

Министерство образования Республики Беларусь

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

Кафедра «Электроснабжение»

Ю. Н. Колесник

ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

КУРС ЛЕКЦИЙ

**по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-43 01 03
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2009

УДК 621.31(075.8)
ББК 31.29я73
К60

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 3 от 15.03.2007 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
О. Г. Широков

Колесник, Ю. Н.

К60 Потребители электроэнергии : курс лекций по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» днев. и заоч. форм обучения / Ю. Н. Колесник. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 72 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://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-778-0.

Содержит краткие сведения по электрооборудованию, электропотреблению и режимам работы различных потребителей и приемников электроэнергии, по формированию электрических нагрузок. Рассмотрены основные методы определения расхода и потерь электроэнергии.

Для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение» дневной и заочной форм обучения.

**УДК 621.31(075.8)
ББК 31.29я73**

ISBN 978-985-420-778-0

© Колесник Ю. Н., 2009
© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2009

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.

Огромное значение в развитии электроэнергетики республики имеет утвержденный 22 декабря 1920 г. Государственный план электрификации России (ГОЭЛРО). В результате в 1930 г. состоялся пуск первой Белорусской ГРЭС, а уже в 1931 г. была создана Белорусская энергосистема. Электрификация послужила мощным толчком к развитию народного хозяйства, что отразилось на уровне потребления электроэнергии: 1940 г. – 508 млн кВт · ч; 1970 г. – 14,78 млрд кВт · ч; 2004 г. – 34,1 млрд кВт · ч.

В настоящее время годовой рост потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в мире составляет около 2 %, а прирост ВВП – порядка 3 %.

Если рассмотреть структуру потребления ТЭР в Республике Беларусь, то можно отметить, что на долю электрической энергии приходится около 30 %, тепловой энергии – более 40 %, топлива – порядка 25–30 %. Однако, в отличие от тепловой энергии и топлива, электрическая энергия является универсальной и в основном расходуется на нужды технологических процессов потребителей.

Всех потребителей электрической энергии народного хозяйства можно классифицировать следующим образом:

1. Промышленные предприятия (45–60 %).
2. Жилые и общественные здания, коммунально-бытовые организации и учреждения (25–35 %).
3. Сельскохозяйственное производство (10–15 %).
4. Электрифицированный транспорт (2–5 %).

Основными потребителями электроэнергии в Республике Беларусь являются промышленные предприятия и объекты коммунально-бытового сектора.

Всего в республике ежегодно потребляется около 35 млрд кВт · ч электрической энергии. При этом 10–12 % от всей электроэнергии расходуется на электрическое освещение, а 10–15 % теряется в электрических сетях и системах электроснабжения при ее транспортировке и трансформации.

Цель изучения дисциплины состоит в получении теоретических знаний и практических навыков по электрооборудованию, электропо-

треблению 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.

Материал данной дисциплины является одним из основных разделов курса «Электроснабжение» и имеет основополагающее значение в процессе подготовки инженеров-электриков

ТЕМА 1

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О ПРИЕМНИКАХ И ПОТРЕБИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Электроприемник – устройство, в котором происходит преобразование электрической энергии в другие виды энергии для ее использования (осветительные лампы, двигатели и т. д.).

Электроприемник или группа электроприемников, связанных технологическим процессом и размещенных на определенной территории, называется потребителем электрической энергии (станок, цех, завод и т. д.).

Классификация электроприемников

Электроприемники в практике электроснабжения удобно классифицировать по следующим признакам:

- по надежности электроснабжения;
- по роду тока;
- по напряжению;
- по режиму работы.

1. По *степени надежности* электроснабжения электроприемники делятся на следующие три категории:

– электроприемники I категории – электроприемники, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей (например, система вентиляции кислотного цеха, операционная), 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, бесперебойная работа которых необходима для безаварийного останова производства с целью предотвращения угрозы жизни людей, взрывов, пожаров и повреждения дорогостоящего основного оборудования (например, непрерывная работа насоса по циркуляции воды необходима для охлаждения стенок сталеплавильной печи);

– 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.

В зависимости от категории надежности, к которой относится тот или иной электроприемник, устанавливаются требования к системам электроснабжения.

2. По *роду тока* различают следующие электроприемники:

– электроприемники, работающие от сети промышленной частоты (50, 60 Гц) – большинство электроприемников;

– электроприемники, работающие от сети повышенной (пониженной) частоты;

– электроприемники, работающие от сети постоянного тока.

Установки повышенной частоты применяются, например, для нагрева диэлектриков. Повышение частоты используется также в технологиях, требующих высокие скорости вращения ($n = 20000$ об/мин; $f = 133\text{--}400$ МГц).

Пониженная частота используется в металлургии.

Постоянный ток используется в транспорте, для электролиза и др.

3. По *напряжению* электроприемники классифицируют следующим образом:

– до 1 кВ и выше 1 кВ – переменный ток.

– до 1,5 кВ и выше 1,5 кВ – постоянный ток.

Номинальное напряжение электроприемника определяет величину его мощности. Мощные электрические двигатели используются для привода насосных, компрессорных агрегатов. При выборе типа электрического двигателя большое значение имеет мощность и напряжение:

– при напряжении до 1 кВ и мощности до 100 кВт экономичнее использовать асинхронные двигатели;

– свыше 100 кВт – синхронные двигатели;

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

– при напряжении 6 кВ и мощности больше 300 кВт – синхронные двигатели.

В настоящее время на практике чаще всего используются асинхронные электродвигатели.

4. По *режиму работы* в соответствии с ГОСТ 183–74 электроприемники классифицируют на 8 режимов. Но для решения практических задач по определению электрических нагрузок, как правило, используют 3 следующих характерных режима работы электроприемников:

– продолжительный режим работы электроприемника соответствует номинальной неизменной нагрузке, продолжающейся столь

долго, что температура τ его частей достигает установившихся значений (рис. 1.1, а). Установившейся температурой считается температура, изменение которой в течение 1 ч не превышает 1°C ;

– кратковременный режим работы (ПКР) электроприемника (рис. 1.1, б) 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;

– повторно-кратковременный режим работы электроприемника – режим, при котором кратковременные рабочие периоды номинальной нагрузки чередуются с паузами (рис. 1.1, в). Продолжительность рабочих периодов и пауз не настолько велика, чтобы перегревы отдельных частей электроприемника при неизменной температуре окружающей среды могли достигнуть установившихся 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 $t_{\text{в}}$ ко времени всего цикла $t_{\text{ц}}$:

$$ПВ = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{о}} + t_{\text{в}}} \cdot 100 = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{ц}}} \cdot 100, \quad (1.1)$$

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

Значение $t_{\text{ц}}$ при ПКР не должно превышать 10 мин.

