом Министров в виде Постановлений Совета Министров Республики Беларусь.

ТЕМА 2

ХАРАКТЕРИСТИКА И РЕЖИМЫ РАБОТЫ ПРИЕМНИКОВ И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

2.1 Характеристика приемников и потребителей

Потребителем электрической энергии называется электроприемник или группа электроприемников, объединенных технологическим процессом и размещающихся на определенной территории. Приемником электрической энергии (электроприемником) называется аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии (ЭЭ) в другой вид.

Системой электроснабжения называют совокупность устройств для производства, передачи и распределения электрической энергии.

При расчете электрических нагрузок необходимо разделить систему электроснабжения предприятия по уровням.

Различают 6 уровней:

- 1 уровень – отдельные электроприемники;
- 2 уровень – щиты распределительные напряжением до 1 кВ, щиты управления, ВРУ, шинопроводы, сборки и магистрали;
- 3 уровень – щит низкого напряжения ТП 10(6) /0,4 кВ;
- 4 уровень – шины распределительной подстанции РП-10(6)кВ;
- 5 уровень – шины главной понизительной подстанции;
- 6 уровень – граница раздела предприятия и энергосистемы.

В зависимости от выполняемых функций, возможностей обеспечения схемы внешнего электроснабжения, величины и режимов потребления ЭЭ и мощности, тарифов и систем расчетов за ЭЭ, особенностей правил пользования ЭЭ потребителей принято делить на следующие основные группы:

- промышленные и приравненные к ним потребители;
- производственные сельскохозяйственные потребители;
- бытовые потребители;
- общественно-коммунальные потребители.

Промышленные потребители остаются наиболее энергоемкой группой потребителей ЭЭ: доля промышленности и строительства в суммарном электропотреблении по народному хозяйству составляет около 65 %, по транспорту – 6,2 %, сельскому хозяйству – 10 %, на коммунально-бытовые нужды тратится около 18,8 %.

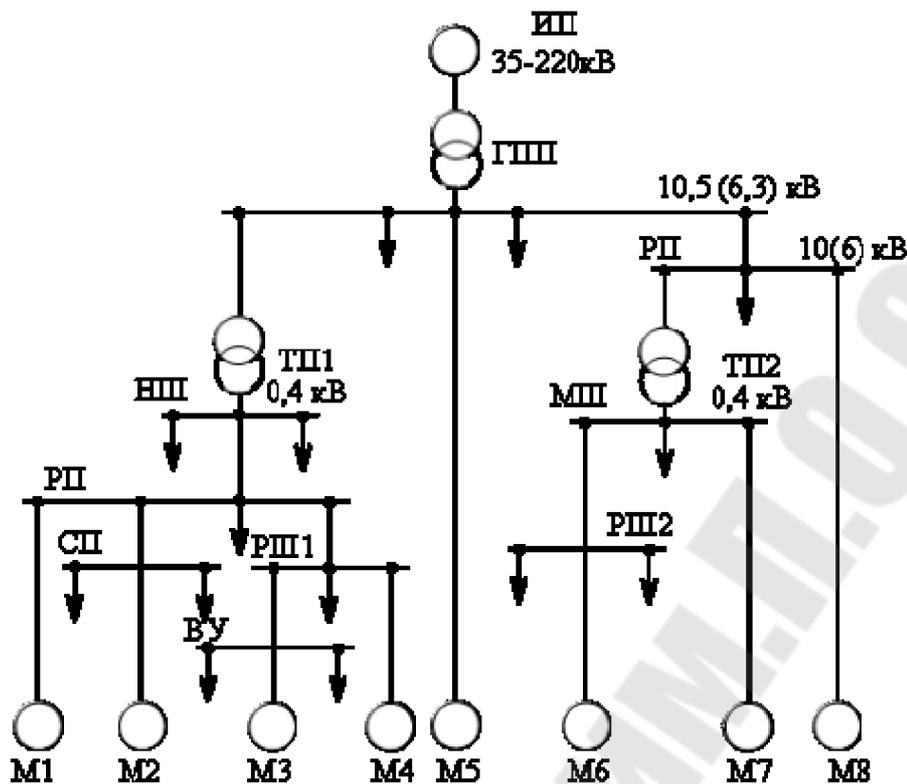


Рис. 2.1. Структурная схема электроснабжения предприятия

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

Электроприемники I категории – электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой: опасность для жизни людей, значительный ущерб народному хозяйству, повреждение дорогостоящего основного оборудования, массовый брак продукции, расстройство сложного технологического процесса, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства. Из состава электроприемников I категории выделяется особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования.

Электроприемники II 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.

Электроприемники III категории – все остальные

электроприемники, не подходящие под определения I и II категорий. Это приемники вспомогательных цехов, несерийного производства продукции и т.п.

Электроприемники I категории 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 I категории должно предусматриваться дополнительное питание от третьего независимого взаимно резервирующего источника питания.



Рис. 2.2. Категории электроприемников

Все электроприемники классифицируются:

- по отношению обеспечения надежности электроснабжения;
- по уровню напряжения;
- по мощности;
- по роду тока;
- по сходству графиков нагрузки.

Электротехнические установки, производящие, преобразующие, распределяющие и потребляющие электроэнергию, по уровню напряжения подразделяются на электроустановки напряжением выше 1 кВ и до 1 кВ (для электроустановок постоянного тока – до 1,5 кВ).

Электроустановки напряжением до 1 кВ переменного тока выполняются с глухозаземленной нейтралью, а в условиях с повышенными требованиями к безопасности – с изолированной

нейтралью (торфяные разработки, угольные шахты, передвижные электроустановки и т.п.).

Установки постоянного тока выполняются с глухозаземленной и изолированной нулевой точкой.

Установки выше 1 кВ подразделяются на установки:

- 1) с изолированной нейтралью (напряжением 35 кВ и ниже);
- 2) с компенсированной нейтралью (включенной на землю через индуктивное сопротивление для компенсации емкостных токов), применяются для сетей напряжением до 35 кВ и редко 110 кВ;
- 3) с глухозаземленной нейтралью (напряжением 110 кВ и выше).

По роду тока все электроприемники, работающие от сети, можно разделить на электроприемники переменного тока промышленной частоты 50 Гц (в ряде стран используют 60 Гц), переменного тока повышенной или пониженной частоты, постоянного тока.

Большинство электроприемников промышленных потребителей электроэнергии работает на переменном трехфазном токе частотой 50 Гц.

Установки повышенной частоты применяют:

- для нагрева под закал, для штамповки металла, СВЧ-печи и т.п.;
- в технологиях, где нужна высокая скорость вращения электродвигателя (текстильная промышленность, деревообработка, переносной электроинструмент в авиастроении) и т.п.

Для получения частоты до 10 000 Гц применяют тиристорные преобразователи, для частоты свыше 10 000 Гц используют электронные генераторы.

Электроприемники пониженной частоты используются в транспортных устройствах, например для прокатных станов ($f=16,6$ Гц), в установках для перемешивания металла в печах ($f=0...25$ Гц). Кроме того, пониженную частоту напряжения используют в индукционных нагревательных устройствах.

Постоянный ток применяют в гальваническом производстве (хромирование, никелирование и т.д.), для сварки на постоянном токе, для питания двигателей постоянного тока и т.п.

В установках, не требующих регулирования скорости в процессе работы, применяются электроприводы переменного тока (асинхронные и синхронные двигатели). Нерегулируемые электродвигатели переменного тока – основной вид электроприемников в промышленности, на долю которых приходится около 70% суммарной мощности.

При выборе типа электродвигателя для нерегулируемого электропривода переменного тока часто руководствуются следующими соображениями:

– при напряжении до 1 кВ и мощности до 100 кВт чаще экономичнее применять асинхронные двигатели, а свыше 100 кВт – синхронные;

– при напряжении 6 кВ и мощности до 300 кВт – асинхронные двигатели, выше 300 кВт – синхронные;

– при напряжении 10 кВ и мощности до 400 кВт – асинхронные двигатели, выше 400 кВт – синхронные.

Асинхронные двигатели с фазным ротором применяются в мощных приводах с тяжелыми условиями пуска (в шахтных подъемниках и др.).

Электродвигатели таких общепромышленных установок как компрессоры, вентиляторы, насосы и подъемно-транспортные устройства в зависимости от номинальной мощности имеют напряжение питания 0,22 – 10 кВ. Номинальная мощность электродвигателей этих установок изменяется от долей киловатт до 800 кВт и более. Названные электроприемники относят, как правило, к I категории надежности электроснабжения. Например, отключение вентиляции в цехах химических производств требует эвакуации людей из помещений и, следовательно, остановки производства.

Преобразование электроэнергии переменного тока в постоянный требует затрат на установку преобразовательных агрегатов и аппаратуры управления, на строительство помещений для них, а также эксплуатационных расходов на их обслуживание и на потери электроэнергии. Поэтому стоимость системы электроснабжения и удельная стоимость электроэнергии на постоянном токе выше, чем на переменном. Двигатели постоянного тока стоят дороже, чем асинхронные и синхронные двигатели. Регулируемые приводы постоянного тока применяются в тех случаях, когда требуется быстрое, широкое и (или) плавное изменение частоты вращения.

Важной характеристикой электроприемника является коэффициент мощности $\cos(\varphi_n)$. Коэффициент мощности является паспортной характеристикой, отражающей долю потребляемой активной мощности при номинальных нагрузке и напряжении. Номинальное значение $\cos\varphi$ электродвигателя зависит от его типа, номинальной мощности, частоты вращения и других характеристик. При эксплуатации электродвигателей их $\cos\varphi$ в основном зависит от загрузки.

Для электропривода крупных насосов, компрессоров и вентиляторов часто применяют синхронные двигатели, которые используются как дополнительные источники реактивной мощности в системе электроснабжения.

Подъемно-транспортным устройствам характерны частые толчки нагрузки, которые вызывают изменения коэффициента мощности в значительных пределах (0,3 – 0,8). По надежности электроснабжения их обычно относят к I и II категориям (в зависимости от роли в технологическом процессе).

График нагрузки приемника является основным показателем, по которому его следует классифицировать. В действительности график нагрузки каждого приемника отличается от заданного при проектировании. На режим работы приемника влияют технологические особенности каждой отрасли промышленности.

Приемники электрической энергии могут быть подразделены на группы по сходству режимов, т.е. по сходству графиков нагрузки. Деление потребителей на группы позволяет более точно находить суммарную электрическую нагрузку.

Различают три характерные группы приемников:

1. Приемники, работающие в режиме с продолжительно неизменной или мало меняющейся нагрузкой. В этом режиме электрическая машина или аппарат может работать продолжительное время без повышения температуры отдельных частей машины или аппарата свыше допустимой. Примерами приемников, работающих в этом режиме, являются электродвигатели компрессоров, насосов, вентиляторов и т. п.

2. Приемники, работающие в режиме кратковременной нагрузки. В этом режиме рабочий период машины или аппарата не настолько длителен, чтобы температура отдельных частей машины или аппарата могла достигнуть установившегося значения. Период остановки машины или аппарата настолько длителен, что машина практически успевает охладиться до температуры окружающей среды. Примерами данной группы приемников являются электродвигатели электроприводов вспомогательных механизмов металлорежущих станков (механизмы подъема поперечины, зажимы колонн, двигатели быстрого перемещения суппортов и др.), гидравлических затворов и т. п.

3. Приемники, работающие в режиме повторно-кратковременной нагрузки. В этом режиме кратковременные рабочие

периоды машины или аппарата чередуются с кратковременными периодами отключения. Повторно-кратковременный режим работы характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ) и длительностью цикла. В повторно-кратковременном режиме электрическая машина или аппарат может работать с допустимой для них относительной продолжительностью включения неограниченное время, причем превышение температур отдельных частей машины или аппарата не выйдет за пределы допустимых значений. Примером этой группы приемников являются электродвигатели кранов, сварочные аппараты и т. п.

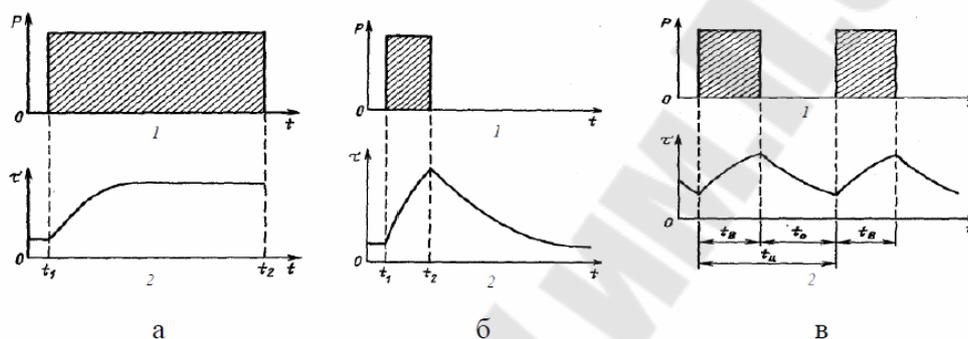


Рис. 2.3. Графики нагрузки при различных режимах работы:
 а – продолжительный режим работы электроприемника;
 б – кратковременный режим работы электроприемника;
 в – повторно-кратковременный режим работы электроприемника

По технологическому назначению приемники электроэнергии классифицируют в зависимости от вида энергии, в который данный приемник преобразует электрическую энергию: электродвигатели приводов машин 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.).

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. Характер нагрузки, как правило, 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. Например, прекращение подачи сжатого воздуха на машиностроительном заводе, где режущий инструмент крепится при помощи пневматических устройств, может вызвать ранения обслуживающего персонала. Прекращение электро-снабжения насосной станции на металлургическом заводе может вывести из строя такую ответственную установку, как доменная печь, и причинить крупные убытки. Последствия отключения насосных установок во время пожара не нуждаются в пояснениях. В ряде цехов прекращение питания двигателей вентиляторов может вызвать массовые отравления работающего персонала. Таких примеров можно привести большое количество. В указанных 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 0,8-0,85.

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.

Электродвигатели производственных механизмов. Этот вид приемников встречается 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 ее, 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, как правило, ко 2-й категории.

Электротермические приемники промышленных предприятий в соответствии с методами нагрева делят на следующие группы:

- дуговые электропечи для плавки черных и цветных металлов;
- установки индукционного нагрева для сварки и термообработки металлов и сплавов;
- электрические печи сопротивления и электросварочные установки.

По способу превращения электрической энергии в тепловую можно разделить на:

- 1) печи сопротивления;
- 2) индукционные печи и установки;
- 3) дуговые электрические печи;
- 4) печи со смешанным нагревом.

1. Печи сопротивления по способу нагрева подразделяются на печи косвенного действия и печи прямого действия.

Нагрев материала в печах косвенного действия происходит за счет тепла, выделяемого нагревательными элементами при прохождении по ним электрического тока. Печи косвенного нагрева являются установками напряжением до 1000 В и питаются в большинстве случаев от сетей 380 В промышленной частоты 50 Гц. Печи выпускаются одно- и трехфазными мощностью от единиц до нескольких тысяч киловатт. Коэффициент мощности в большинстве случаев равен $\cos\varphi = 1$.

В печах прямого действия нагрев осуществляется теплом, выделяемым в нагреваемом изделии при прохождении по нему электрического тока. Печи выполняются одно- и трехфазными мощностью до 3000 кВт; питание осуществляется током промышленной частоты 50 Гц от сетей 380/220 В или через понижающие трансформаторы от сетей более высокого напряжения. Коэффициент мощности лежит в интервале от 0,7 до 0,9. Большинство печей сопротивления в отношении бесперебойности электроснабжения относится к приемникам электрической энергии 2-й категории.