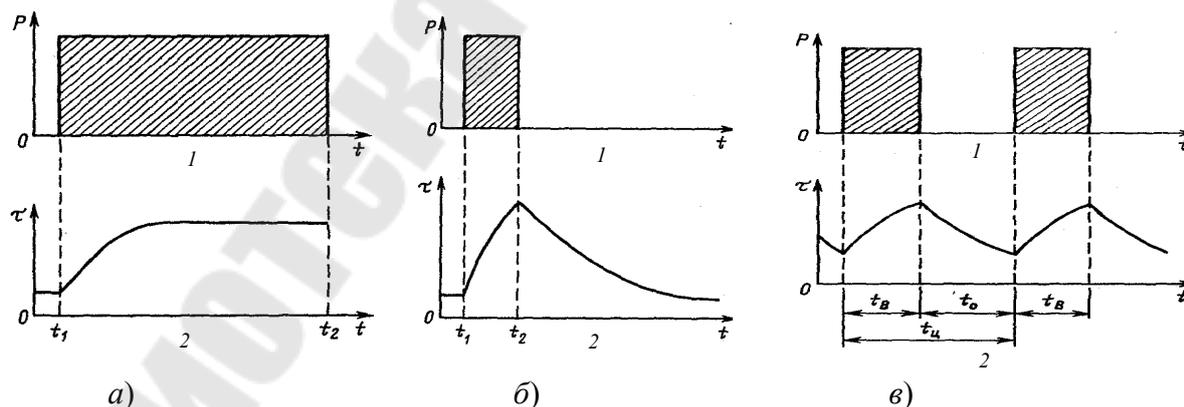


Рис. 1.1. Графики нагрузки (1) и изменения температуры нагрева частей электроприемника (2) при различных режимах работы:
 а – продолжительный режим работы электроприемника;
 б – кратковременный режим работы электроприемника;
 в – повторно-кратковременный режим работы электроприемника

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 P_1 и P_2 электроустановки, работающей в повторно-кратковременном режиме при соответствующих ПВ₁ и ПВ₂ имеет вид:

$$P_1 \cdot \sqrt{\text{ПВ}_1} = P_2 \cdot \sqrt{\text{ПВ}_2} = P_{\text{прод}}, \quad (1.2)$$

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

Электроприемники продолжительного режима характеризуются коэффициентом включения:

$$k_{\text{в}} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{в}} + t_{\text{п}}} = \frac{t_{\text{в}}}{t_{\text{ц}}}. \quad (1.3)$$

Величина $t_{\text{ц}}$ при продолжительном режиме должна быть более 10 мин.

Режим работы электроприемников характеризуется временем включения, временем отключения, временем цикла, определяющим нагрев отдельных частей электроприемника, а также токоведущих частей системы электроснабжения.

Одной из характеристик, формально описывающих данный процесс, является постоянная времени нагрева (T_0 , мин) – время, в течение которого токоведущие части нагрелись бы до установившейся температуры, если бы отсутствовал теплообмен с окружающей средой. Поэтому выбор всех токоведущих частей элементов системы электроснабжения по условию их допустимого нагрева осуществляют с учетом T_0 .

Классификация потребителей электрической энергии

Потребители электрической энергии классифицируются:

- по суммарной установленной мощности электроприемников;
- по принадлежности к отрасли промышленности;
- по тарифной группе;
- по категории энергетической службы.

1. По суммарной установленной мощности ($P_{\text{уст}}$) электроприемников различают следующие потребители электроэнергии:

- малые, $P_{\text{уст}} < 5$ МВт;
- средние, $5 \text{ МВт} \leq P_{\text{уст}} \leq 75$ МВт;
- крупные, $P_{\text{уст}} > 75$ МВт.

Примерами крупных потребителей электроэнергии могут служить Белорусский металлургический завод, где $P_{\text{уст}}$ превышает 500 МВт, а также Белтрансгаз ($P_{\text{уст}}$ около 750 МВт). Установленная мощность электроприемников Магнитогорского металлургического комбината достигает 5000 МВт.

2. По принадлежности к отрасли промышленности потребители электроэнергии бывают металлургические, химические, нефтехимические, легкой промышленности, машиностроения, горнорудные.

3. По тарифной группе различают 2 группы потребителей электроэнергии, отличающиеся условиями выбора компенсирующих устройств, а также условиями расчетов за электроэнергию:

– I тарифная группа – потребители, установленная (присоединенная) мощность трансформаторов которых $S_{\text{тр}} \geq 750 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Выбор компенсирующих устройств осуществляется при проектировании (реконструкции) одновременно с выбором всех элементов системы электроснабжения. При этом потребители данной группы рассчитываются за электроэнергию по двухставочному либо многоставочному тарифам;

– II тарифная группа – присоединенная мощность трансформаторов которых $S_{\text{тр}} \leq 750 \text{ кВ} \cdot \text{А}$. Мощность компенсирующих устройств таких потребителей устанавливается энергоснабжающей организацией. Оплата за электроэнергию, как правило, осуществляется по одноставочному тарифу.

4. О масштабах и сложностях энергетического хозяйства потребителей можно судить по суммарной годовой трудоемкости ремонтов и обслуживания электрооборудования. Чем выше эта трудоемкость (чел · ч), тем сложнее энергетическое хозяйство. И в зависимости от этого показателя потребители электроэнергии классифицируются на 12 групп.

Характеристики электроприемников

Основными характеристиками электроприемников являются:

- номинальная мощность $P_{\text{н}}$ ($S_{\text{н}}$, $Q_{\text{н}}$);
- номинальное напряжение $U_{\text{н}}$;
- номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{н}}$;
- номинальный КПД $\eta_{\text{н}}$;
- номинальная продолжительность включения ПВ_н;
- номинальная частота $f_{\text{н}}$;
- номинальный ток $i_{\text{н}}$.

При определении расчетных нагрузок величины, относящиеся к электроприемникам, обозначаются строчными буквами, а к потребителям электрической энергии – прописными символами.

Номинальная мощность отдельных электроприемников принимается равной:

– механической мощности на валу – для электродвигателей. При этом для электродвигателей с повторно-кратковременным режимом работы:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{пасп}} \cdot \sqrt{\text{ПВ}_{\text{пасп}}};$$

– для силовых и электропечных трансформаторов (работают, как правило, в длительном режиме):

$$S_{\text{ном}} = S_{\text{пасп}};$$

– для сварочных трансформаторов (как правило, работают в ПКР):

$$S_{\text{ном}} = S_{\text{пасп}} \cdot \sqrt{\text{ПВ}_{\text{пасп}}};$$

– для источников света:

$$P_{\text{н}} = P_{\text{пасп}} \text{ (лампы накаливания);}$$

$$P_{\text{н}} = K_{\text{ПРА}} \cdot P_{\text{пасп}} \text{ (газоразрядные лампы с электромагнитными ПРА),}$$

где $K_{\text{ПРА}} = 1,25$ – для люминесцентных ламп; $K_{\text{ПРА}} = 1,1$ – для ламп высокого давления, например, типа ДРЛ.

В электронном пускорегулирующем аппарате отсутствуют потери мощности и энергии:

$$K_{\text{ПРА}}^{\text{э}} = 1.$$

Под номинальной реактивной мощностью одного электроприемника понимается реактивная мощность, потребляемая из сети или генерируемая в сеть при номинальной активной мощности и номинальном напряжении, а для синхронного двигателя ток возбуждения должен быть равным номинальному.

Номинальная электрическая мощность определяется, как

$$P_{\text{нэ}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}; S_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}};$$

где $P_{\text{нэ}}$ – активная электрическая мощность; $P_{\text{н}}$ – номинальная механическая мощность; $\cos \varphi_{\text{н}}$ – коэффициент активной мощности, который равен:

$$\cos \varphi_{\text{н}} = \frac{P_{\text{нэ}}}{S_{\text{н}}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}} \cdot S_{\text{н}}};$$

$$\eta_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{P_{\text{HЭ}}} = \frac{P_{\text{H}}}{P_{\text{H}} + \Delta P_{\text{H}}}.$$

$\text{tg}\varphi_{\text{H}}$ – коэффициент реактивной мощности:

$$\text{tg}\varphi_{\text{H}} = \frac{Q_{\text{H}} \cdot \eta_{\text{H}}}{P_{\text{H}}}.$$

Номинальный ток электроприемников может определяться по выражениям:

$$i_{\text{H}} = \frac{P_{\text{H}}}{\sqrt{3} U_{\text{H}} \cos\psi_{\text{H}} \eta_{\text{H}}} \quad (\text{для электродвигателей});$$

$$i_{\text{H}} = \frac{S_{\text{H}}}{\sqrt{3} U_{\text{H}}} \quad (\text{для печей, трансформаторов, генераторов и др.}).$$

При этом значения i_{H} , P_{H} , S_{H} определяют, как правило, допустимый тепловой режим работы электроприемника.

Следует отметить, что номинальный режим очень часто отличается от оптимального.

ТЕМА 2 ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Общие сведения о графиках нагрузки

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

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

Кривая, характеризующая изменение нагрузки во времени, называется графиком электрической нагрузки (рис. 2.1).

Под величиной нагрузки в данный момент времени понимается ее действующее значение, показываемое измерительными приборами с достаточно малой инерцией.

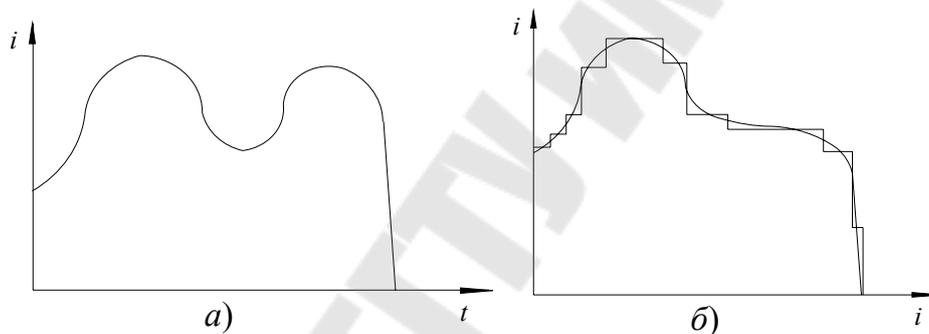


Рис. 2.1. Графики нагрузки:
 a – непрерывный; b – дискретный

Для решения практических задач электроснабжения непрерывный график заменяют дискретным (рис. 2.1, б). Он может быть получен при помощи счетчиков электрической нагрузки.

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

Зная индивидуальные графики нагрузки, можно получить групповой:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t); \quad Q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t); \quad I(t) = \frac{\sqrt{P^2(t) + Q^2(t)}}{\sqrt{3} U_H}.$$

Выражение $I(t) \approx \sum_1^n i_i(t)$ можно использовать тогда, когда коэффициенты мощности электроприемников, формирующих групповой график нагрузки, примерно равны.

Индивидуальные графики нагрузки

В практике электроснабжения, как правило, используют групповые графики нагрузки (ГГН), но учитывая, что они формируются отдельными электроприемниками, необходимо рассмотреть индивидуальные графики нагрузки (ИГН). Различают 4 вида ИГН (рис. 2.2):

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

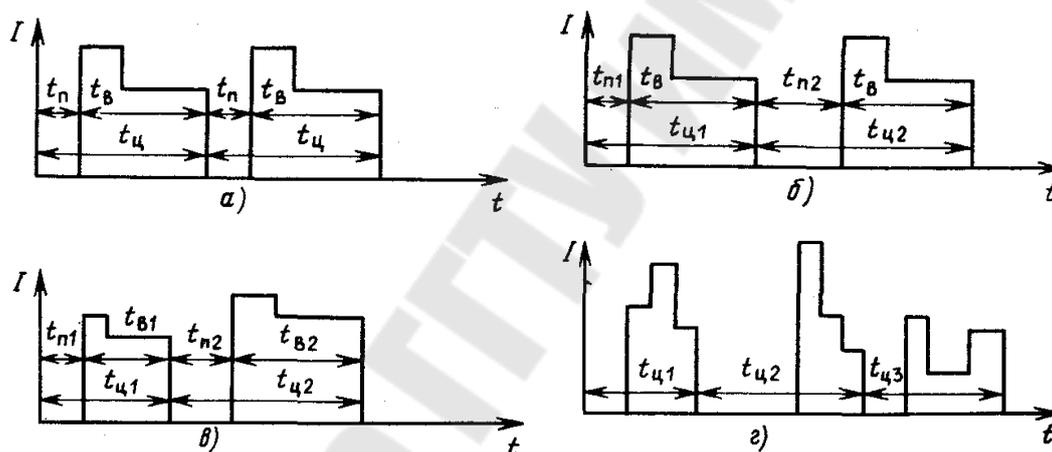


Рис. 2.2. Индивидуальные графики нагрузки различных типов: а – периодические; б – циклические; в – нециклические; г – нерегулярные

Периодические графики (рис. 2.2, а) отвечают строго ритмичному производству с одинаковыми токами и временем t_n , t_B , $t_ц$ за разные циклы:

$$t_{n1} = t_{n2} = \text{const}, t_{B1} = t_{B2} = \text{const}, t_{ц1} = t_{ц2} = \text{const}, W_1 = W_2 = \text{const}.$$

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

Циклические графики (рис. 2.2, б) характерны для электроприемников поточных линий, где имеются ручные операции, например, установка, подгонка деталей, их съем и т. д. Время пауз t_n и циклов $t_ц$ у таких графиков за разные циклы не равны и изменяются по случайному закону:

$$t_{n1} \neq t_{n2} \neq \text{const}, t_{B1} = t_{B2} = \text{const}, t_{ц1} \neq t_{ц2} \neq \text{const}, W_1 = W_2 = \text{const}.$$

Нециклические графики (рис. 2.2, в) имеют электроприемники, когда выполняемые ими операции строго не регламентированы, например, станки на ремонтных участках. В этом случае $t_{в}$, $t_{п}$ и $t_{ц}$ являются случайными, меняется и величина нагрузки от цикла к циклу. При этом нециклический график, подобно периодическому и циклическому, характеризуется стабильностью потребления электроэнергии за среднее время цикла:

$$t_{п1} \neq t_{п2} \neq \text{const}, t_{в1} \neq t_{в2} \neq \text{const}, t_{ц1} \neq t_{ц2} \neq \text{const}, W_1 = W_2 = \text{const}.$$

Нерегулярные графики (рис. 2.2, з) встречаются редко. Их имеют электроприемники, которые обслуживают технологические процессы с неустановившимся характером. При этом условие стабильности потребления электроэнергии уже не соблюдается:

$$t_{п1} \neq t_{п2} \neq \text{const}, t_{в1} \neq t_{в2} \neq \text{const}, t_{ц1} \neq t_{ц2} \neq \text{const}, W_1 \neq W_2 \neq \text{const}.$$

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

Графики групповой нагрузки

Для групповых графиков нагрузки степень регулярности определяется не только типами составляющих его индивидуальных графиков, но и взаимозависимостями нагрузок отдельных электроприемников.