2. Печи и установки индукционного и диэлектрического нагрева подразделяются на плавильные печи и установки для закалки и сквозного нагрева диэлектриков

Расплавление металла в инерционных печах осуществляется теплом, возникающим в нем при прохождении индукционного тока.

Плавильные печи изготавливаются со стальным сердечником и без него.

Печи с сердечником применяются для плавления цветных металлов и их сплавов. Питание печей осуществляется током промышленной частоты 50 Гц напряжением 380 В и выше в зависимости от мощности. Печи с сердечником выпускаются одно-, двух- и трехфазными мощностью до 2000 кВА. Коэффициент мощности колеблется в пределах (печи для плавки алюминия имеют, для плавки меди.

Печи без сердечника применяются для выплавки высококачественной стали и реже – цветных металлов. Питание промышленных печей без сердечника может быть осуществлено током промышленной частоты 50 Гц от сетей напряжением 380 В и выше и током повышенной частоты 500-10 000 Гц от тиристорных или электромашинных преобразователей. Приводные двигатели преобразователей питаются током промышленной частоты.

Печи выпускаются мощностью до 4500 кВА, коэффициент мощности их очень низок: от 0,05 до 0,25. Все плавильные печи относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

Установки для закалки и сквозного нагрева в зависимости от назначения питаются при частотах от 50 Гц до сотен килогерц.

Питание установок повышенной и высокой частоты производится соответственно от тиристорных или машинных преобразователей индукторного типа и ламповых генераторов. Эти установки относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

В установках для нагрева диэлектриков нагреваемый материал помещается в электрическое поле конденсатора и нагрев происходит за счет токов смещения. Эта группа установок широко применяется для клейки и сушки древесины, нагрева пресс порошков, пайки и сварки пластиков, стерилизации продуктов и т. п. Питание осуществляется током с частотой 20-40 МГц и выше. В отношении бесперебойности электроснабжения установки для нагрева диэлектриков относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

3. Дуговые электрические печи по способу нагрева разделяются на печи прямого и косвенного действия.

В печах прямого действия нагрев и расплавление металла осуществляются теплом, выделяемым электрической дугой, горящей между электродом и расплавляемым металлом. Дуговые печи прямого действия подразделяются на ряд типов, характерными из которых являются сталеплавильные и вакуумные.

Сталеплавильные печи питаются током промышленной частоты напряжением 6-110 кВ через понижающие трансформаторы. Печи выпускаются трехфазными мощностью до 45000 кВА в единице. Коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,85-0,9$. В процессе работы в период расплавления шихты в дуговых сталеплавильных печах происходят частые эксплуатационные короткие замыкания (к.з.). Ток эксплуатационного к.з. превышает номинальный в 2,5-3,5 раза. Короткие замыкания вызывают снижение напряжения на шинах подстанции, что отрицательно сказывается на работе других приемников электрической энергии. В связи с этим совместная работа дуговых печей и других потребителей от общей подстанции допустима в том случае, если при питании от мощной энергосистемы суммарная мощность печей не превышает 40 % мощности понизительной подстанции, а при питании от маломощной системы 15-20 %.

Вакуумные дуговые печи выполняются мощностью до 2000 кВт. Питание осуществляется постоянным током напряжением 30-40 В. В качестве источников электрической энергии применяются электромашинные преобразователи и полупроводниковые выпрямители, включаемые в сеть переменного тока 50 Гц.

Нагрев металла в печах косвенного действия осуществляется теплом, выделяемым электрической дугой, горящей между угольными электродами. Дуговые печи косвенного нагрева нашли применение для выплавки меди и ее сплавов. Мощность печей сравнительно невелика (до 500 кВА); питание производится током промышленной частоты 50 Гц от специальных печных трансформаторов. В отношении бесперебойности электроснабжения эти печи относятся к приемникам электрической энергии 1-й категории, допускающим кратковременные перерывы в питании.

Электрические печи со смешанным нагревом можно разделить на рудотермические и печи электрошлакового переплава.

В рудотермических печах материал нагревается теплом, которое

выделяется при прохождении электрического тока по шихте и горении дуги. Печи применяются для получения ферросплавов, корунда, выплавки чугуна, свинца, возгонки фосфора, выплавки медного и медно-никелевого штейна. Питание осуществляется током промышленной частоты через понижающие трансформаторы. Мощность некоторых печей очень велика, до 100 МВА (печь для возгонки желтого фосфора). Коэффициент мощности 0,85-0,92. В отношении бесперебойности электроснабжения печи для рудотермических процессов относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

В печах электрошлакового переплава нагрев осуществляется за счет тепла, выделяющегося в шлаке при прохождении по нему тока. Расплавление шлака производится теплом электрической дуги. Электрошлаковый переплав применяется для получения высококачественных сталей и специальных сплавов. Питание печей осуществляется током промышленной частоты 50 Гц через понижающие трансформаторы, обычно от сетей 6-10 кВ со вторичным напряжением 4-60 В. Печи выполняются, как правило, однофазными, но могут быть и трехфазными. Коэффициент мощности 0,85-0,95. В отношении надежности электроснабжения печи электрошлакового переплава относятся к приемникам электрической энергии 1-й категории.

Электрохимические и электролизные установки (электролитические ванны для электролиза воды, растворов, расплавов цветных металлов; установки электрохимических процессов в газе; ванны для гальванических покрытий: омеднения, никелирования, хромирования, оцинкования и т. п.) работают на постоянном токе, который получают от преобразовательных подстанций, выпрямляющих трехфазный переменный ток.

Для преобразования трехфазного тока в постоянный или трехфазного тока промышленной частоты 50 Гц в трехфазный или однофазный ток пониженной, повышенной или высокой частоты на территории промышленного предприятия сооружаются преобразовательные установки.

В зависимости от типа преобразователей тока преобразовательные установки делятся на:

- 1) полупроводниковые преобразовательные установки;
- 2) преобразовательные установки с ртутными выпрямителями;
- 3) преобразовательные установки с двигателями-генераторами,

4) преобразовательные установки с механическими выпрямителями.

По своему назначению преобразовательные установки служат для питания:

- 1) двигателей ряда машин и механизмов;
- 2) электролизных ванн;
- 3) внутриводского электрического транспорта;
- 4) электрофильтров;
- 5) сварочных установок постоянного тока и др.

Преобразовательные установки для целей электролиза широко применяются в цветной металлургии для получения электролитических алюминия, свинца, меди и пр. В таких установках ток промышленной частоты напряжением 6-35 кВ, как правило, при помощи кремниевых выпрямителей преобразуется в постоянный ток необходимого по технологическим условиям напряжения (до 825 В).

Перерыв в питании электролизных установок не приводит к тяжелым авариям с повреждением основного оборудования и может быть допущен на несколько минут, а в некоторых случаях на несколько часов. Здесь перерыв питания связан в основном с недовыпуском продукции. Однако вследствие обратной ЭДС электролизных ванн в некоторых случаях могут иметь место перемещения выделившихся металлов обратно в раствор ванны и, следовательно, дополнительная затрата электроэнергии на новое выделение этого же металла. Электролизные установки должны снабжаться электрической энергией, как приемники 1-й категории, но допускающие кратковременные перерывы в питании. Режим работы электролизных установок дает достаточно равномерный и симметричный по фазам график нагрузки. Коэффициент мощности электролизных установок равен примерно 0,85-0,9. Особенностью электролизного процесса является необходимость поддержания постоянства выпрямленного тока, и в связи с этим возникает необходимость регулирования напряжения со стороны переменного тока.

Преобразовательные установки для внутриводского электрического транспорта (откатка, подъем, различные виды перемещения грузов и т.п.) по мощности относительно невелики (от сотен до 2000-3000 кВт). Коэффициент мощности таких установок колеблется в пределах 0,7-0,8. Нагрузка на стороне переменного тока симметрична по фазам, но резко изменяется за счет пиков тока при

работе тяговых электродвигателей Перерыв в питании приемников этой группы может повлечь за собой порчу продукции и даже оборудования (особенно на металлургических заводах). Прекращение работы транспорта вообще вызывает серьезные осложнения в работе предприятия, и поэтому эта группа потребителей должна снабжаться электроэнергией, как приемники 1-й или 2-й категории, допускающие кратковременный перерыв в питании Питание этих установок производится переменным током промышленной частоты напряжением 0,4-35 кВ.

Преобразовательные установки для питания электрофильтров (с механическими выпрямителями) до 100-200 кВт имеют широкое применение для очистки газов. Питаются эти установки переменным током промышленной частоты от специальных трансформаторов, имеющих на первичной обмотке напряжение 6-10 кВ, а на вторичной до 110 кВ Коэффициент мощности этих установок равен 0,7-0,8. Нагрузка на стороне высокого напряжения симметрична и равномерна. Перерывы в питании допустимы, длительность их зависит от технологического процесса производства. В таких производствах, как химические заводы, эти установки могут быть отнесены к приемникам 1-й и 2-й категорий.

Установки электростатического поля применяют для создания направленного движения капель при выполнении, например, электрокраски, для улавливания твердых взвешенных частиц в газе с помощью электрофильтров (очистка дымовых газов), для разделения смесей жидкости и газа, различающихся по размерам и электропроводности.

Электросварочные установки. Технологически сварку делят на дуговую и контактную, по способу производства работ - на ручную и автоматическую.

Электросварочные установки, как приемники делятся на установки, работающие на переменном и постоянном токе. Технологически сварка делится на дуговую и контактную, по способу производства работ – на ручную и автоматическую.

Электросварочные агрегаты постоянного тока состоят из двигателя переменного тока и сварочного генератора постоянного тока. При такой системе сварочная нагрузка распределяется по трем фазам в питающей сети переменного тока равномерно, но график ее остается переменным. Коэффициент мощности таких установок при номинальном режиме работы составляет 0,7-0,8; при холостом ходе

коэффициент мощности снижается до 0,4. Среди сварочных агрегатов постоянного тока имеются и выпрямительные установки.

Электросварочные установки переменного тока работают на промышленной частоте переменного тока 50 Гц и представляют собой однофазную нагрузку в виде сварочных трансформаторов для дуговой сварки и сварочных аппаратов контактной сварки. Сварка на переменном токе дает однофазную нагрузку с повторно-кратковременным режимом работы, неравномерной нагрузкой фаз и, как правило, низким коэффициентом мощности (0,3-0,35 для дуговой и 0,4-0,7 для контактной сварки). Сварочные установки питаются от сетей напряжением 380-220 В. Сварочные трансформаторы на строительно-монтажных площадках характеризуются частыми перемещениями в питающей сети. С точки зрения надежности питания, сварочные установки относятся к приемникам электрической энергии 2-й категории.

Ручной электроинструмент. К этой группе приемников электроэнергии относят различные ручные механизированные электроинструменты: электродрели, электрогайковерты, электротруборезы, электросверлилки, электрорубанки, ручные электропилы, электромолотки, глубинные вибраторы и др.

Электрические осветительные установки.

Электрические светильники представляют собой однофазную нагрузку, однако благодаря незначительной мощности приемника (обычно не более 2 кВт) в электрической сети при правильной группировке осветительных приборов можно достичь достаточно равномерной нагрузки по фазам (с несимметрией не более 5-10 %).

Характер нагрузки равномерный, без толчков, но ее значение изменяется в зависимости от времени суток, года и географического положения. Частота тока общепромышленная, равная 50 Гц. Коэффициент мощности для ламп накаливания равен 1, для газоразрядных ламп 0,6-0,92.

2.2. Графики электрических нагрузок

Под нагрузкой в данный момент времени понимается ее действующее значение, показываемое измерительным прибором с достаточно малой инерцией, например, стрелочным амперметром.

Рассматривают три вида нагрузок:

- по току I ,
- по активной P мощности,

– по реактивной Q мощности.

Кривая изменения нагрузки во времени $I(t)$, $P(t)$ или $Q(t)$ называется графиком нагрузки.

Различают графики нагрузки:

- индивидуальные;
- групповые.

Индивидуальные графики нагрузки создаются отдельными электроприемниками и обозначаются строчными символами: $i(t)$, $p(t)$, $q(t)$.

Для большинства заводских электроприемников характерна цикличность их работы, обусловленная многократным повторением операций комплексного технологического процесса. Вследствие этого индивидуальные графики обладают регулярностью, которую необходимо учитывать при исследовании и расчетах нагрузок.

Различают три основных характерных режима работы электроприемников, от которых зависит форма графиков нагрузки:

- продолжительный;
- кратковременный;
- повторно-кратковременный (ПКР).

В свою очередь электроприемники продолжительного режима работы делят на две разновидности по виду графиков нагрузки:

а) электроприемники с непрерывным режимом работы (большинство вентиляторов, насосов, компрессоров, электролизные установки и др.);

б) электроприемники, которые в процессе технологического цикла отключаются (неоднородный режим работы).

На рис. 2.4 приведены графики нагрузки и изменения температуры нагрева частей электроприемника при различных режимах работы.

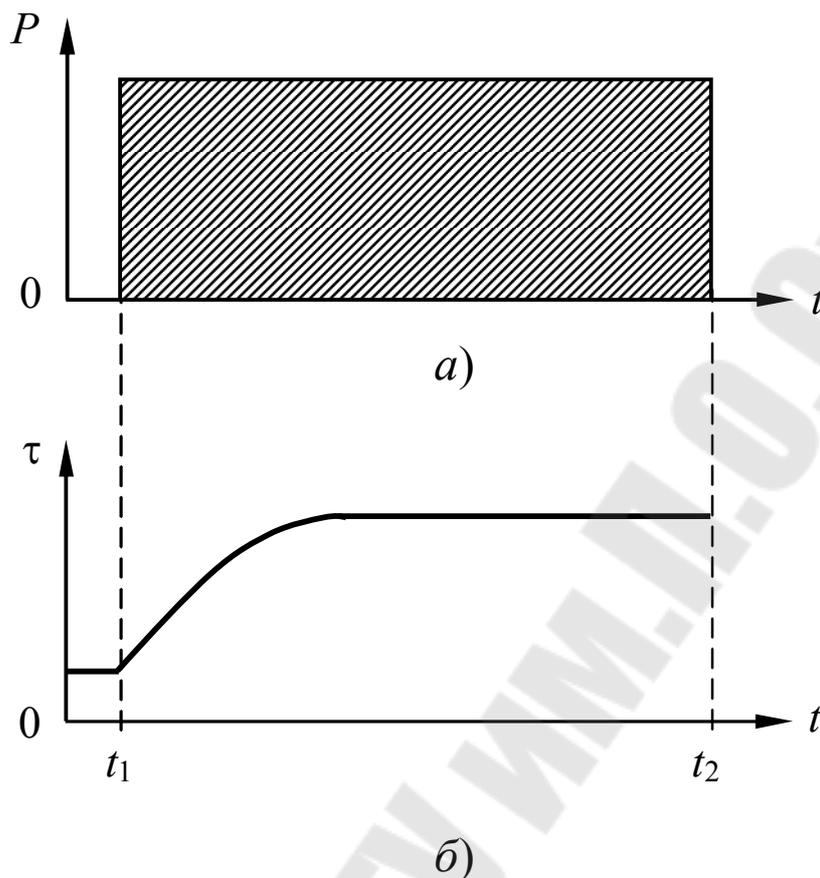


Рис. 2.4. Продолжительный режим работы электроприемника:
 а – графики нагрузки;
 б – изменения температуры нагрева частей электроприемника

Продолжительный режим работы электроприемника соответствует номинальной неизменной нагрузке, продолжающейся столь долго, что температура его частей достигает установившихся значений (рис. 2.4.). Установившейся температурой считается температура, изменение которой в течение 1 ч не превышает 1°C .

Кратковременный режим работы электроприемника (рис. 2.5) характеризуется тем, что он работает при номинальной мощности в течение времени, за которое его температура не успевает достичь установившейся. При отключении электроприемник длительно не работает, и его температура снижается до температуры окружающей среды.

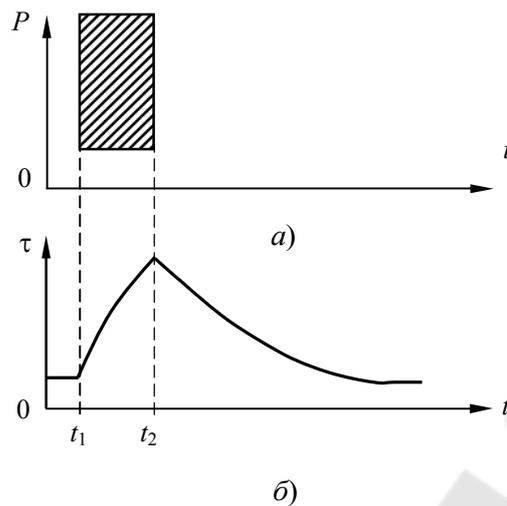


Рис. 2.5. Кратковременный режим работы электроприемника:

a – графики нагрузки;

b – изменения температуры нагрева частей электроприемника

Повторно-кратковременный режим работы электроприемника – это такой режим, при котором кратковременные рабочие периоды номинальной нагрузки чередуются с паузами (рис. 2.6).

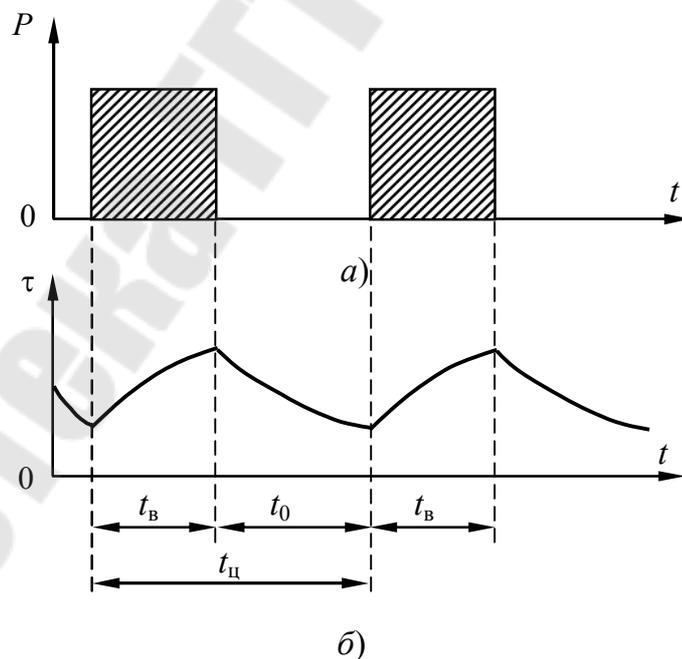


Рис. 2.6. Повторно-кратковременный режим работы электроприемника (ПКР):

a – графики нагрузки;

b – изменения температуры нагрева частей электроприемника

Продолжительность рабочих периодов и пауз не настолько велика, чтобы перегревы отдельных частей электроприемника при неизменной температуре окружающей среды могли достигнуть установленных значений. При повторно-кратковременном режиме работы электроприемник можно сильнее нагружать, чем при продолжительном номинальном режиме.

Повторно-кратковременный режим работы характеризуется продолжительностью включения (ПВ), равной отношению времени включения к времени всего цикла:

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{о}} + t_{\text{в}}} \cdot 100\% = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

где $t_{\text{о}}$ – продолжительность отключения (паузы).

Значение при ПКР не должно превышать 10 мин.

Электротехническая промышленность выпускает оборудование со стандартными значениями ПВ, равными 15, 25, 40 и 60 %.

Фактические значения ПВ в процессе работы изменяются в значительных пределах. Соотношение между мощностями и электроустановки, работающей в повторно-кратковременном режиме при соответствующих и имеет вид:

$$P_1 \sqrt{\text{ПВ}_1} = P_2 \sqrt{\text{ПВ}_2} = P_{\text{прод}} \quad (2.2)$$

где $P_{\text{прод}}$ – мощность, соответствующая продолжительному режиму работы (ПВ = 100%).

Электроприемники продолжительного режима характеризуются коэффициентом включения, о.е.:

$$k_{\text{в}} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{в}} + t_{\text{н}}} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{ц}}} \quad (2.3)$$

Величина при продолжительном режиме должна быть более 10 мин.

По виду изменения нагрузки, времени включения и пауз индивидуальные графики делятся на:

– периодические,

- циклические,
- нециклические,
- нерегулярные.

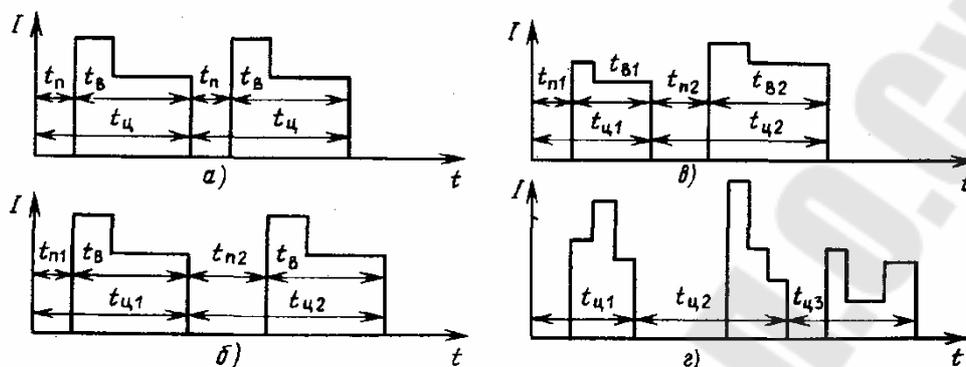


Рис. 2.7. Индивидуальные графики нагрузки различных типов

Периодические графики (рис. 2.7, а) отвечают строго ритмичному производству с одинаковыми токами и временами t_n , $t_с$, t_u за разные циклы. Такие графики имеют, например, отдельные станки в автоматических поточных линиях.

Циклические графики (рис. 2.7, б) характерны для электроприемников поточных линий, где имеются ручные операции, например, установка, подгонка деталей, их съем и т.д. Времена пауз t_n и циклов t_u у таких графиков за разные циклы неравны и изменяются по случайному закону.

Нециклические графики (рис. 2.7, в) имеют электроприемники, когда выполняемые ими операции строго не регламентированы, например, станки на ремонтных участках. В этом случае случайными являются все времена t_n , $t_с$ и t_u , меняется и величина нагрузки от цикла к циклу. При этом нециклический график, подобно периодическому и циклическому, характеризуется стабильностью потребления электроэнергии за среднее время цикла.

Нерегулярные графики (рис. 2.7, з) встречаются редко. Их имеют электроприемники, которые обслуживают технологические процессы с неустановившимся характером. При этом условие стабильности потребления электроэнергии уже не соблюдается. Например, электропривод для бурения скважин большой глубины будет создавать нерегулярный график нагрузки, так как твердость породы и ее толщина все время меняются.

2.3. Основные показатели графиков электрических нагрузок

Основными безразмерными показателями индивидуальных графиков нагрузки являются:

коэффициент загрузки k_z ;

коэффициент включения k_v ;

продолжительность включения $ПВ$;

коэффициент использования мощности k_u ;

коэффициент спроса k_c ;

коэффициент максимума k_{max} ;

коэффициент заполнения графика $k_{з.г}$;

коэффициент формы k_f .

Коэффициент загрузки для электроприемников с длительным режимом работы определяется по выражению:

$$k_z = p_{ср.в} / p_{ном} , \quad (2.4)$$

где $p_{ср.в}$ – средняя нагрузка электроприемника за время его включения в течение цикла работы.

Для электроприемников работающих в импульсном и повторно-кратковременном режимах, правильнее определять по выражению:

$$k_z = \frac{i_{ср.в}}{i_{пасп}} \cdot \frac{P_{ср.в}}{P_{пасп}} \cdot \frac{S_{ср.в}}{S_{пасп}} , \quad (2.5)$$

где $i_{пасп}$, $P_{пасп}$, $S_{пасп}$ – паспортные ток и мощности электроприемников;

$i_{ср.в}$, $P_{ср.в}$, $S_{ср.в}$ – средние ток и мощности за время включения.

Коэффициент загрузки электроприемников с импульсным и повторно-кратковременным режимами может достигать до трех, так как эти электроприемники часто работают с фактической продолжительностью включения, много меньшей паспортной.

Коэффициент загрузки является важной характеристикой режима работы электроприемника, которая влияет на его КПД, а также на

потери мощности и энергии. Знание этой характеристики необходимо также для расчета электрических нагрузок, показателей качества электроэнергии др. На величину влияет много факторов, поэтому для определения общих закономерностей изменения этого показателя необходимо применение теории вероятностей.

Коэффициент включения характеризует использование электроприемников по времени и определяется по выражению

$$k_{\epsilon} = \frac{t_{\epsilon}}{t_{\epsilon} + t_n} = \frac{t_{\epsilon}}{t_{\psi}}. \quad (2.6)$$

Продолжительность включения. Этот показатель применяется для характеристики использования по времени электроприемников повторно-кратковременного и импульсного режимов работы. Его величина определяется по формуле (2.1).

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\epsilon}}{t_o + t_{\epsilon}} \cdot 100\% = \frac{t_{\epsilon}}{t_{\psi}} \cdot 100\%. \quad (2.7)$$

Коэффициент использования характеризует использование электроприемника по мощности и по времени и определяется по выражению:

$$k_u = \frac{P_{\text{ср.ц}}}{P_{\text{ном}}} = k_z \quad k_{\epsilon} = \frac{W_{\psi}}{t_{\psi} P_{\text{ном}}}, \quad (2.8)$$

где $P_{\text{ср.ц}}$ – средняя нагрузка за цикл работы электроприемника;

W_{ψ} – потребление активной энергии электроприемником за цикл.

Коэффициент формы характеризует неравномерность графика нагрузки во времени за цикл и определяется по выражению:

$$k_{\phi} = \frac{P_{\text{ср.кв}}}{P_{\text{ср.ц}}}. \quad (2.9)$$

Наименьшее, равное единице значение k_{ϕ} принимает при неизменной во времени нагрузке.

Для групповых графиков нагрузки основными безразмерными показателями являются: коэффициент использования мощности K_u ,

коэффициент максимума K_{\max} и коэффициент заполнения графика $K_{з.з.}$, коэффициент формы графика K_{ϕ} , коэффициент спроса K_c .

Групповой коэффициент использования в действующих установках определяется по показаниям счетчиков за смену:

$$K_u = \frac{W_{\text{см}}}{t_{\text{см}} \sum_1^n P_{\text{ном}_i}}. \quad (2.10)$$

При проектировании групповой коэффициент использования можно определить через индивидуальные :

$$K_u = \frac{\sum_1^n k_{u_i} P_{\text{пасп}_i}}{\sum_1^n P_{\text{пасп}_i}}. \quad (2.11)$$

Коэффициент максимума определяется по выражению:

$$K_{\max} = \frac{P_p}{P_{\text{ср}}}, \quad (2.12)$$

где P_p – расчетный получасовой максимум нагрузки или P_{\max} .

Коэффициент заполнения графика определяется по выражению:

$$K_{з.з.} = \frac{1}{K_{\max}} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_p}. \quad (2.13)$$

Коэффициент спроса определяется по выражению:

$$K_{з.з.} = \frac{1}{K_{\max}} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_p}. \quad (2.14)$$

Значения для различных потребителей электроэнергии приводятся в справочной литературе.

Групповой коэффициент формы графика нагрузки:

$$K_{\phi} = \frac{P_{\text{ср.кв}}}{P_{\text{ср}}}. \quad (2.15)$$

Вспомогательными безразмерными величинами являются:

Коэффициент сменности по энергоиспользованию нагрузки $K_{эи}$;

Коэффициент разновременности максимумов (совмещение максимумов) $k_{p.max}$;

Коэффициент одновременности k_o ;

Коэффициенты дневного k_o и вечернего k_e ;

Коэффициент сезонности $k_{сез}$;

Коэффициент роста нагрузок k_p .

Коэффициент сменности по энергоиспользованию нагрузки

Величину расчетной нагрузки и все расчетные коэффициенты обычно определяют за наиболее загруженную смену. В другие смены нагрузки будут меньше, что необходимо учитывать при определении действительного расхода электроэнергии за год коэффициентом $K_{эи}$.

$$K_{эи} = \frac{W_z}{P_{см} T_z}, \quad (2.16)$$

где W_z – годовой расход электроэнергии; T_z – годовая продолжительность расхода электроэнергии.

Коэффициент разновременности максимумов (совмещение максимумов)

Если расчетная нагрузка узла P_Σ определяется суммированием расчетных нагрузок отдельных групп потребителей (P_{max}), то для учета разновременности максимумов отдельных групп с общим максимумом вводят коэффициент $K_{p.max}$:

$$K_{p.max} = \frac{P_\Sigma}{P_{max_i}}, \quad (2.17)$$

величина которого, в зависимости от рассматриваемого узла, лежит в пределах $0,8 \div 1,0$.

Коэффициент одновременности

Этот коэффициент используется при расчете электрических нагрузок сельских потребителей. При большом числе ЭП никогда не бывает, чтобы все они работали одновременно. Поэтому расчетную мощность группы однородных потребителей на вводе в помещение определяют как арифметическую сумму присоединенных мощностей ЭП, умноженную на коэффициент одновременности.

$$K_o \leq 1.$$

Коэффициенты дневного K_o и вечернего K_e

Коэффициенты дневного K_o и вечернего K_e представляют собой отношение соответственно расчетной дневной и вечерней нагрузки к максимальной из них.

Коэффициент сезонности $K_{сез}$

Это отношение максимума нагрузок данного сезона (K_z, K_v, K_l, K_o) соответственно зимнего, весеннего, летнего, осеннего к годовому максимуму.

Коэффициент роста нагрузок K_p представляет собой отношение расчетной нагрузки существующих подстанций 10/0,4 кВ на расчетный год к существующей нагрузке ТП в исходном году.

ТЕМА 3
РАСЧЕТНАЯ НАГРУЗКА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГИ

3.1. Расчетная нагрузка

Расчет ожидаемых электрических нагрузок является одним из основных этапов проектирования систем электроснабжения.

Правильное определение электрических нагрузок является важной задачей, так как способствует обоснованному выбору любого элемента системы электроснабжения с точки зрения допустимого нагрева.

Для характеристики графиков используют следующие величины:

- Номинальная мощность электроприемников;
- Расчетная нагрузка;
- Средняя нагрузка за время t ;
- Среднеквадратичная (эффективная) нагрузка;
- Пиковая нагрузка I_n (P_n).

Номинальная мощность электроприемников – величина, как правило, заранее известна. Номинальная мощность электроприемников всегда относится к длительному режиму их работы ($PВ = 100\%$).