По периодичности различают следующие типы групповых графиков нагрузки:

- нерегулярные;
- почти периодические.

В большинстве случаев имеют место почти периодические групповые графики нагрузки (рис. 2.3).

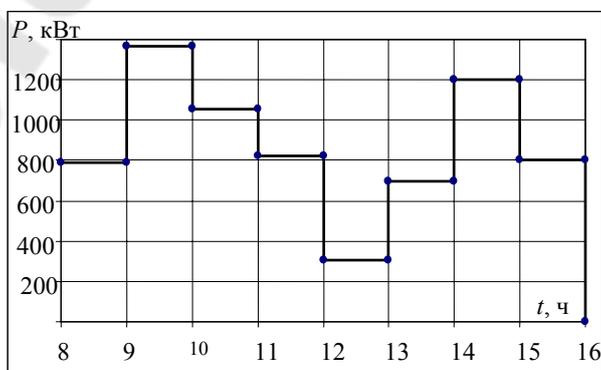


Рис. 2.3. Групповой график нагрузки потребителя электроэнергии за смену

Групповые графики нагрузки, для которых характерна повторяемость нагрузки в течение разных смен в определенные временные интервалы, называют почти периодическими.

Групповые графики нагрузки, используемые для решения практических задач электроснабжения, делятся на суточные (сменные), годовые (по месяцам), упорядоченные, типовые.

Суточные (сменные) графики нагрузки (рис. 2.3) характеризуют изменение нагрузки в течение суток (смены). При этом следует различать рабочие сутки, а также выходные и праздничные дни, нагрузка в которые существенно ниже. Особенностью суточных графиков нагрузки является их неравномерность, когда наблюдаются утренний и вечерний максимумы. Ночью нагрузка существенно снижается. Исключение составляют потребители с непрерывным техническим процессом.

Годовые графики нагрузки характеризуют изменение нагрузки по месяцам в течение года (рис. 2.4).

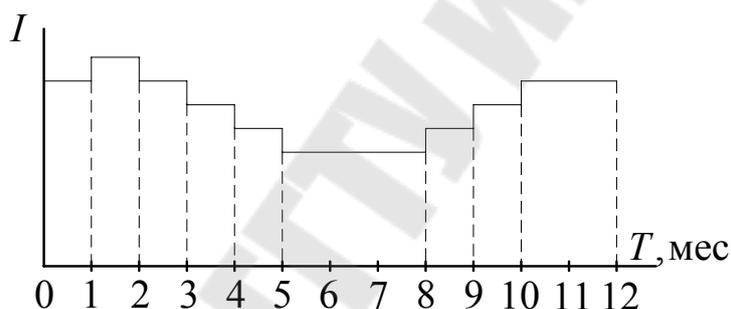


Рис. 2.4. Годовой график нагрузки потребителя электроэнергии

Различают два временных периода:

- 1) осеннее-зимний (1 и 4 квартала года);
- 2) весеннее-летний (2 и 3 квартала года).

Для годовых графиков нагрузки характерно снижение нагрузки в течение летнего периода и увеличение ее в зимний период. Данные графики используются для определения сезонного фактора нагрузки, что имеет существенное значение при проектировании систем электроснабжения потребителей электроэнергии сельскохозяйственного производства.

Упорядоченные графики нагрузки показывают время работы потребителя с определенной нагрузкой за принятый временной промежуток, например, за сутки или за год (рис. 2.5).

Упорядоченные графики используют для определения расхода электроэнергии и времени максимума нагрузки T_m (времени макси-

мальных потерь τ), а также для установления закона распределения вероятности нагрузки.

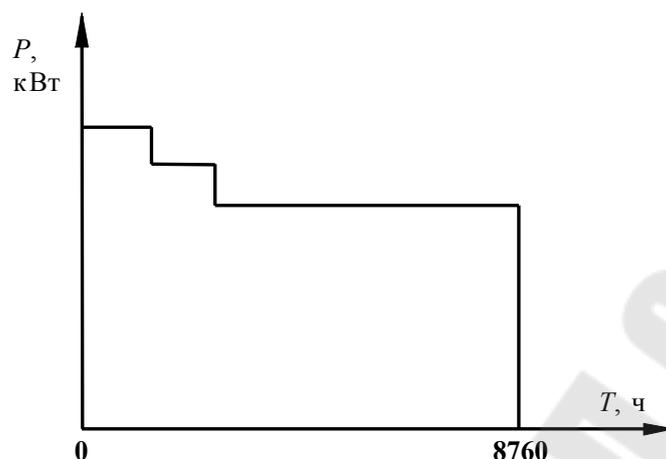


Рис. 2.5. Упорядоченный график нагрузки потребителя электроэнергии

Типовой график нагрузки – усредненный по времени и набору электроприемников график нагрузки аналогичных по режиму работы потребителей.

При большом количестве электроприемников, входящих в группу (цех, завод, жилой дом, район), их групповой график нагрузки становится устойчивым, почти периодическим.

Различают типовые графики сельскохозяйственных потребителей, промышленных потребителей (по отраслям) и потребителей коммунально-бытового сектора. Данные типовых графиков нагрузки приводятся в справочной литературе в относительных единицах и используются при проектировании систем электроснабжения потребителей.

Нагрузка типового графика, как правило, нормируется относительно максимального значения и представляется в процентах.

В отличие от промышленных потребителей, вечерний максимум нагрузки потребителей коммунально-бытового сектора больше, чем утренний.

При рассмотрении типовых графиков нагрузки имеют место характерные графики за летний и зимний дни. Для различия графиков нагрузки по сезонам года используют коэффициент сезонности (в основном, для потребителей сельского хозяйства).

Коэффициент сезонности – отношение математического ожидания максимума нагрузки данного месяца к математическому ожиданию годового максимума нагрузки.

При проектировании систем электроснабжения следует учитывать, что время наступления максимальной нагрузки у различных по-

требителей разное, поэтому при совместном электропитании этих потребителей необходимо учитывать эффект несомещения максимумов их нагрузки.

Очевидно, что суммарная максимальная нагрузка потребителей меньше суммы их максимумов:

$$P_{M\Sigma} \leq \Sigma P_{Mi}.$$

Данное явление характеризуется коэффициентом совмещения максимумов:

$$K_0 = K_\Sigma = \frac{P_{M\Sigma}}{\Sigma P_{Mi}}.$$

Значения этого коэффициента представлены в справочной литературе для различных потребителей электроэнергии. Также он может быть определен в зависимости от коэффициента использования и времени использования максимума нагрузки потребителей электроэнергии по справочным номограммам:

$$K_0 = f(K_{и}; T_M)$$

Таким образом, типовые графики нагрузки (как правило, суточные) приводятся в справочной литературе, где нагрузка представлена в относительных единицах. Однако на практике оперировать с графиками нагрузки не всегда удобно, поэтому при расчетах электрических нагрузок, согласовании технических условий на электроснабжение, решении задач на лимитирование и управление электропотреблением пользуются показателями, характеризующими графики нагрузки.