Для электродвигателей номинальная мощность – это механическая мощность на валу $p_{ном}$, кВт. Номинальной мощностью плавильных электропечей, выпрямителей, преобразователей и сварочных машин является мощность питающих их трансформаторов $s_{ном}$, кВ·А.

Номинальной мощностью для печей сопротивления и осветительных электроприемников является мощность, потребляемая этими установками из сети, кВт.

Для электроприемников, работающих в ПКР, номинальная мощность определяется по выражениям:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{ном}} &= P_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{пасп}}}; \\
 S_{\text{ном}} &= S_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{пасп}}}; \\
 q_{\text{ном}} &= q_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}_{\text{пасп}}} \sin \varphi_{\text{ном}}.
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Номинальные токи определяют по выражениям:

$$i_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \eta_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}}; i_{\text{ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}}.
 \tag{3.2}$$

Групповые графики нагрузки создаются группами электроприемников и обозначаются прописными символами: $I(t)$, $P(t)$, $Q(t)$.

Графики электрической нагрузки отображают режим работы электроприемников и потребителей электроэнергии и характеризуются физическими величинами и безразмерными коэффициентами.

Расчетная нагрузка. Для каждого сечения проводников, кабелей и шин проводов в зависимости от условий их прокладки указывается неизменная во времени длительно допустимая по условиям их нагрева нагрузка $I_{\text{д.доп}}$. Для выбора сечения проводников по графику переменной нагрузки график необходимо сначала заменить эквивалентным по эффектам нагрева простейшим графиком

$$I = \text{const} = I_p,$$

где I_p и есть расчетная нагрузка для данного графика.

Следует различать две величины расчетной нагрузки:

I_{p1} – по максимуму температуры нагрева проводника;

I_{p2} – по тепловому износу его изоляции.

Расчетной нагрузкой по максимуму температуры нагрева называется такая неизменная во времени нагрузка I_{p1} , которая вызывает в проводнике тот же максимальный перегрев над окружающей температурой, что и заданная переменная нагрузка $I(t)$.

Расчетной нагрузкой по тепловому износу изоляции называется такая неизменная во времени нагрузка I_{p2} , которая вызывает в проводнике ту же величину теплового износа изоляции, что и заданная переменная нагрузка $I(t)$.

Расчетной нагрузкой I_p для данного графика $I(t)$ называется наибольшая из отвечающих ему величин I_{p1} и I_{p2} .

Из-за отсутствия в справочной литературе ряда показателей, необходимых для правильного расчета теплового износа изоляции разных видов на практике в качестве расчетной нагрузки принимается I_{p1} .

Расчетные активная P_p , реактивная Q_p и полная S_p мощности определяются по выражениям:

$$P_p = \sqrt{3} I_p U_{\text{ном}} \cos \varphi_p ; \quad (3.3)$$

$$Q_p = P_p \operatorname{tg} \varphi_p ; \quad (3.4)$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2} . \quad (3.5)$$

Из-за сложности определения расчетных $\cos \varphi_p$ и $\operatorname{tg} \varphi_p$ допускается их принимать равными средним:

$$\cos \varphi_p = \cos \varphi_{\text{cp}} ; \operatorname{tg} \varphi_p = \operatorname{tg} \varphi_{\text{cp}} . \quad (3.6)$$

Средние значения $\cos \varphi_p$ и $\operatorname{tg} \varphi_p$ определяются по справочным данным, полученным для характерных групп электроприемников.

Средняя нагрузка за время t представляет собой постоянную во времени нагрузку, обеспечивающую такой же расход электроэнергии, что и реальная изменяющаяся за это же время нагрузка.

Для действующих промышленных предприятий определяется по показаниям счетчиков электрической энергии по формулам:

$$P_{\text{cp}} = \frac{W_t}{t} ; Q_{\text{cp}} = \frac{V_t}{t} ; \quad (3.7)$$

$$S_{\text{cp}} = \sqrt{P_{\text{cp}}^2 + Q_{\text{cp}}^2} ; I_{\text{cp}} = \frac{S_{\text{cp}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}}} , \quad (3.8)$$

где W_t и V_t – активная и реактивная энергия соответственно за время t (цикл, смена, месяц, год).

При заданном графике нагрузки за время t средняя активная нагрузка определяется как:

$$P_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^m P_i \Delta t_i}{t}, \quad (3.9)$$

где P_i – усредненная за интервал времени Δt_i активная нагрузка; m – количество интервалов усреднения графика нагрузки.

Среднеквадратичная (эффективная) нагрузка за время t представляет собой постоянную во времени нагрузку, обеспечивающую такие же потери электроэнергии в элементах системы электроснабжения, что и реальная изменяющаяся за это же время нагрузка. При заданном графике нагрузки за время t определяется по выражению:

$$P_{\text{cp.кв}} = \frac{\sum_{i=1}^m P_i^2 \Delta t_i}{t} \quad (3.10)$$

Пиковая нагрузка I_n (P_n) представляет собой кратковременные максимальные значения графика нагрузки, которые необходимо знать для определения параметров срабатывания коммутационно-защитной аппаратуры. Пиковая нагрузка образуется при включении (пуске) электроприемников (электроприемники с электродвигателями и др.), а также при работе электроприемников с резкопеременной и импульсной нагрузкой и при совпадении времени работы таких электроприемников.

Пиковый ток:

$$I_{\text{пик}} = i_{n.\text{max}} + (I_p - k_u \cdot i_{n.\text{max}}), \quad (3.11)$$

где $i_{n.\text{max}}$ – наибольший из пусковых токов двигателей в группе;

I_p – максимальный ток группы электроприемников;

$i_{n.\text{max}}$ – номинальный ток электродвигателя с наибольшим пусковым током;

k_u – коэффициент использования мощности электродвигателя с наибольшим пусковым током.

В системе электроснабжения промышленного предприятия существует несколько характерных мест определения расчетных электрических нагрузок. Рассмотрим эти характерные места на схеме, изображенной на рис. 3.1.

1. Определение расчетной нагрузки, создаваемой одним приемником напряжением до 1000 В (нагрузка 1). Определение этой нагрузки необходимо для выбора сечения провода или кабеля, отходящего к данному приемнику, и аппарата, при помощи которого производится присоединение приемника к силовому распределительному шкафу или распределительной линии.

2. Определение расчетной нагрузки, создаваемой группой приемников напряжением до 1000 В (нагрузка 2). Определение данной нагрузки необходимо для выбора сечения радиальной линии или распределительной магистрали, питающих данную группу приемников, и аппарата, присоединяющего данную группу приемников к главному силовому распределительному шкафу или питающей магистрали в схеме блока трансформатор – магистраль.

3. Определение расчетной нагрузки, создаваемой на шинах низшего напряжения 0,69-0,4/0,23 кВ цеховой трансформаторной подстанции (ТП) отдельными крупными приемниками или силовыми распределительными шкафами, питающими отдельные приемники или группы приемников (нагрузка 3). Определение данной нагрузки необходимо для выбора сечения линий, отходящих от шин 0,69 или 0,4/0,23 кВ цеховой ТП и питающих указанные выше приемники и аппарата присоединения отходящих линий к шинам низшего напряжения цеховой ТП.

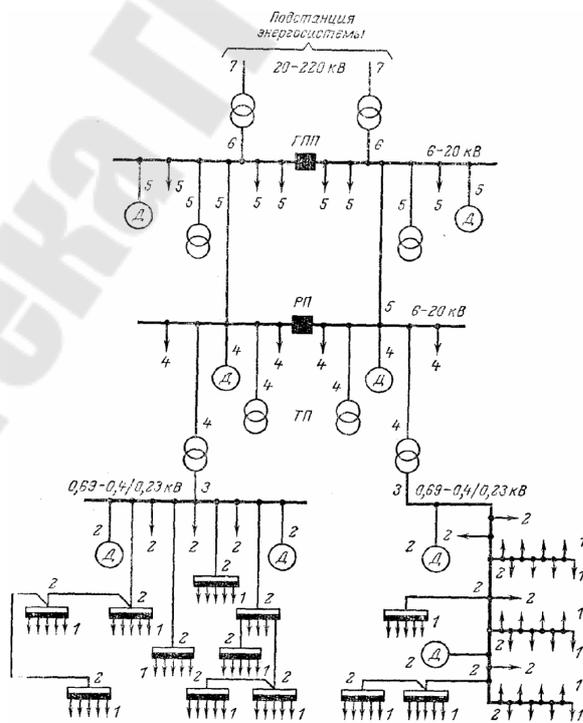


Рис. 3.1 Схема электроснабжения завода

4. Определение общей расчетной нагрузки на шинах низшего напряжения ТП или главной магистрали системы питания блока трансформатор – магистраль (нагрузка 4). Определение данной нагрузки необходимо для выбора числа и мощности цеховых трансформаторов, сечения и материала шин цеховой ТП или главной магистрали и отключающих аппаратов, устанавливаемых на стороне низшего напряжения цеховых трансформаторов.

5. Определение расчетной нагрузки, создаваемой на шинах 6-20 кВ распределительных пунктов РП отдельными приемками или отдельными цеховыми трансформаторами с учетом потерь в трансформаторах (нагрузка 5).

Определение данной нагрузки необходимо для выбора сечения проводов линий, отходящих от шин РП и питающих цеховые трансформаторы и приемники высокого напряжения, и отключающих аппаратов, устанавливаемых на этих линиях.

6. Определение общей расчетной нагрузки на шинах каждой секции РП (нагрузка 6). Определение данной нагрузки необходимо для выбора сечения и материала шин 6-20 кВ РП, сечения линий, питающих каждую из секций шин РП, и отключающей аппаратуры со стороны шин главной понизительной подстанции (ГПП)..

7. Определение общей расчетной нагрузки на шинах 6-20 кВ каждой секции ГПП (нагрузка 7). Определение данной нагрузки необходимо для выбора числа и мощности понизительных трансформаторов, устанавливаемых на ГПП, выбора сечения и материала шин ГПП и отключающих аппаратов, устанавливаемых на стороне низшего напряжения 6-20 кВ трансформаторов ГПП.

8. Определение расчетной нагрузки на стороне высшего напряжения 35-220 кВ трансформатора ГПП с учетом потерь в трансформаторе. Определение данной нагрузки необходимо для выбора сечения линий, питающих трансформаторы ГПП, и аппаратов присоединения трансформаторов и питающих их линий.

В зависимости от места определения расчетных нагрузок и стадии проектирования применяются методы их подсчета, более точные или упрощенные.

К основным методам определения расчетных электрических нагрузок относятся:

- метод упорядоченных диаграмм;
- статистический метод;
- метод коэффициента спроса.

Квспомогательным методам определения расчетных электрических нагрузок относятся:

- метод удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции или работы;
- метод удельной мощности на единицу площади;
- метод средней мощности и коэффициента формы.

3.2. Определение расчетной электрической нагрузки различными методами

3.2.1. Метод упорядоченных диаграмм

К основным методам определения расчетных электрических нагрузок относятся метод упорядоченных диаграмм, предложенный профессором Каяловым Г.М. Метод упорядоченных диаграмм используется, как правило, на стадии проектирования электроснабжения, когда неизвестны графики электрических нагрузок.

Сущность метода упорядоченных диаграмм заключается в установлении связи между расчетной мощностью нагрузки и показателями режима работы отдельных электроприемников. Эта зависимость получена на основании систематического применения кривых распределения или упорядоченных диаграмм для значений групповой нагрузки. Диаграммы определяются из опыта для наиболее загруженных смен каждого отдельного приемника электрической энергии. Расчет электрических нагрузок для сетей напряжением до 1 кВ производится для каждого узла питания (распределительного пункта, шкафа, сборки, распределительного шинпровода, щита станций управления, троллея, магистрального шинпровода, цеховой трансформаторной подстанции), а также по цеху, корпусу в целом.

Резервные электроприемники, ремонтные сварочные трансформаторы и другие ремонтные электроприемники, а также электроприемники, работающие кратковременно (пожарные насосы, задвижки, вентили и т. п.), при подсчете расчетной мощности не учитываются (за исключением случаев, когда мощности пожарных насосов и дру-

гих противоаварийных электроприемников определяют выбор элементов системы электроснабжения).

Для многодвигательных приводов учитывается наибольшая сумма номинальных мощностей одновременно работающих электродвигателей данного привода. Если в числе этих двигателей имеются одновременно включаемые (с идентичным режимом работы), то они учитываются в расчете как один электроприемник с номинальной мощностью, равной сумме номинальных мощностей одновременно работающих двигателей. Для электродвигателей с повторно-кратковременным режимом работы их номинальная (паспортная) мощность не приводится к длительному режиму (ПВ=100 %).

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

Согласно методу упорядоченных диаграмм активная расчетная нагрузка при количестве электроприемников в группе более трех определяется как:

$$P_p = K_p K_u P_{уст} \quad (3.12)$$

где $P_{уст}$ – установленная мощность группы электроприемников:

$$P_{уст} = \sum_1^n P_{пасп.i} \quad (3.13)$$

k_u – групповой коэффициент использования:

$$K_u = \frac{\sum_1^n P_{пасп.i} k_{иi}}{\sum_1^n P_{пасп.i}} \quad (3.14)$$

K_p – коэффициент расчетной активной мощности, зависит от эффективного числа электроприемников $n_{Э}$ и группового (средне-взвешенного) коэффициента использования $K_{и}$, а также от постоянной времени нагрева сети T_0 , на которую рассчитывается электрическая нагрузка:

$$K_p = f(K_u; n_s; T_o), \quad (3.15)$$

Эффективное количество электроприемников в группе:

$$n_s = \frac{(\sum p_{насп.i})^2}{\sum p_{насп.i}^2} = \frac{P_{усм}^2}{\sum p_{насп.i}^2} \quad (3.16)$$

При значительном количестве различных электроприемников в группе (при расчете электрических нагрузок для магистральных шинопроводов, на шинах цеховых трансформаторных подстанций, в целом по цеху, корпусу, предприятию) эффективное количество электроприемников допускается определять приближенно по выражению:

$$n_s = \frac{2 \sum_1^n p_{насп.макс.i}}{\sum p_{насп.i}}. \quad (3.17)$$

Для определения значений K_p существуют номограммы, в которых приняты следующие постоянные времени нагрева (приложение 2, таблицы П 2.1-2.3):

$T_0 = 10$ мин – для сетей напряжением до 1 кВ, питающих распределительные шинопроводы, пункты, сборки, щиты;

$T_0 = 2,5$ ч – для магистральных шинопроводов, вводно-распределительных устройств и цеховых трансформаторов;

$T_0 = 30$ мин – для кабелей напряжением 6 кВ и выше, питающих цеховые трансформаторные подстанции и распределительные устройства. Расчетная мощность нагрузки для этих элементов определяется при $K_p = 1$.

В случае, когда расчетная мощность P_p , определенная по выражению (3.12), окажется меньше номинальной наиболее мощного электроприемника в группе $p_{н.макс}$, следует принимать $P_p = p_{н.макс}$.

Для сетей напряжением до 1 кВ, питающих распределительные шинопроводы, пункты, сборки, щиты расчетная реактивная мощность нагрузки определяется по формуле:

$$Q_p = K_{м.р} \sum_1^n (k_{иi} p_{иi} \text{tg } i) K_{м.р} P_{см} \text{tg}, \quad (3.18)$$

где $K_{м.р}$ – коэффициент расчетной реактивной нагрузки. Для питающих сетей напряжением до 1 кВ определяется в зависимости от n_3 :

при $n_3 \leq 10$, $K_{м.р} = 1,1$;

при $n_3 > 10$, $K_{м.р} = 1$, (3.19)

$\text{tg } \varphi$ – средневзвешенный коэффициент реактивной мощности группы электроприемников:

$$\text{tg } \varphi = \frac{\sum_1^n P_{насп.i} \text{tg } i}{\sum_1^n P_{насп.i}}, \quad (3.20)$$

где $\text{tg } \varphi_i$ – справочное значение коэффициента реактивной мощности характерной категории электроприемников, к которой относится i -й электроприемник в группе.

Для магистральных шинопроводов, вводно-распределительных устройств и на шинах цеховых трансформаторных подстанций, а также при определении реактивной мощности нагрузки в целом по цеху, корпусу, предприятию, используется следующее выражение:

$$Q_p = K_p \sum_1^n (k_{иi} p_{иi} \text{tg } i) = K_p K_u P_{уст} \text{tg } \varphi = P_p \text{tg } \varphi. \quad (3.21)$$

Расчетный ток группы электроприемников:

$$I_p = \frac{\sqrt{P_p^2 + Q_p^2}}{\sqrt{3} U_n}. \quad (3.22)$$

Расчет электрических нагрузок на напряжении выше 1 кВ производится в целом аналогично. При этом в зависимости от числа присоединений к распределительному устройству высокого напряжения и группового коэффициента использования $K_{и}$, определяется значение коэффициента одновременности K_o .

Расчетная мощность нагрузки группы цехов и участков определяется по выражениям:

$$P_p = K_o \cdot \sum(k_{и.і} \cdot p_{н.і}); \quad (3.23)$$

$$Q_p = K_o \cdot \sum(k_{и.і} \cdot p_{н.і} \cdot \operatorname{tg} \varphi_i); \quad (3.24)$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}. \quad (3.25)$$

Результирующая расчетная нагрузка $S_{p.н.}$ на элементы источника электроснабжения предприятия (РП, ГПП, ПГВ) определяется с учетом нагрузки высоковольтных электроприемников P_{pi}^{BH} , реактивной мощности средств компенсации реактивной мощности Q_i^{ky} , потерь мощности в элементах внутриводского электроснабжения (цеховых трансформаторах ΔP_m , ΔQ_m и линиях электропередачи напряжением 6-10 кВ ΔP_l , ΔQ_l):

$$P_{p.н.} = K_o \left(\sum_1^n P_{pi}^{HH} + \sum_1^m P_{pi}^{BH} + \Delta P_m + \Delta P_l \right); \quad (3.26)$$

$$Q_{p.н.} = K_o \left(\sum_1^n Q_{pi}^{HH} + \sum_1^m Q_{pi}^{BH} + \Delta Q_m + \Delta Q_l - \sum_1^k Q_i^{ky} \right); \quad (3.27)$$

$$S_{p.н.} = \sqrt{P_{p.н.}^2 + Q_{p.н.}^2}. \quad (3.28)$$

3.2.2. Статистический метод

Статистический метод основан на анализе графика электрической нагрузки, получить который возможно при наличии системы учета параметров электропотребления. Поэтому метод используется при реконструкции действующих систем 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:

$$P = P_c \pm \beta \sigma, \quad (3.29)$$

где P_c – средняя нагрузка при достаточно большом количестве осреднений m продолжительностью $3 \cdot T_o$:

$$P_c = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_m}{m}, \quad (3.30)$$

σ – среднее квадратичное (стандартное) отклонение, определяемое по выражению:

$$\sigma = \sqrt{\dots} \quad (3.31)$$

P_1, P_2, \dots, P_m – средние значения нагрузки на каждом интервале осреднения продолжительностью $3 \cdot T_0$;

β – принятая кратность меры рассеяния ($\beta = -3 \dots +3$).

Придавая β различные значения, можно получить возможные значения нагрузки.

В теории вероятностей часто пользуются «трехсигмовой» вероятностью, т.е. вероятностью появления максимальной нагрузки:

$$P_{\max} = P_c + 3\sigma, \quad (3.32)$$

а также минимальной ее величины:

$$P_{\min} = P_c - 3\sigma. \quad (3.33)$$

Этим значениям нагрузки соответствуют предельные вероятности 0,0027 и 0,9973, которые крайне редки.

Чем меньше β , тем выше вероятность того, что реальная нагрузка превысит расчетную (табл. 3.1).

Поэтому важным моментом статистического метода является определение (обоснование) значения β .

Таблица 3.1

Вероятность превышения рассчитанной нагрузки

| | | | | | | | | | | | | |
|---------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| β | -3 | -2,5 | -2 | -1,5 | -1 | -0,5 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 |
| P | 0,9973 | 0,995 | 0,975 | 0,935 | 0,84 | 0,69 | 0,31 | 0,16 | 0,065 | 0,025 | 0,005 | 0,0027 |

Таким образом, максимальная (расчетная) нагрузка определяется по выражению:

$$P_{\max} = P_c + \beta\sigma. \quad (3.34)$$

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

$$P_{\max} = P_c + 2,5\sigma. \quad (3.35)$$

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:

$$P_{\max} = P_c + 1,65\sigma. \quad (3.36)$$

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

Формула (3.34) лежит в основе определения расчетной нагрузки статистическим методом по фактическому (действительному) графику нагрузки.

3.2.3. Метод коэффициента спроса

Данный метод рекомендуется применять при отсутствии конкретных данных об электроприемниках, наличии суммарной установленной мощности электроприемников, и общего характерного режима их работы.

Расчетную нагрузку группы однородных по режиму работы электроприемников определяют по формулам:

$$P_p = K_c P_n ; \quad (3.37)$$

$$Q_p = P_p \operatorname{tg}, \quad (3.38)$$

где K_c и tg принимаются для характерной группы электроприемников по справочным материалам.

Основной недостаток данного метода состоит в том, что величина коэффициента спроса принимается постоянной. Такое допущение возможно только при высоких значениях коэффициентов использования и эффективного числа электроприемников.

3.2.4. Метод удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции или работы

Метод удельного расхода электроэнергии рекомендуется применять при достаточно устойчивых значениях ω_y и наличии соответствующей базы данных об электропотреблении (удельных норм расхода электроэнергии).

Согласно этому методу расчетная нагрузка определяется по формулам:

$$P_p = P_c = \frac{\Pi \omega_y}{T}; \quad (3.39)$$

$$Q_p = P_p \operatorname{tg}, \quad (3.40)$$

где Π – количество продукции (или объем работы), выпускаемой (или выполняемой) за время T ;

ω_y – удельный расход электроэнергии на единицу выпускаемой продукции или выполняемой работы;

tg – средневзвешенное значение коэффициента реактивной мощности:

$$\operatorname{tg} = \frac{V_m}{W_m}, \quad (3.41)$$

где V_m, W_m – расходы соответственно реактивной и активной энергии за время T .

3.2.5. Метод удельной мощности на единицу площади

Расчетная нагрузка по данному методу определяется по одной из следующих формул:

$$P_p = p_{\text{уд.р}} F; \quad (3.42)$$

$$P_p = p_{\text{уд.уст}} FK_c; \quad (3.43)$$

$$Q_p = P_p \operatorname{tg} \varphi, \quad (3.44)$$

где $p_{\text{уд.р}}$ – удельная расчетная активная мощность на единицу площади, кВт/м²;

$p_{\text{уд.уст}}$ – удельная установленная активная мощность на единицу площади, кВт/м²;

F – площадь размещения электроприемников, м².

Этот метод рекомендуется применять при относительно равномерном распределении электроприемников по площади помещения. Наиболее точные результаты получаются при большом количестве электроприемников и малой их мощности.

3.2.6 Метод средней мощности и коэффициента формы

В основе метода лежит равенство расчетной и среднеквадратичной нагрузок.

Для групп приемников с повторно-кратковременным режимом работы – во всех случаях.

Для приемников с длительным режимом работы – когда число приемников достаточно велико и отсутствуют мощные приемники, способные изменить равномерный групповой график нагрузок.

Данный метод можно применять для определения расчетных нагрузок цеховых шинопроводов, на шинах низшего напряжения цеховых трансформаторных подстанций, на шинах РУ напряжением 10 кВ, когда значения коэффициента формы находится в пределах 1 – 1,2.

Расчетная нагрузка группы приемников определяется из выражений

$$P_p = K_{\text{ф.а}} P_{\text{ср.макс}}; \quad (3.45)$$

$$Q_p = K_{\text{ф.р}} Q_{\text{ср.макс}}; \quad (3.46)$$

$$Q_p = P_p \operatorname{tg} \varphi. \quad (3.47)$$

Средние нагрузки за наиболее загруженную смену $P_{\text{ср.маx}}$ и $Q_{\text{ср.маx}}$ определяются любым из способов.

ТЕМА 4

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ до 1кВ

Под расчетом электрических сетей понимается выбор сечений проводников, шинопроводов, электротехнических устройств и расчет защиты их от аномальных режимов.

Основными защитами электроприемников и электрических сетей напряжением до 1кВ являются защиты от токов КЗ и перегрузки.

Защита от токов КЗ должна осуществляться для всех электрических сетей и электроприемников. От перегрузки должны быть защищены следующие электрические сети:

- выполненные открыто проводниками с горючей наружной оболочкой или изоляцией;

- осветительные сети в жилых и общественных зданиях, служебно-бытовых помещениях промышленных предприятий, включая сети бытовых и переносных электроприемников, а также в пожароопасных зонах;

- силовые сети, у которых по условиям технологического процесса может возникать длительная перегрузка проводников;

- всех видов во взрывоопасных зонах.

В качестве аппаратов защиты применяются автоматические выключатели, предохранители и тепловые реле.

Выбор аппаратов защиты (предохранителей, автоматов) выполняется с учетом следующих основных требований:

- номинальный ток и напряжение аппарата защиты должны соответствовать расчетному длительному току и напряжению электрической цепи;

- номинальные токи расцепителей автоматических выключателей и плавких вставок предохранителей необходимо выбирать по возможности меньшими по длительным расчетным токам с округлением до ближайшего большего стандартного значения;

- аппараты защиты не должны отключить установку при кратковременных перегрузках, возникающих в условиях нормальной работы, например, при пусках электродвигателей;

- время действия аппаратов защит должно быть по возможности меньшим; должна быть обеспечена селективность (избирательность) действия защиты при смежном (последовательном) расположении аппаратов защит в электрической сети;

– защитный аппарат (номинальный ток плавкой вставки, номинальный ток или ток срабатывания расцепителя автомата) должен быть согласован с допустимым током защищаемого проводника;

– аппараты защиты должны обеспечивать надежное отключение в конце защищаемого участка двух- и трехфазных КЗ при всех видах режима работы нейтрали сетей, а также однофазных КЗ в сетях с глухозаземленной нейтралью.

Надежное отключение токов КЗ в сети напряжением до 1кВ обеспечивается в том случае, если отношение наименьшего однофазного расчетного тока КЗ ($I_{\text{кз}}$) к номинальному току плавкой вставки предохранителя ($I_{\text{н.вст}}$) или расцепителя автоматического выключателя ($I_{\text{н.р}}$), имеющего обратозависимую от тока характеристику, будет не менее 3, а во взрывоопасных зонах соответственно:

$$\frac{I'_{\text{кз}}}{I_{\text{н.вст}}} \geq 4; \frac{I'_{\text{кз}}}{I_{\text{н.р}}} \geq 6. \quad (4.1)$$

При защите сетей автоматическими выключателями имеющими только электромагнитный расцепитель (отсечку), для автоматов с номинальным током до 100А кратность тока КЗ относительно уставки тока мгновенного срабатывания ($I_{\text{ср.р}}$) должна быть не менее 1,4, а для автоматов с номинальным током более 100А – не менее 1,25.

Однако в сетях, защищаемых только от токов КЗ (не требующих защиты от перегрузки), за исключением протяженных сетей, допускается не выполнять расчетной проверки кратности токов КЗ токами защитных аппаратов.

Номинальный ток плавкой вставки предохранителя выбирается по следующим условиям:

$$I_{\text{н.вст}} \geq I_p; \quad (4.2)$$

$$I_{\text{н.вст}} \geq \frac{I_n}{\alpha}, \quad (4.3)$$

где I_p – расчетный ток, для одиночного электроприемника за расчетный ток принимается его номинальный ток i_H ;

I_n – максимальный пиковый (кратковременный) ток, для однократного электроприемника это его пусковой ток $i_{\text{пуск}}$.

α – коэффициент кратковременной тепловой перегрузки; $\alpha = 2,5$ – для легких пусков с длительностью пуска до 5с, а также при редких пусках (насосы, вентиляторы, станки и т. п.) и при защите магистральной; $\alpha = 2$ – для тяжелых условий пуска, а также при частых (более 15 раз в час) пусках (краны, дробилки, центрифуги и т.п.); $\alpha = 1,6$ – для ответственных электроприемников.

Номинальный ток плавкой вставки предохранителя, защищающего ответвление к сварочному аппарату, выбирается из соотношения

$$I_{n.\text{вст}} = 1,2i_{n.c} \sqrt{\text{ПВ}}, \quad (4.4)$$

где $i_{n.c}$ – номинальный ток сварочного аппарата при паспортной продолжительности включения (ПВ).

Выбранные для электрической сети плавкие вставки должны обеспечивать также селективность (избирательность) срабатывания. Это означает, что при КЗ на каком-либо участке сети должна перегореть плавкая вставка предохранителя около этого поврежденного участка. Для обеспечения селективности срабатывания каждый предохранитель в сети по мере приближения к ИП должен иметь плавкую вставку не менее, чем на две ступени выше предыдущего.

Номинальный ток расцепителя автомата выбирается по длительному расчетному току линии:

$$I_{n.p} = I_p. \quad (4.5)$$

Ток срабатывания (отсечки) электромагнитного или комбинированного расцепителя ($I_{\text{ср.э}}$) проверяется по пиковому кратковременному току линии:

$$I_{\text{ср.э}} = K_H I_n, \quad (4.6)$$

где K_H – коэффициент надежности отстройки отсечки от пикового тока, принимается в зависимости от типа автомата. При отсутствии таких данных можно принять $K_H = 1,25 \dots 1,5$.

Селективность между последовательно включенными автоматами обеспечивается разницей номинальных токов и расцепителей не менее, чем на одну ступень.

Номинальные токи тепловых реле выбирают по длительному расчетному току:

$$I_{н.т} = I_p. \quad (4.7)$$

Провода, кабели и шинопроводы должны выдерживать допустимый нагрев длительным расчетом током в нормальном (I_p) и в послеаварийном ($I_{ав}$) режимах работы, потеря напряжения в них (ΔU) не должна превышать допустимых значений ($\Delta U_{доп}$). Кроме этого, допустимый ток выбранного проводника должен соответствовать току аппарата, защищающего этот проводник по условиям нагрева токами перегрузки и КЗ.

Сети, имеющие числа часов использования максимума нагрузки (T_m) более 5000 ч (кроме ответвлений к отдельным электроприемникам и осветительных сетей) могут рассчитываться по экономической плотности тока.

Шинопроводы, кроме этого, должны обладать электродинамической стойкостью к токам КЗ.

Минимальные сечения жил проводников определяются требованиями механической прочности. Так, например, минимальные сечения алюминиевых жил проводников для присоединения питающих линий должны быть не менее 4 мм² для алюминия и для питания электроприемников медными проводниками – не менее 2,5 мм².