Показатели графиков нагрузки

При решении практических задач электроснабжения очень часто отсутствуют графики электрических нагрузок. Поэтому для описания режимов энергопотребления в практике электроснабжения используют систему показателей, адекватно описывающих эти графики. При этом различают физические величины и безразмерные коэффициенты графиков нагрузки.

При рассмотрении индивидуальных графиков их показатели обозначаются строчными буквами (p, q, s, i, k), групповых – прописными (P, Q, S, I, K).

Физические величины, характеризующие графики электрических нагрузок:

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

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

$$P_c = \frac{\int_0^T P(t) dt}{T}.$$

На практике средняя нагрузка определяется по показателям электрических счетчиков, либо других приборов, с помощью формул:

$$P_c = \frac{W}{T}; \quad Q_c = \frac{V}{T}; \quad P_c = \frac{\sum P_i \cdot \Delta t_i}{T};$$

$$i_c = \frac{1}{\sqrt{3} U_H \cdot T} \int_0^T \sqrt{P^2 + Q^2} dt \approx \frac{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}}{\sqrt{3} U_H};$$

$$P_c = \sum p_{ci}; \quad Q_c = \sum q_{ci}; \quad I_c \approx \sum i_{ci}.$$

В практических целях в качестве средней нагрузки используется среднечасовая, средняя нагрузка за смену, за сутки, среднегодовая нагрузка. Для определения расчетной нагрузки используется средняя нагрузка за наиболее нагруженную смену, в качестве которой выбирается смена с наибольшим расходом электроэнергии. Средняя мощность используется также и для определения расхода электроэнергии потребителей.

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

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T P^2(t) dt}; \quad I_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T I^2(t) dt}; \quad P_{ск} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot \Delta t_i}{T}}.$$

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

Понятие «среднеквадратичная нагрузка» приводит к понятиям «дисперсия нагрузки» и «стандартное отклонение нагрузки»:

$$DP = P_{\text{ск}}^2 - P_{\text{с}}^2, DI = I_{\text{ск}}^2 - I_{\text{с}}^2;$$

$$\sigma_p = \sqrt{DP}, \sigma_I = \sqrt{DI}.$$

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

Максимальная длительная нагрузка характеризуется периодом усреднения от нескольких минут до нескольких часов (рис. 2.6). Она используется для выбора токоведущих частей СЭС по условию нагрева.

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

$$I_{\text{пик}} > I_{\text{м}} \geq I_{\text{ск}} \geq I_{\text{с}}.$$

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

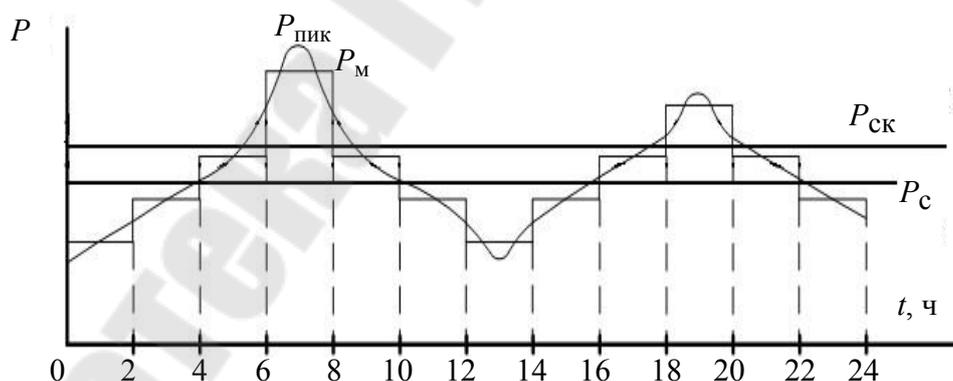


Рис. 2.6. Физические величины графика нагрузки

Из максимальной длительной нагрузки важнейшее значение имеет расчетная нагрузка.

Под *расчетной* понимается такая условная нагрузка, которая эквивалентна реальной нагрузке по наиболее тяжелому тепловому эффекту. В связи с этим рассматривают следующие 2 определения расчетной нагрузки:

1. Расчетная нагрузка, определяющая нагрев (износ) изоляции.
2. Расчетная нагрузка, определяющая нагрев токоведущих частей.

Из двух значений расчетной мощности используют наибольшее значение. Как правило, этим значением является нагрузка, которая обуславливает наибольший нагрев проводника над температурой окружающей среды. При этом значение расчетной мощности определяется как:

$$P_p = \sqrt{3} I_p U_n \cos \varphi_{\text{ср.взв.}};$$

$$\cos \varphi_{\text{ср.взв.}} = \frac{W}{\sqrt{W^2 + V^2}}.$$

Так как нагрев проводника определяется продолжительностью нагрузки, то должны существовать определенные периоды усреднения графика нагрузки. В качестве такого периода принимается величина, равная утроенному значению постоянной времени нагрева токоведущих частей системы электроснабжения, на которые рассчитывается нагрузка:

$$T_{\text{уср}} = 3T_0.$$

Постоянная времени нагрева (T_0) характеризует соотношение поглощающей и теплоотдающей способностей проводника:

$$T_0 = \frac{G \cdot c}{F},$$

где G – масса, кг; F – площадь охлаждающей поверхности, м^2 ; c – коэффициент теплоотдачи.

T_0 зависит от материала проводника, его сечения и способа прокладки и может изменяться от нескольких минут до нескольких часов. Например, для открыто проложенных проводов с резиновой изоляцией постоянная времени нагрева принимает значения, приведенные в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Зависимость постоянной времени нагрева проводников
от сечения**

$F, \text{мм}^2$	6	10	16	25	35	50	70	95	120
$T_0, \text{мин}$	3	4,2	5,5	7,2	9	12	15	18,4	21,4

Постоянная времени нагрева токоведущих частей определяет период усреднения суточных графиков нагрузки, которые используются для решения задач по выбору токоведущих частей по условию их допустимого нагрева. Поэтому в большинстве случаев в качестве такого периода принят 30-минутный интервал, что соответствует постоянной времени нагрева проводников сечением 25–50 мм², наиболее часто используемых в практике проектирования. Однако необходимо отметить, что при выборе сечения электропроводки без учета ее реальной постоянной времени нагрева приводит к тому, что в области малых сечений значение нагрузки занижено, и, следовательно, имеет место повышенный износ проводников. В области больших сечений завышенное значение нагрузки приводит к увеличению затрат на токоведущие части СЭС. Данные положения можно пояснить на следующем примере.