Таким образом, основными расчетами цеховых электрических сетей, определяющими выбор сечений их проводников, являются расчет по допустимому нагреву и расчет по допустимой потере напряжения (применительно к осветительным электрическим сетям расчет по допустимой потере напряжения называется расчетом по минимуму затрат на проводниковый материал).

В связи с действующими в настоящее время нормативными документами, разработанными на основе международного стандарта МЭК 364 «Электрические установки зданий» установлены ряд обязательных требований к выбору сечений нулевых рабочих (N), совмещенных нулевых рабочих и защитных (PEN) и защитных (PE) проводников.

Для однофазных, а также трехфазных сетей при питании по ним однофазных нагрузок сечение нулевого рабочего N-проводника во всех случаях принимается равным сечению фазных проводников. Для варианта питания трехфазных симметричных нагрузок (в т. ч. и многоламповых светильников, включаемых в трехфазную сеть) нулевой рабочий N-проводник должен иметь сечение, равное сечению фазных проводников, если те имеют сечение до 16 мм² по меди или до 25 мм² по алюминию. При больших сечениях фазных проводников он может иметь сечение, составляющее не менее 50 % сечения фазных проводников, при этом N-проводник должен отключаться, как и фазные проводники от сверхтока.

Сечение защитного РЕ-проводника должно равняться:

- сечению фазных проводников при сечении последних до 16 мм²;
- 16 мм² при сечении фазных проводников от 16 до 35 мм²;
- не менее 50% сечения фазных проводников при больших сечениях последних.

Для совмещенного PEN-проводника можно принимать его сечение равным 10 мм² и выше по меди и 16 мм² и выше по алюминию, при этом сечение PEN-проводника должно быть не менее требуемого сечения N-проводника.

Для выбора сечения проводника по условиям нагрева токами нагрузки сравниваются расчетный I_p и допустимый $I_{доп}$ токи проводника (проводов, кабелей и шин) принятой марки с учетом условий его прокладки.

Должно соблюдаться следующее соотношение:

$$I_{доп} \geq \frac{I_p}{K_n}, \quad (4.8)$$

где I_p – расчетный ток длительного режима работы:

$I_p = i_n$ – для одиночного электроприемника длительного режима работы (i_n – номинальный ток);

$$I_p = \frac{i_{ПВ} \sqrt{ПВ}}{0,875} \quad - \quad \text{для электроприемника с повторно-}$$

кратковременным (ПКР) или кратковременном (КР) режимах работы с общей длительностью цикла до 10 мин и длительностью рабочего

периода не более 4 мин (ПВ = 0,4), а также для КР с длительностью включения не более 4 мин и перерывами между включениями, достаточными для охлаждения проводников до температуры окружающей среды для медных проводников сечением более 6 мм², а для алюминиевых проводников более 10 мм² (или допустимый ток умножить на коэффициент $\frac{0,875}{\sqrt{\text{ПВ}}}$). При длительности включения более 4 мин, а также при перерывах недостаточной длительности между включениями наибольшие допустимые токи следует принимать как для установок с длительным режимом работы;

0,875 – коэффициент запаса;

ПВ – продолжительность включения в о.е.;

$i_{\text{пв}}$ – номинальный ток электроприемника ПКР работы;

$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3}U_n}$ – расчетный ток группы электроприемников;

K_n – поправочный коэффициент, корректирующий допустимый ток на температурные условия окружающей среды, в которой прокладывается проводник (справочная величина).

Во взрывоопасных помещениях сечения проводников для ответвлений к электродвигателям с короткозамкнутым ротором принимаются исходя из условия

$$I_{\text{доп}} = \frac{1,25 i_n}{K_n} \quad (4.9)$$

Выбранный проводник согласовывается с защищаемым аппаратом:

$$I_{\text{доп}} = \frac{K_z I_z}{K_n}, \quad (4.10)$$

где K_z – коэффициент защиты, представляющий собой кратность длительно допустимого тока проводника к току защитного аппарата; I_z – ток защитного аппарата (номинальный ток плавкой вставки или расцепителя автомата, или ток срабатывания защитного аппарата).

Определение расхода электроэнергии электроприемником потребителем является одним из важнейших показателей работы пред-

приятия, зависевший от величины потребляемой мощности и продолжительностью работы оборудования.

Расчет расхода электроэнергии определяется за разные периоды времени: год, квартал, месяц, сутки, смена и др.

Так как нагрузка в течении времени изменяется по мощности и во времени расход активной электроэнергии электроприемника за время t (W_t) может быть определен по следующей формуле

$$W_t = p_{срt} t = k_{иt} p_n t = k_{з.в} k_{в.т} p_n t, \quad (4.11)$$

где p_n – номинальная активная мощность электроприемника;

$p_{срt}$ – средняя активная мощность электроприемника за время t ;

$k_{иt}$ – коэффициент использования активной мощности (электроприемника по активной мощности) за время t ;

$k_{з.в}$ – коэффициент загрузки электроприемника по активной мощности за время включения;

$k_{в.т}$ – коэффициент включения электроприемника за время t .

В частных случаях: если приемник в течении времени t работает с постоянной номинальной нагрузкой, то расход электроэнергии за это время определяется по формуле:

$$W_t = p_n t, \quad (4.12)$$

если приемник в течении времени включения $t_в$ работает со средним коэффициентом загрузки $k_{з.в}$, то расход электроэнергии за время включения можно определить по следующей формуле

$$W_{t_в} = k_{з.в} p_n t_в. \quad (4.13)$$

За наиболее загруженную смену расход электроэнергии ($W_{см}$) можно определить по справочному значению коэффициента использования $k_{и}$

$$W_{см} = k_{и} p_n t_{см}, \quad (4.14)$$

где $t_{см}$ – продолжительность смены.

Расход электроэнергии группой электроприемников определяется по групповым параметрам электроприемников и их режимам работы:

$$P_n = \sum_1^n P_{n_i}; \quad K_u = \frac{\sum_1^n k_{u_i} P_{n_i}}{\sum_1^n P_{n_i}} = \frac{P_{cm}}{P_n};$$

$$K_e = \frac{\sum_1^n k_{e_i} P_{n_i}}{\sum_1^n P_{n_i}}; \quad K_{3.6} = \frac{\sum_1^n k_{3.6_i} P_{n_i}}{\sum_1^n P_{n_i}} = \frac{P_{cm.6}}{P_n},$$

где n – количество электроприемников в группе;

$P_{cm}, P_{cm.6}$ – групповые средние нагрузки соответственно за наиболее загруженную смену и за время включения.

При определении годового расхода активной энергии формула (4.8) принимает следующий вид:

$$W_z = P_{cm} T_z = K_{ин} P_n T_z = \alpha K_u P_n T_z = \alpha P_{cm} T_z, \quad (4.15)$$

где P_{cm} – среднегодовая активная мощность;

T_z – годовое число часов работы потребителя;

α – коэффициент сменности по энергоиспользованию.

Если значение коэффициента сменности по энергоиспользованию неизвестно, но имеются данные об относительной загрузке рабочих смен, то годовой расход активной энергии может быть рассчитан по следующей формуле:

$$W_r = P_{cm} (T_1 + \beta_2 T_2 + \beta_3 T_3 + \beta_4 T_4) c, \quad (4.16)$$

где T_1, T_2, T_3, T_4 – годовой фонд рабочего времени соответственно первой, второй, третьей и четвертой смен;

$\beta_2, \beta_3, \beta_4$ – коэффициенты, учитывающие степень загрузки соответственно второй, третьей и четвертой смен, представляющие собой отношения расчетных максимумов нагрузок отдельных менее загруженных смен к максимуму наиболее загруженной первой смены;

$c = c_1 + c_2$ – коэффициент, учитывающий работу в выходные и праздничные дни ($c_1 = 1...1,05$) и месячные колебания нагрузки ($c_2 = 0,8...0,9$).

Для ориентировочных расчетов годовой расход активной электроэнергии можно определить по годовому числу часов использования максимума активной нагрузки силовой или общей (T_{max}) или осветительной (T_{maxo}) по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
 W_z &= P_p T_{\max}; \\
 W_{\text{го}} &= P_{\text{по}} T_{\text{maxo}} = K_{\text{co}} P_{\text{н}} T_{\text{maxo}},
 \end{aligned}
 \tag{4.17}$$

где $P_p, P_{\text{по}}$ – расчетная нагрузка, соответственно общая (силовая и осветительная) и осветительная;

K_{co} – коэффициент спроса для осветительных установок.

Если имеются данные по удельным нормам расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции или выполняемой работы ($\omega_{\text{уд}}$) расход электроэнергии W_t на производство продукции или выполняемую работу Π_t за время t может быть определен по формуле:

$$W_t = \omega_{\text{уд}} \Pi_t. \tag{4.18}$$

Расход реактивной энергии электроприемником или группой электроприемников (потребителей) определяется по аналогичным формулам, либо по выражению:

$$V_t = W_t \text{tg}_{c.t}, \tag{4.19}$$

где V_t – расход реактивной энергии за время t ;

W_t – расход активной энергии за время t ;

$\text{tg}_{c.t}$ – средневзвешенное значение коэффициента реактивной мощности за время t .

ТЕМА 5 ПОТЕРИ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕМЕНТАХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В энергетических системах при транспортировке и трансформации теряется около 10–15 % электрической энергии. Основные потери электрической энергии в системах электроснабжения имеют место в линиях электропередачи и трансформаторах.

Существуют несколько способов определения потерь мощности и энергии в линиях.

1. *Определение потерь мощности и энергии в линиях по средней (среднеквадратичной) нагрузке:*

$$\Delta P_{\text{л}} = 3 I_{\text{с}}^2 R_{\text{л}} \quad (5.1)$$

где $I_{\text{с}}$, $S_{\text{с}}$ – средний ток и средняя мощность линии;

$K_{\text{ф.г.}}$ – коэффициент формы графика нагрузки;

R – активное сопротивление линии системы электроснабжения;

$S_{\text{ск}}$ – среднеквадратичная нагрузка линии.

В данном случае потери электрической энергии определяются по выражению:

$$\Delta W = \Delta P T, \quad (5.2)$$

где T – продолжительность работы линии, за которую определяются потери электроэнергии.

2. *Определение потерь мощности и энергии в линиях по максимальной мощности нагрузки (метод времени максимальных потерь):*

Потери мощности определяются в режиме максимальных нагрузок:

$$\Delta P_{\text{м.л.}} = 3 I_{\text{м.л.}}^2 R_{\text{л}} = \left(\frac{S_{\text{м.л.}}}{U_{\text{н}}} \right)^2 R_{\text{л}}, \quad (5.3)$$

где $I_{\text{м.л.}}$, $S_{\text{м.л.}}$ – максимальные ток и мощность нагрузки линии.

Потери электрической энергии здесь определяются по следующему выражению:

$$\Delta W_{л} = \Delta P_{м.л.} \tau, \quad (5.4)$$

где τ – время максимальных потерь.

Время максимальных потерь τ это время, в течение которого теряется столько же энергии при работе с максимальной нагрузкой, сколько за время работы потребителя по реальному графику. Исходя из этого определения время максимальных потерь τ может быть рассчитано за любой промежуток времени T по следующему аналитическому выражению:

$$\tau = \left(\frac{P_{ск}}{P_{м}} \right)^2 T = . \quad (5.5)$$

Время максимальных потерь при $\cos \varphi = 0,8$ может также определяться по эмпирическому выражению:

$$\tau = \quad (5.6)$$

где $T_{м}$ – время использования максимальной нагрузки, – время, в течение которого потребитель израсходует столько же энергии при работе с максимальной нагрузкой, сколько и при работе с реальной нагрузкой за годовой фонд рабочего времени:

$$T_{м} = K_{з.г.} T_{г}. \quad (5.7)$$

Потери мощности в трансформаторах определяются по следующим выражениям:

$$\Delta P_{м} = \frac{1}{n} k_{з}^2 \Delta P_{кз} + n \Delta P_{хх} = \frac{1}{n} \quad (5.8)$$

$$\Delta Q_{T} = \frac{S_{HT}}{100} (i_{хх} + k_{з}^2 \Delta U_{кз}) = \frac{U_k S^2}{100 n S_{HT}} + \Delta Q_{хх} n \quad (5.9)$$

Потери активной электроэнергии в трансформаторах рассчитываются по формуле:

$$\Delta W_{м} = \frac{1}{n}, \quad (5.10)$$

где $T_{г}$ – продолжительность работы трансформаторов (ч) в течение года.

Определение диапазона нагрузки потребителя, при которых целесообразна работа одного (двух) трансформаторов выполняется, исходя из равенства:

$$\left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \Delta P_{кз} + \Delta P_{xx} = \frac{1}{2} \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 \Delta P_{кз} + 2\Delta P_{xx} \quad (5.11)$$

$$S_2 = S_{нт} \sqrt{\frac{2\Delta P_{xx}}{\Delta P_{кз}}}, \quad (5.12)$$

где S_r – граничная мощность нагрузки потребителя электроэнергии.

При $S > S_2$ целесообразна работа 2-х трансформаторов, если же $S < S_2$, то следует использовать в работе один трансформатор.

В общем случае, при количестве трансформаторов n , S_r определяется как:

$$S_2 = S_{нт} \sqrt{\frac{n(n-1)\Delta P_{xx}}{\Delta P_{кз}}}. \quad (5.13)$$

При оптимизации загрузки трансформаторов нагрузки потребителя перераспределяются таким образом, чтобы КПД установленных трансформаторов был максимальным, при этом выполняется следующее условия:

$$\Delta P_m = \Delta P_c, \quad (5.14)$$

где ΔP_m – потери мощности в обмотках трансформатора (так называемые потери «в меди»);

$\Delta P_{ст}$ – потери мощности в магнитопроводе трансформатора (потери «в стали»).

Таким образом, выражение (5.14) может быть представлено в виде уравнения:

$$\frac{1}{n} \left(\frac{S_o}{S_{нт}}\right)^2 \Delta P_{кз} = n \Delta P_{xx}, \quad (5.15)$$

где S_o – нагрузка трансформаторов, при которой их КПД максимален;

$$S_0 = nS_{\text{HT}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{XX}}}{\Delta P_{\text{КЗ}}}}. \quad (5.16)$$

При использовании конденсаторных установок для компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения потребителей, следует учитывать потери активной мощности $\Delta P_{\text{ку}}$ и активной электроэнергии $\Delta W_{\text{ку}}$ в них:

$$\Delta P_{\text{ку}} = \Delta P_{\text{уд}} Q_{\text{ку}} \quad (5.17)$$

$$\Delta W_{\text{ку}} = \Delta P_{\text{ку}} T_{\text{вкл.}}, \quad (5.18)$$

где $\Delta P_{\text{уд}}$ – удельные потери активной мощности в конденсаторных установках, на практике принимаются $\Delta P_{\text{уд}} = 0,004$ кВт/квар для конденсаторных установок напряжением до 1 кВ и $\Delta P_{\text{уд}} = 0,002$ кВт/квар для конденсаторных установок напряжением свыше 1 кВ;

$T_{\text{вкл.}}$ – продолжительность работы конденсаторных установок.

При отсутствии сведений о схеме электроснабжения и ее параметров при определении расчетной нагрузки вспомогательными методами потери мощности в линиях и трансформаторах допускается учитывать приближенно используя следующие выражения.

Потери в трансформаторах:

$$\Delta P_m = 0,025 S_{p.m.\Sigma}; \quad \Delta Q_m = 0,1 S_{p.m.\Sigma}, \quad (5.17)$$

где $S_{p.m.\Sigma}$ – суммарная расчетная мощность нагрузки трансформаторов.

Потери в линиях электропередачи:

$$\Delta P_l = (0,03 \dots 0,035) S_{p.l.\Sigma}; \quad \Delta Q_l = 0, \quad (5.18)$$

где $S_{p.l.\Sigma}$ – суммарная расчетная мощность нагрузки линий.

ТЕМА 6

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ ОРГАНИЗАЦИЙ

Система электроснабжения (СЭС) должна быть экономична, иметь наименьший расход топливно-энергетических ресурсов. Обеспечение этого требования ведет к необходимости снижения электрических потерь (составляют до 20%) во всех элементах передачи электроэнергии от электростанции до конкретного потребителя.

Различают потери, вызванные паспортными характеристиками оборудования и передающих сетей, от дополнительных, обусловленных целым рядом причин, появляющихся в процессе эксплуатации.

Часть таких потерь может быть ликвидирована на стадии проектирования систем электроснабжения, но большая часть - в налаживании рациональной эксплуатации.

В период проектирования систем электроснабжения, имея исходные данные и учитывая электромагнитную совместимость различных приемников, следует правильно выбрать значение питающего напряжения, обеспечить качество электроэнергии в соответствии с нормативами, разделить постоянную и резкопеременную нагрузку.

Правильным выбором сечений и материалов линий электропередач, количества и мощности трансформаторов на всех подстанциях, применением устройств для компенсации реактивной мощности можно значительно уменьшить потери электроэнергии при ее транспортировке от электростанции до конкретной технологической установки.

Выбор для внешних и внутренних электрических сетей предприятий повышенных напряжений (вместо 0,22 кВ – 0,4 кВ, вместо 6 кВ или 10 кВ - 35 кВ, вместо 35 кВ – 110 кВ) сокращает потери электроэнергии пропорционально квадрату отношения значения напряжения низшего к высшему.

Уровень напряжения каждой ступени системы электроснабжения должен выбираться на основании технико-экономического расчета.

Включение в работу резервных ЛЭП снижает потери электроэнергии пропорционально уменьшению омического сопротивления ЛЭП.

Например, если предприятие питается по одной линии электропередачи, а резервная ЛЭП отключена или находится под напряжением

ем без нагрузки, то включение ее (по соответствующей схеме) снизит потери в питающих линиях в два раза (если значения протяженности, площади сечения и нагрузки основной и резервной ЛЭП равны).

При проектировании систем электроснабжения следует стремиться к минимально необходимому числу трансформаций, т.к. при каждой трансформации теряется 2 - 3 % от переданной электроэнергии.

Число силовых трансформаторов, устанавливаемых на подстанциях, определяется в первую очередь условиями надежности электроснабжения. Целесообразность использования схемы с одним или двумя трансформаторами определяется технико-экономическими расчетами.

Обеспечению энергосбережения и управления энергопотреблением также способствует организация учета электроэнергии с помощью счетчиков электрической энергии и информационно-измерительных систем.

Для повышения эффективности учета электроэнергии в электроустановках обычно применяются автоматизированные системы учета и контроля электроэнергии (АСКУЭ). Внедрение подобных систем относится к малозатратным или средnezатратным мероприятиям со сроком окупаемости до одного года.

Обеспечение эффективности системы электроснабжения при эксплуатации

Изменения во времени передаваемой трансформаторами электрической мощности выражаются графиком нагрузки за рассматриваемый период (сутки, месяц, год или даже весь срок службы трансформатора). Одним из способов снижения потерь электрической энергии является выравнивание графика электрической нагрузки.

Повышение коэффициента загрузки трансформатора более 0,6 удельные приведенные затраты уменьшаются. Таким образом, повышение загрузки у эксплуатируемых трансформаторов и их выбор с учетом оптимальных коэффициентов загрузки позволит уменьшить затраты электроэнергии.

Отключение силовых трансформаторов на нерабочие сутки и смены уменьшает потери электроэнергии в трансформаторах ввиду уменьшения потерь холостого хода, а также повышает коэффициент мощности благодаря уменьшению потребления реактивной мощности.

Компенсация реактивной мощности

Большинство промышленных предприятий являются крупными потребителями реактивной мощности. Одним потребителям она нужна для нормальной работы асинхронных двигателей, другие имеют значительные индуктивные сопротивления (дуговые сталеплавильные печи) своих токоподводов, что также заставляет передавать по системам электроснабжения значительные реактивные мощности.

Потери активной мощности, вызванные необходимостью передачи реактивной мощности, требуют дополнительных затрат на увеличение площади сечения проводников, мощностей трансформаторов, создают дополнительные потери электроэнергии, требуют установки дополнительных мощностей генераторов на электростанциях.

Особенность выработки реактивной мощности позволяет размещать генераторы реактивной мощности в любой точке энергосистемы и не связывать их непременно с генераторами станций.

Способ компенсации и значение компенсирующей мощности должны выбираться в каждом конкретном случае так, чтобы расчетные затраты на 1 квар получились минимальные.

Снизить потребление реактивной мощности предприятием можно одним из трех способов или их комбинацией:

- мероприятия, не требующие применения компенсирующих устройств;
- мероприятия с применением компенсирующих устройств;
- мероприятия, допускаемые в виде исключения по повышению коэффициента мощности (используется синхронный двигатель в качестве синхронных компенсаторов).

Последние два мероприятия должны быть согласованы с энергосистемой и подтверждены технико-экономическими расчетами.

Мероприятия, не требующие применения компенсирующих устройств:

- упорядочение технологического процесса и применение рациональных электрических режимов;
- устранение режимов холостого хода у асинхронных двигателей и трансформаторов;
- замена, перестановка и отключение трансформаторов, загруженных в среднем менее чем на 30% номинальной мощности;
- переключение статорных обмоток асинхронных двигателей с «треугольника» на «звезду» при загрузке меньше 40%;

- замена асинхронных двигателей на синхронные для всех новых установках электропривода (подтверждается технико-экономическими расчетами);
- повышение качества ремонта двигателей с сохранением номинальных данных.

Для компенсации реактивной мощности на предприятиях применяются конденсаторы, включаемые по схемам поперечной или продольной компенсации, синхронные компенсаторы, синхронные двигатели и генераторы, статические источники реактивной мощности, параметрические источники тока. Каждый из этих источников имеет свои преимущества и недостатки.

В промышленности для компенсации реактивной мощности наиболее часто используются статические конденсаторы.

Групповая компенсация на группу потребителей, подсоединение конденсаторов к шинам производится на цеховой ТП или на ГПП

Индивидуальная компенсация - конденсаторы наглухо подключаются к обмоткам отдельных электродвигателей или трансформаторов, коммутируются вместе с ними, иногда отдельно.

Повышение параметров качества электрической энергии

Поддержание стабильного уровня качества электроэнергии в распределительной сети становится все более сложной задачей из-за более широкого использования преобразователей силовой электроники. Ухудшение качества электроэнергии приводит к увеличению потерь, неэффективному использованию распределительных систем, неисправности чувствительного оборудования и помехам для близлежащих потребителей.

В пределах нормально допустимого значения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) обеспечивается нормальное функционирование технических средств. В диапазоне от нормального значения ПКЭ до предельно допустимого нормальное функционирование также обеспечивается, но ограничено по времени. Если значение ПКЭ в точке подключения электроприемника превышает предельно допустимое значение, то его нормальное функционирование нарушается.

Для повышения показателей качества электрической энергии в системе электроснабжения можно использовать активные фильтры — это инновационное оборудование для компенсации гармоник тока, создаваемых нелинейными нагрузками.

Технико-экономическое значение коэффициента мощности

Величина коэффициента мощности характеризует степень использования активной мощности источника электроэнергии. Чем выше, коэффициент мощности электроприемников тем лучше используются генераторы электрических станций и их первичные двигатели (турбины и др.), трансформаторы подстанции и электрические сети.

Низкие значения косинуса ϕ ($\cos \phi$) при тех же величинах активной мощности приводят к дополнительным затратам на сооружение более мощных станций, подстанций и сетей, а также к дополнительным эксплуатационным расходам.

Действительная мощность электроприемников предприятия непрерывно изменяется с течением времени. Это объясняется тем, что работа отдельных участков или цехов предприятий не совпадает во времени. Кроме того, часть оборудования может работать с неполной загрузкой или даже находиться в состоянии холостого хода. Изменение активной и реактивной мощностей электроприемников влечет за собой изменения $\cos \phi$.

Причины низкого коэффициента мощности

Основными потребителями реактивной энергии являются асинхронные электродвигатели, трансформаторы и индуктивные печи, сварочные аппараты, газоразрядные лампы и т. д.

Асинхронный электродвигатель, работающий с нагрузкой, близкой к номинальной, имеет наибольшее значение $\cos \phi$. При снижении нагрузки электродвигателя коэффициент мощности уменьшается.

Это объясняется тем, что активная мощность на зажимах электродвигателя изменяется пропорционально его нагрузке, в то время как реактивная мощность вследствие незначительного изменения намагничивающего тока практически остается постоянной. При холостом ходе $\cos \phi$ имеет наименьшую величину, которая в зависимости от типа электродвигателя, мощности и скорости вращения находится в пределах 0,1 - 0,3.

Силовые трансформаторы, как и асинхронные электродвигатели, при нагрузке меньше чем на 75% имеют пониженное значение коэффициента мощности.

Перегруженные асинхронные электродвигатели тоже имеют низкий $\cos \phi$, что объясняется увеличением потоков магнитного рассеяния.

Электродвигатели, обладающие лучшими условиями охлаждения по сравнению с закрытыми электродвигателями, могут нести

большую нагрузку (активную мощность) и будут иметь, следовательно, более высокий $\cos\varphi$.

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором вследствие меньших значений индуктивного сопротивления рассеяния имеют $\cos\varphi$ выше, чем электродвигатели с фазным ротором.

Значение $\cos\varphi$ у машин одного и того же типа возрастет с ростом номинальной мощности и скорости вращения ротора, так как при этом уменьшается относительная величина намагничивающего тока.

Увеличение напряжения на вторичной стороне силовых трансформаторов вследствие снижения нагрузки (например, во время ночных смен и в часы обеденных перерывов) ведет к повышению напряжения по сравнению с номинальным на зажимах работающих электродвигателей. Это в свою очередь приводит к увеличению намагничивающего тока и реактивной мощности электродвигателей, что влечет за собой у меньшие коэффициента мощности.

Обточка ротора, которую производят при износе подшипников, чтобы ротор не задевал статор, приводит к увеличению, воздушного зазора между статором и ротором, что вызывает увеличение намагничивающего тока и понижение $\cos\varphi$.

Уменьшение числа проводников в пазу статора при перемотке вызывает увеличение намагничивающего тока и снижение $\cos\varphi$ асинхронного двигателя.

Применение газоразрядных ламп (ДРЛ и люминесцентных), имеющих в цепи индуктивное сопротивление (дроссель) при отсутствии компенсирующих устройств, также снижает коэффициент мощности электроустановок.

Методы повышения коэффициента мощности

Повышать коэффициент мощности электроустановки нужно в первую очередь правильной и рациональной эксплуатацией электрооборудования, т. е. естественным путем. Мощность электродвигателя следует выбирать в строгом соответствии с мощностью, необходимой для приводимого механизма, а уже установленные, но слабозагруженные электродвигатели заменять электродвигателями соответственно меньшей мощности.

Однако при этом необходимо учитывать, что иногда такая замена может привести к увеличению потерь активной энергии в самом электродвигателе и сети, если к. п. д. вновь устанавливаемого электродвигателя окажется меньше установленного ранее. Поэтому следует проверить расчетом целесообразность такой замены.

Кроме того, необходима проверка заменяющего электродвигателя по условиям допустимого нагрева и перегрузки, а иногда и времени разгона. Как правило, замене подлежат электродвигатели, загруженные меньше чем на 40%. При загрузке больше чем на 70% замена становится нерентабельной.

Во всех возможных случаях нужно отдавать предпочтение электродвигателю с короткозамкнутым, а не с фазным ротором. Нужно отказаться от применения закрытых электродвигателей, если по условиям окружающей среды допускается применение электродвигателей в открытом или защищенном исполнении.

Электродвигатели, приводящие в действие различные станки и механизмы, работают не все время с полной нагрузкой. Например, при установке новой детали для обработки на станке электродвигатель иногда работает на холостом ходу с малым $\cos\phi$. Поэтому целесообразно на время холостого хода при длительности межоперационного периода 10 сек и больше отключать электродвигатель от сети (это требование обязательно также в целях экономии активной электроэнергии).

Межоперационным периодом считается то время, которое затрачивается, чтобы отвести инструмент в его исходное положение, снять обработанную деталь со станка, установить на станке новую деталь, подвести инструмент в рабочее положение. На станках и механизмах, у которых периоды работы чередуются с межоперационными периодами, целесообразно устанавливать автоматические ограничители холостого хода.

Рекомендуется также заменять или временно отключать трансформаторы, загруженные в среднем меньше чем на 30% от их номинальной мощности.

Качественный ремонт асинхронного электродвигателя существенно влияет на повышение величины $\cos\phi$. Хорошо отремонтированный двигатель должен иметь паспортные номинальные данные. Следует тщательно следить за величиной воздушного зазора между статором и ротором, не допуская отклонения от нормы, укладывать в пазы количество активных проводников соответственно расчету. Отремонтированные электродвигатели должны подвергаться всесторонним испытаниям, включая проверку величины тока холостого хода.

В ряде случаев мероприятия по улучшению естественного коэффициента мощности не позволяют увеличить $\cos\phi$ до величины 0,92 - 0,95 по условиям технологического процесса. На таких элек-

троустановках применяются искусственные методы компенсации реактивной мощности - повышение коэффициента мощности применением специальных компенсирующих устройств.

К таким устройствам относятся: статические конденсаторы, синхронные компенсаторы и перевозбужденные синхронные электродвигатели. Однако синхронные электродвигатели и компенсаторы, изготовляемые на большие мощности, на предприятиях редко. Наибольшее распространение для повышения коэффициента мощности получили статические конденсаторы.

При соответствующем выборе емкости конденсаторов можно довести угол сдвига фаз между напряжением и током до любой требуемой величины. Уменьшение тока в питающей сети достигается за счет реактивной составляющей, которая компенсируется емкостным током батареи конденсаторов.

Эффективность применения оптимальных энергоносителей и их параметров обуславливается тем, что для осуществления технологических процессов могут использоваться разные виды энергоносителей. Например, нагрев обрабатываемых изделий в промышленных печах может производиться как с использованием электроэнергии, так и с непосредственным сжиганием топлива. Технологические процессы (ковка, штамповка, прессование) могут обеспечиваться не только электрическим, но и пневматическим приводом (сжатым воздухом). Оптимизация видов и параметров энергоносителей на основе технико-экономических расчетов является важным элементом энергосбережения.

Вторичные энергоресурсы (теплота отходящих газов, отработанного пара, конденсата производства и т. п.) целесообразно использовать на нагрев изделий, силовые нужды, а также на выработку электрической энергии.

Применение в промышленности энергоэффективных технологий и оборудования позволяет производить выпуск продукции с меньшими значениями удельных расходов электроэнергии.

Важную роль для экономии электроэнергии играет автоматизация производственных процессов и отдельных технологических установок.