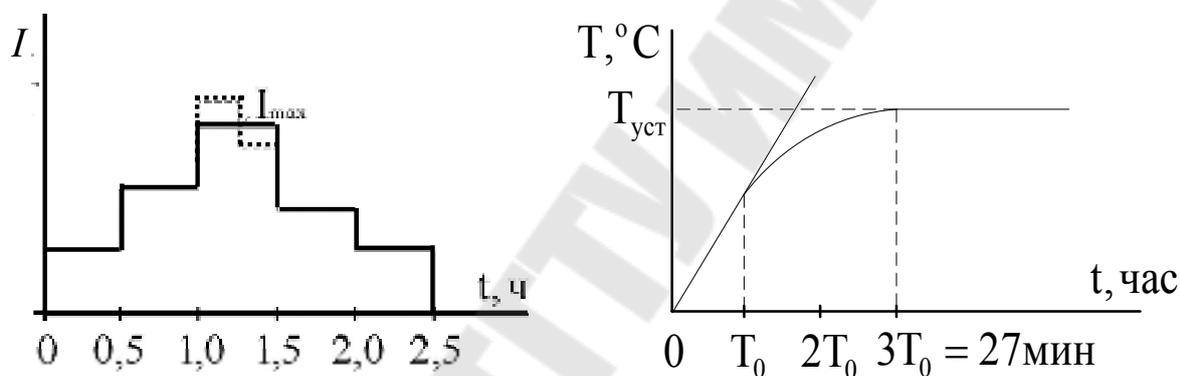


Рис. 2.7. Обоснование периода усреднения графика нагрузки

Предположим, что используя максимальную нагрузку (I_{max}), представленную на графике (рис. 2.7, $T_{уст}$ – установившаяся температура), выбран проводник сечением 35 мм². Постоянная времени нагрева данного проводника $T_0 = 9$ мин. Это означает, что температура его нагрева станет равной $T_{уст}$, через время $3T_0 = 27$ мин. В результате период нагрева практически соответствует периоду усреднения графика нагрузки, равному 30 мин.

Предположим, что используя эту же усредненную за 30 мин максимальную нагрузку I_{max} , выбран проводник сечением 6 мм². Постоянная времени его нагрева $T_0 = 3$ мин, поэтому период нагрева до установившейся температуры составит 9 мин (рис. 2.8). Это означает, что для выбора такого проводника целесообразно использовать график с периодом усреднения 9 мин.

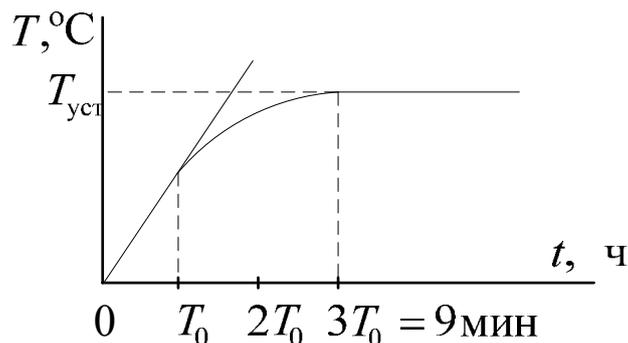


Рис. 2.8. Изменение температуры во времени проводника при $T_0 = 9$ мин

В итоге имеет место занижение расчетной нагрузки ($I_{\max} < I'_{\max}$) и повышенный износ выбранного проводника.

Коэффициенты, характеризующие графики нагрузки

Наряду с физическими величинами графики нагрузки описываются безразмерными коэффициентами. Эти коэффициенты устанавливают связь между основными физическими величинами, характеризуют неравномерность графиков нагрузки и использование электроприемников и потребителей электроэнергии по мощности и времени.

Коэффициенты, характеризующие связь между основными физическими величинами графиков нагрузки:

1. Коэффициент максимума графика:

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

В практике электроснабжения при определении расчетных нагрузок вместо коэффициента максимума используют коэффициент расчетной нагрузки:

$$k_{\text{р}} = \frac{P_{\text{р}}}{P_{\text{с}}}$$

где $P_{\text{р}}$ – расчетная нагрузка, представляющая собой максимальную нагрузку, эквивалентную реальной по тепловому эффекту.

Коэффициент максимума относится к групповым графикам нагрузки и устанавливает связь между средней и максимальной нагрузками за наиболее загруженную смену.

Коэффициент расчетной нагрузки определяется по справочным номограммам в зависимости от группового коэффициента использо-

вания, эффективного количества электроприемников и постоянной времени нагрева токоведущих частей:

$$k_p = f(k_{и}; n_{э}; T_0).$$

При этом в РТМ 36.18.34.4–92 приняты следующие постоянные времени нагрева:

$T_0 = 10$ мин – для сетей напряжением до 1 кВ, выполненных распределительными шинпроводами и шкафами;

$T_0 = 2,5$ ч – для магистральных шинпроводов, вводно-распределительных устройств и цеховых трансформаторных подстанций;

$T_0 \geq 30$ мин – для кабелей напряжением 6–10 кВ, питающих цеховые трансформаторные подстанции и распределительные пункты. Расчетная мощность нагрузки для этих элементов определяется при $K_p = 1$.

2. Коэффициент заполнения графика:

$$k_{з.г} = \frac{P_c}{P_m} = \frac{1}{k_m}.$$

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

3. Коэффициент формы графика:

$$k_{ф.г} = \frac{P_{ск}}{P_c}, k_{ф.г} \geq 1.$$

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

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

Например, режим работы насосного агрегата привода нефтедобывающего станка-качалки характеризуется периодическим графиком нагрузки (рис. 2.9). Коэффициент формы такого графика составляет около 2-х, что приводит к высоким потерям мощности и энергии в элементах электроснабжения данной установки. Поэтому, с целью снижения потерь, к одному источнику питания (трансформатору) подключают несколько таких агрегатов, в результате чего выравнивается групповой график нагрузки.

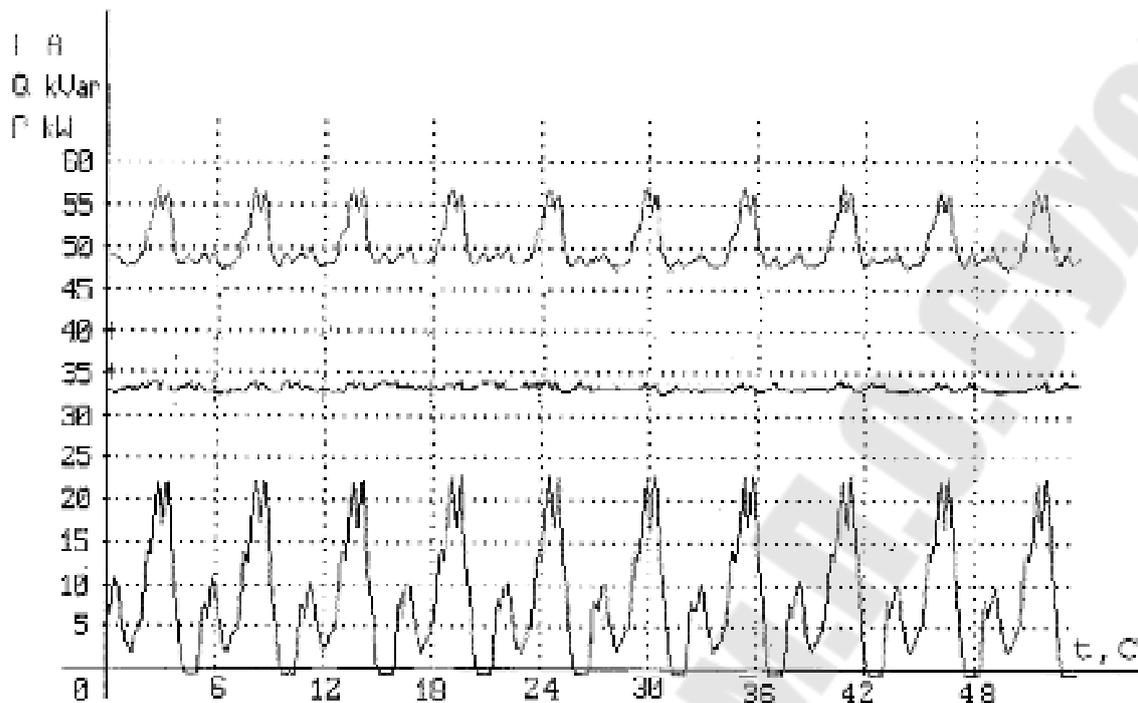


Рис. 2.9. График нагрузки агрегата нефтедобычи типа ШГН с двигателем марки Asle ($P_n = 50$ кВт, $\cos f_n = 0,85$)

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

Коэффициенты, характеризующие режимы работы электроприемников (потребителей электроэнергии):

1. Коэффициент включения:

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

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

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

$$K_B = \frac{\sum k_{Bi} P_{Hi}}{\sum P_{Hi}}.$$

Коэффициент включения K_B характеризует использование электроприемников по времени.