В частности:

- автоматизация компрессорных станций сжатого воздуха снижает расход электроэнергии примерно на 10 %,

- автоматическое регулирование и управление вентиляционными установками в зависимости от температуры наружного воздуха – на 10–15,
- автоматическое управление электрическим освещением – на 15,
- автоматизация и телемеханизация технологических процессов – на 2–3 %.

Внедрение ограничителей холостого хода сварочных трансформаторов позволяет сэкономить порядка 5 % потребляемой ими активной электроэнергии.

Существенное влияние на эффективность использования электроэнергии на промышленных предприятиях имеют рациональное построение СЭС, правильный выбор электрооборудования, а также применение автоматизации учета и контроля электропотребления.

Для планирования мероприятий по экономии электроэнергии на предприятии целесообразно составить электрический баланс, являющийся основой для анализа состояния электрического хозяйства, выявления резервов экономии энергоресурсов и установления норм расхода электроэнергии на единицу продукции.

Снижение потерь мощности и энергии в элементах СЭС

При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения и электрооборудования следует принимать решения, направленные на оптимальное снижение потерь энергоресурсов на промышленных предприятиях.

В трехфазных линиях электропередачи, токопроводах и других элементах, обладающих активным сопротивлением R , потери активной электроэнергии ΔW (в киловатт-часах) на нагревание за расчетный период T могут быть найдены по выражению

$$\Delta W = \frac{K_{\text{ф.а.}}^2 P_c^2 + K_{\text{ф.р.}}^2 Q_c^2}{U_{\text{ном}}^2} RT_p 10^{-3}, \quad (6.1)$$

где $K_{\text{ф.а.}}$, $K_{\text{ф.р.}}$ — коэффициенты формы графиков нагрузки по активной и реактивной мощности;

P_c , Q_c — средние величины активной, кВт, и реактивной, квар, нагрузок за время T , ч; R — активное сопротивление проводника, Ом; U — номинальное напряжение сети, кВ.

Анализ формулы (показывает, что уменьшение потерь электроэнергии может быть достигнуто повышением U и снижением величин остальных ее составляющих.

Средняя активная нагрузка зависит от производительности оборудования и установленных режимов работы электроприемников. Следовательно, величина P может быть уменьшена совершенствованием технологического процесса, применением энергоэффективных электроприемников, рациональным расходом электроэнергии на освещение, вентиляцию, выработку сжатого воздуха и т. п.

Снижение величины Q_c осуществляется путем компенсации реактивной мощности.

Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок предотвращает излишнюю компенсацию реактивной мощности и позволяет компенсировать изменяющуюся реактивную нагрузку потребителей, реализуя наиболее оптимальный режим работы СЭС. Это уменьшает потери электроэнергии в питающих линиях и трансформаторах.

Снижение коэффициентов $K_{\phi a}$ и $K_{\phi p}$ достигается выравниванием графиков электрических нагрузок по активной и реактивной мощности.

При определении потерь электроэнергии, как правило, принимают значения $K_{\phi a}$ и K_{ϕ} одинаковыми, равными коэффициенту формы графика нагрузки по току K_{ϕ} . В этом случае для расчета нагрузочных потерь электроэнергии в трехфазной линии электропередачи используется выражение

$$\Delta W = 3K_{\phi}^2 I_c^2 R T_p 10^{-3}, \quad (6.2)$$

где I_c – среднее значение тока нагрузки линии за время T , А.

Если коэффициент формы графика $K_{\phi 1}$ снижается до значения $K_{\phi 2}$, то потери активной электроэнергии уменьшаются на величину

$$\Delta W = 3(K_{\phi 1}^2 - K_{\phi 2}^2) I_c^2 R T_p 10^{-3}. \quad (6.3)$$

При проектировании и эксплуатации СЭС могут предусматриваться мероприятия по снижению сопротивления линий электропередачи путем применения кабелей или проводов с большими сечениями жил, использования проводникового материала с меньшим удельным сопротивлением, уменьшения длины линии за счет оптимизации ее трассы. Получаемое при этом снижение потерь активной электроэнергии определяется по выражению

(6.4)

где γ_{01} , l_{01} — удельное активное сопротивление и длина линии в исходном режиме; γ_{02} , l_{02} — то же, но после внедрения мероприятий по снижению активного сопротивления линии.

Применение более высокого напряжения без изменения сечения проводников при одной и той же мощности нагрузки снижает ток линии, что уменьшает потери активной электроэнергии на величину:

$$\Delta W = 3K_{\phi}^2(I_{c1}^2 - I_{c2}^2)RT_p 10^{-3}, \quad (6.5)$$

где I_c — средний за время T ток нагрузки линии при низшем и высшем напряжениях соответственно, А.

При более высоком напряжении могут быть применены проводники с меньшим сечением, что снижает расход цветного металла, но увеличивает удельное активное сопротивление линии.

Снижение потребления реактивной мощности на напряжении до 1 кВ без применения компенсирующих устройств

Мероприятия по снижению потребления приемниками Q должны рассматриваться в первую очередь, поскольку для их осуществления, как правило, не требуется значительных капитальных затрат. К ним относятся следующие:

- упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования;
- замена мало загруженных АД двигателями меньшей мощности;
- понижение напряжения у двигателей, систематически работающих с малой загрузкой;
- ограничение холостой работы двигателей;
- применение СД вместо АД в случаях, когда это возможно по условиям технологического процесса;
- повышение качества ремонта двигателей;
- замена мало загруженных трансформаторов;
- замена асинхронных двигателей синхронными.

Рассмотрим эффективность некоторых мероприятий.

Замена мало загруженных двигателей двигателями меньшей мощности

При номинальной нагрузке P_n и номинальном U_n АД потребляет из сети Q_n , равную

$$Q_n = \frac{P_n}{\eta_{дн}} \operatorname{tg} \varphi_n, \quad (6.6)$$

где $\eta_{дн}$ – КПД двигателя.

Реактивная мощность, потребляемая АД из сети при холостом ходе Q_{xx} , может быть найдена из выражения

$$Q_{xx} = \sqrt{3} U_n I_{xx}, \quad (6.7)$$

где I_{xx} – ток холостого хода двигателя.

Для АД с $\cos \varphi_n = 0,91-0,93$ Q_{xx} составляет около $0,5 \cdot Q_n$. Для АД с $\cos \varphi = 0,77-0,79$ Q_{xx} составляет $0,7 \cdot Q_n$. Увеличение потребления Q при полной нагрузке АД по сравнению с потреблением при холостом ходе составляет:

$$\Delta Q_n = Q_n - Q_{xx} = \frac{P_n}{\eta_{дн}} \operatorname{tg} \varphi_n - \sqrt{3} U_n I_{xx}. \quad (6.8)$$

При нагрузках АД меньше номинальной прирост потребления Q по сравнению с Q_{xx} пропорционален квадрату коэффициента загрузки двигателя (K_3^2):

$$\Delta Q = K_3^2 \Delta Q_n, \quad (6.9)$$

где $K_3 = P/P_n$.

Таким образом, реактивная мощность, потребляемая АД при произвольной нагрузке, составляет

$$Q = Q_{xx} + \Delta Q_n K_3^2. \quad (6.10)$$

Коэффициент мощности АД при произвольной нагрузке $P = K_3 P_n$ с учетом (6.10) получается из выражения

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = 1 / \sqrt{1 + \left(\frac{Q_{xx} + K_3^2 \cdot \Delta Q_n}{P_n \cdot K_3} \right)^2} = \frac{P_n \cdot K_3}{\sqrt{(P_n \cdot K_3)^2 + (Q_{xx} + \Delta Q_n K_3^2)^2}}. \quad (6.12)$$

Как следует из выражения (6.12), коэффициент мощности АД уменьшается при уменьшении его загрузки. Например, для загруженного на 100% АД $\cos\varphi = 0,8$, при 50% загрузке $\cos\varphi = 0,65$, при 30 % загрузке $\cos\varphi = 0,51$.

Отсюда следует, что замена систематически мало загруженных АД двигателями меньшей мощности способствует повышению коэффициента мощности установки.

Практически замена малозагруженных АД целесообразна, если средняя загрузка АД составляет меньше 45% $P_{нд}$ и производить расчеты не требуется. При загрузке АД более 70% $P_{нд}$ его замена нецелесообразна. При загрузке АД в пределах от 45 до 70% целесообразность их замены должна быть подтверждена достаточным уменьшением потерь активной мощности $P_{сум}$ в цепи и двигателе, рассчитанных по формуле

$$\Delta P_{сум} = [Q_{хх} (1 - K_3^2) + K_3^2 Q_n] K_{ин} + \Delta P_{хх} + K_3^2 \Delta P_{ан}, \quad (6.13)$$

где $\Delta P_{хх} = P_n \left(\frac{1 - \eta_{нд}}{\eta_{нд}} \right) \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right)$ – потери активной мощности при

ХХ АД, (кВт); $\Delta P_{ан} = P_n \left(\frac{1 - \eta_{нд}}{\eta_{нд}} \right) \left(\frac{1}{1 + \alpha} \right)$ – прирост потерь активной

мощности в АД при 100 % его загрузке, (кВт); $\alpha = \Delta P_{хх} / \Delta P_{ан}$ – расчетный коэффициент, зависящий от конструкции АД и определяемый из выражения

$$\alpha = \frac{\Delta P_{хх} \%}{(100 - \eta_{нд} \%) - \Delta P_{хх} \%}, \quad (6.14)$$

где $\Delta P_{хх}$ – потери х.х. при 100 % загрузке АД; $K_{ин}$ – коэффициент изменения потерь, численно равный удельному снижению потерь активной мощности во всех элементах системы электроснабжения, получаемому при уменьшении передаваемой предприятию реактивной мощности. $K_{ин} = 0,02$ кВт/квар для трансформаторов, присоединенных к шинам электростанции.

Понижение напряжения у малозагруженных двигателей

При невозможности замены мало нагруженных АД следует проверить целесообразность снижения напряжения на его зажимах. Снижение напряжения до определенного минимального допустимого значения $U_{\text{min доп}}$ приводит к уменьшению потребления им Q (за счет уменьшения тока намагничивания) и тем самым к увеличению КПД АД. При этом одновременно уменьшаются потери активной мощности и, следовательно, увеличивается КПД АД. На практике применяют следующие способы снижения напряжения мало нагруженных АД:

- переключение статорных обмоток с треугольника на звезду;
- секционирование статорных обмоток;
- понижение напряжения на цеховых ТП переключением ответвлений на трансформаторах.

Исследования показали, указанное переключение можно рекомендовать для АД напряжением до 1 кВ, систематически нагруженных менее чем на 35-40 % P_n . В табл. 6.1 приведены зависимости КПД АД η в функции коэффициента его загрузки.

Таблица 6.1

Зависимости КПД АД в функции коэффициента его загрузки

| | | | | | | | | |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| η/η_{Δ} | 1,27 | 1,10 | 1,06 | 1,04 | 1,02 | 1,01 | 1,005 | 1,00 |
| K_3 | 0,10 | 0,20 | 1,25 | 0,30 | 0,35 | 0,40 | 0,45 | 0,50 |

При переключении АД с треугольника на звезду ввиду уменьшения максимального вращающего момента в 3 раза необходимо производить проверку по предельному коэффициенту загрузки АД ($K_{3\text{пр}}$), определяемому условиями устойчивости

$$K_{3\text{пр}} = \frac{K_{\text{мм}}}{4,5},$$

где $K_{\text{мм}}$ – кратность максимального вращающего момента по отношению к номинальному. Значения $K_{\text{мм}}$ приводятся в каталогах на АД.

Ограничение холостого хода работающих асинхронных двигателей

Для ряда потребителей время работы АД на холостом ходу достигает 50-65 % всего времени работы. Если промежутки работы АД на холостом ходу достаточно велики, то целесообразно на это время отключать АД от сети.

Повышение качества ремонта двигателей

При выполнении ремонта АД необходимо соблюдать их номинальные данные. В противном случае из ремонта могут быть выпущены АД с повышенным потреблением реактивной мощности, большой неравномерностью загрузки отдельных фаз, увеличенным током холостого хода, отклонением от заводских обмоточных данных и другими серьезными недостатками. Все это создает повышенные потери энергии и ухудшает естественный коэффициент мощности предприятия.

Замена асинхронных двигателей синхронными

Синхронные двигатели по сравнению с асинхронными имеют следующие преимущества:

- возможность использования в качестве компенсирующих устройств при сравнительно небольших дополнительных первоначальных затратах, поскольку при работе с опережающим коэффициентом мощности полная мощность синхронного двигателя $S_{\text{нед}}$, определяющая его стоимость, растет в гораздо меньшей степени, чем его компенсирующая способность;
- возможность экономичного изготовления на небольшое число оборотов, при этом отпадает необходимость в промежуточных передачах между двигателем и рабочей машиной;
- меньшую зависимость вращающегося момента от колебаний напряжения (у синхронного двигателя момент пропорционален напряжению в первой степени, а у асинхронного - во второй степени);
- большую устойчивость узлов нагрузок и энергосистемы;
- более высокую производительность рабочего агрегата при синхронном электроприводе, поскольку скорость двигателя не зависит от нагрузки;
- меньшие потери активной мощности, так как КПД синхронного двигателя выше, чем у асинхронного.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технический кодекс установившейся практики (ТКП) 427-2022 (33240). – Мн.: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2022.
2. Технический кодекс установившейся практики (ТКП) 181-2022. – Мн.: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2022.
3. Бахмутская, В. В. Потребители электроэнергии и электромагнитная совместимость [Электронный ресурс] : лабораторный практикум по одноименному курсу для студентов специальности 1-43 01 02 "Электроэнергетические системы и сети" дневной формы обучения / В. В. Бахмутская. - Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. - 157 с.
4. ГОСТ 30331.15-2001 (МЭК-5-52-93). Электроустановки зданий. Ч.5. Выбор и монтаж электрооборудования. Глава 52. Электропроводки – Мн.: Изд-во стандартов, 1993. – 17 с.
5. ГОСТ 30331.15-2001 (МЭК-5-52-93). Электроустановки зданий. Ч.5. Выбор и монтаж электрооборудования. Глава 54. Заземляющие устройства и защитные проводники – Мн.: Изд-во стандартов, 1993. – 17 с.
6. Колесник, Ю. Н. Потребители электроэнергии: курс лекций по одноименной дисциплине для студентов специальности 1-43 01 03 "Электроснабжение" дневной и заочной форм обучения / Ю. Н. Колесник. - Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. - 72 с.
7. Козловская В.Б. Электрическое освещение: справочник / В.Б. Козловская, В.Н. Радкевич, В.Н. Сацукевич. – 2-е изд. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 271 с.:ил.
8. Бахмутская В.В. Электроснабжение промышленных предприятий [Электронный ресурс]: пособие по одноименной дисциплине для студентов специальности 1-43 01 07 "Техническая эксплуатация энергооборудования организаций" дневной и заочной форм обучения / В. В. Бахмутская. - Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. - 258 с.
9. Кнорринг Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г.М.Кнорринг, И.М.Федин, В.Н.Сидоров. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 448 с.

ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Пособие

**для слушателей специальности переподготовки
9-09-0712-04 «Диагностика и техническое
обслуживание энергооборудования
организаций»
заочной формы обучения**

**Составители: Бахмутская Валентина Владимировна
Жуковец Светлана Григорьевна**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 11.11.24.

Рег. № 46Е.

<http://www.gstu.by>