2. Коэффициент загрузки:

$$k_3 = \frac{P_{\text{св}}}{P_{\text{н}}},$$

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

$$P_{\text{св}} = \frac{T_{\text{ц}}}{T_{\text{в}}} \cdot P_{\text{с}}; \quad P_{\text{св}} = \frac{\sum P_i \cdot \Delta t_i}{T_{\text{в}}},$$

где $T_{\text{ц}}$ – время цикла; $T_{\text{в}}$ – время включения; $P_{\text{с}}$ – средняя нагрузка за цикл или смену.

Коэффициент загрузки характеризует использование электроприемников по мощности.

3. Коэффициент использования:

$$k_{\text{и}} = \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{н}}}.$$

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

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum k_{\text{и}i} \cdot P_{\text{н}i}}{\sum P_{\text{н}i}}.$$

Коэффициент использования характеризует использование электроприемников по мощности и по времени – это один из основных коэффициентов, применяемых при определении расчетной нагрузки. Его значения приведены в справочниках для электрооборудования различных типов (например, для металлообрабатывающих станков $k_{\text{и}} = 0,12-0,2$).

$$k_{\text{и}} = k_3 \cdot k_{\text{в}}.$$

Наряду с коэффициентами использования в справочной литературе приведены также коэффициенты мощности электроприемников. Эти параметры используются для определения расчетной нагрузки, расхода электроэнергии, для составления электрических балансов (табл. 2.2).

Таблица 2.2

**Характеристики режимов работы
некоторых электроприемников**

Наименование электроприемника	$k_{\text{н}}$	$\cos \varphi$
1. Насосы	0,7	0,8
2. Вентиляторы и компрессоры	0,6–0,75	0,75–0,85
3. Конвейеры: – до 10 кВт – свыше 10 кВт	0,4 0,55	0,4 0,7
4. Краны	0,25	0,5–0,6
5. Сушильный шкаф	0,8	1
6. Металлорежущие станки (МРС)	0,12–0,2	0,4–0,65
7. Сварочные трансформаторы	0,3	0,4
8. Печи сопротивления	0,6–0,75	0,95
9. Индукционные печи	0,7	0,75

ТЕМА 3

ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИЕМНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Все приемники электроэнергии характеризуются различными параметрами, а режимы их работы описываются индивидуальными графиками нагрузки. При этом с целью анализа режимов электропотребления и определения расчетных нагрузок электроприемники, схожие по назначению и роли в технологическом процессе производства, а также с похожими графиками нагрузки и их показателями, объединены в характерные группы:

- электродвигатели силовых и общепромышленных установок;
- электродвигатели производственных станков;
- осветительные электроустановки;
- электрические печи и электротермические установки;
- выпрямительные и преобразовательные установки.

1. Электродвигатели силовых и общепромышленных установок. К ним относятся компрессоры, насосы, вентиляторы, воздушные электроустановки, подъемные и транспортные установки.

Данные электроприемники присутствуют практически на всех потребителях электроэнергии. На их долю приходится 45–60 % общего электропотребления предприятий. Мощность этих электроприемников колеблется от долей единицы до тысяч киловатт. В зависимости от мощности они снабжаются электрической энергией на напряжении от 0,22 до 10 кВ.

Режим работы таких установок, как правило, продолжительный. Исключение составляют подъемно-транспортные установки, работающие, как правило, в повторно-кратковременном режиме. Подъемно-транспортные установки используются для технологических процессов как в цехах, так и между ними (конвейеры, подъемники, краны, лифты, лебедки).

Перерыв в электроснабжении компрессоров, насосов, вентиляторов 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 электроснабжения насосной станции на металлургическом заводе может вывести из

строю 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 I категории надежности электроснабжения.

Электроприемники рассматриваемой группы, как правило, 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.

Для электропривода крупных насосов, компрессоров и вентиляторов могут применяться синхронные двигатели, работающие с опережающим коэффициентом мощности.

Для подъемно-транспортных 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) ко II категории, а в некоторых случаях – к I. В подъемно-транспортных устройствах применяется как переменный, так и постоянный ток. В большинстве случаев нагрузку от подъемно-транспортных устройств на стороне переменного тока следует считать симметричной по всем трем фазам.

2. Электродвигатели производственных станков. Электроприемники данной группы встречаются практически на любом предприятии. Наиболее многочисленная группа – металлообрабатывающие станки. Они выполняют обработку деталей, материалов и изделий методами резания, штамповки, шлифовки и т. д.

Для электропривода станков используют все типы электродвигателей. Мощность двигателей чрезвычайно разнообразна и изменяется от долей до сотен киловатт и больше. Напряжение сети – 660–380/220 В с частотой 50 Гц.

В станках, где требуется высокая скорость вращения, применяются двигатели постоянного тока, которые получают питание от выпрямительных установок.

В зависимости от производственного процесса показатели графиков производственных станков изменяются в очень широких пределах: $k_B = 0,5–0,85$; $k_H = 0,12–0,6$; $k_C = 0,4–0,7$; $\cos \varphi = 0,4–0,7$.

Производственные станки механических, механосборочных, инструментальных, кузнечно-прессовых цехов относят, как правило, ко II и III категориям надежности электроснабжения. Электродвигатели производственных станков ремонтных цехов, как правило, относят к III категории. К I категории надежности относятся станки, обрабатывающие дорогостоящие детали и изделия, а также станки, перерыв в питании которых недопустим по условиям техники безопасности (возможны травмы обслуживающего персонала).

3. Осветительные электроустановки. Характеризуются удельной плотностью нагрузки, которая в зависимости от технологического процесса может находиться в широких пределах: $P_{уд} = 4-100 \text{ Вт/м}^2$.

Например, для предприятий, где требуется высокое зрительное напряжение (ювелирное производство), $P_{уд} = 100 \text{ Вт/м}^2$.

Существуют следующие типы осветительных установок:

- 1) установки с лампами накаливания: $\cos\varphi = 1$, $P_n = 15-500 \text{ Вт}$;
- 2) установки с люминесцентными лампами низкого давления: $\cos\varphi = 0,9$, $P_n = 18-80 \text{ Вт}$;
- 3) установки с люминесцентными лампами высокого давления (ДРЛ, ДНаТ, ДРИ): $\cos\varphi = 0,6$, $P_n = 15-3500 \text{ Вт}$.

Особенность осветительных электроприемников заключается в том, что они являются однофазными электроприемниками. При этом группируются по фазам таким образом, чтобы несимметрия составляла 5–10 %. Работают в продолжительном режиме.

Расход электроэнергии на освещение ориентировочно составляет:

- в металлургии – 5 %;
- в машиностроении – 15 %;
- на предприятиях легкой промышленности 30 %;
- в коммунально-бытовом секторе – 40 %.

Номинальное напряжение осветительных установок по условию техники безопасности ограничено на уровне 220 В. Поэтому для осветительных установок промышленных предприятий применяются напряжения от 6 до 220 В.

С точки зрения надежности электроснабжения допускаются кратковременные нарушения питания, составляющие несколько секунд. При этом существуют производства, где отключение освещения опасно для жизни людей. В этом случае применяют аварийное освещение, которое относится к I категории надежности электроснабжения.

Технические характеристики разных источников света:

1. Лампы накаливания: $H = 10-20 \text{ лм/Вт}$, КПД = 3–5 %;

2. Люминесцентные лампы: $H = 40\text{--}60$ лм/Вт, КПД = 40–60 %;
ДРИ: $H = 65\text{--}90$ лм/Вт.

При определении расчетных нагрузок от осветительных электроприемников необходимо учитывать потери мощности в пускорегулирующей аппаратуре (ПРА) люминесцентных ламп:

$$\text{ДРЛ, ДРИ} - k_{\text{ПРА}} = 1,1;$$

$$\text{ЛЛ} - k_{\text{ПРА}} = 1,25.$$

В настоящее время электротехническая промышленность производит электронные ПРА (взамен электромагнитным). В этом случае потери в ПРА не учитываются. Основным недостатком люминесцентных источников света является наличие в них вредных паров ртути.

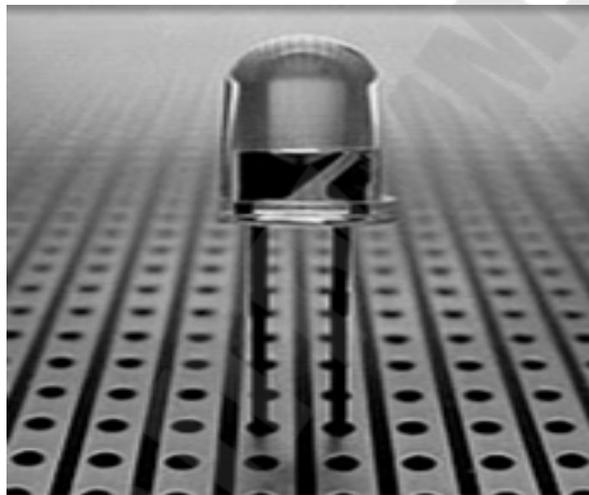


Рис.3.1. Светодиод

Наиболее перспективными источниками света, способными в скором будущем вытеснить лампы накаливания и даже люминесцентные лампы, являются светодиоды (рис. 3.1).

Светодиоды, или светоизлучающие диоды (англ. LED – light emitting diodes), хорошо известны каждому как миниатюрные индикаторы, применяемые в бытовой технике.

Светодиод – полупроводниковый прибор с электронно-дырочным p - n -переходом или контактом металл-полупроводник, генерирующий при прохождении через него электрического тока оптического излучения. Если к p - n -переходу подсоединить источник электрического тока плюсом к p -части, то через него потечет ток. При этом в момент встречи электрона и дырки выделяется энергия в виде излучения кванта света – фотона.

Светодиоды обладают высоким уровнем светоотдачи, малым энергопотреблением. Отсутствие нити накала благодаря нетепловой природе излучения светодиодов обуславливает срок службы до 100 000 часов или 11 лет непрерывной работы (срок, сравнимый с жизненным циклом многих осветительных установок). Отсутствие стеклянной колбы определяет очень высокую механическую прочность и надежность. Малое тепловыделение и низкое питающее напряжение гарантируют высокий уровень безопасности, а безинерционность делает светодиоды незаменимыми, когда нужно высокое быстродействие. Но так же следует заметить, что не смотря на все преимущества, у светодиодов есть и свои недостатки, такие, как относительно высокая стоимость и необходимость специального источника питания на 10–12 В постоянного тока, что в свою очередь ведет к дополнительным денежным затратам и потерям электроэнергии.

4. Электрические печи и электротермические установки. Используются для преобразования электрической энергии в тепловую.

По принципу действия различают следующие типы электрических печей:

- 1) печи сопротивления;
- 2) дуговые печи (выделяют тепло за счет горения дуги);
- 3) индукционные и электротермические установки;
- 4) установки смешанного нагрева.

Электрические печи являются одними из наиболее энергоемких и ответственных приемников электроэнергии. Их мощность составляет от нескольких кВт до сотен МВт.

Электрические печи сопротивления делятся на печи прямого и косвенного действия. В печах косвенного действия теплоту получают за счет прохождения тока по нагревательному элементу (спирали).

$$f = 50 \text{ Гц}; \cos\varphi = 1; U_n = 380 \text{ В.}$$

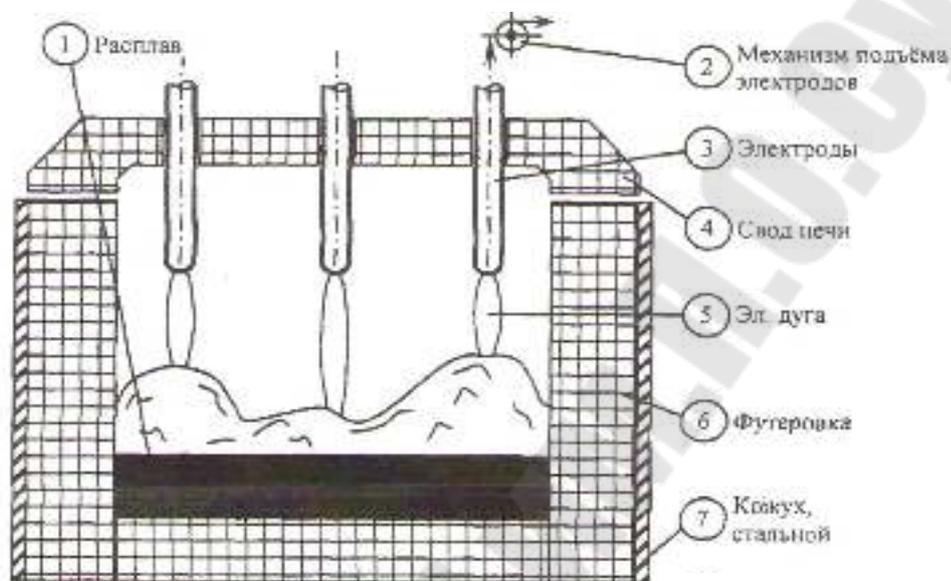
Такие печи выпускают на напряжение до 1000 В. Они могут быть одно- и трехфазными и, как правило, применяются для плавки цветных металлов ($P_n = 50\text{--}600 \text{ кВт}$), а также для термообработки ($P_n = 5\text{--}10000 \text{ кВт}$).

Печи прямого действия используют теплоту, возникающую за счет протекания тока в самом изделии (например, печи для получения изделий из графита. Выпускаются одно- и трехфазными: $U_n = 0,38; 6; 10 \text{ кВ}$, $S_n = 800\text{--}15000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $\cos\varphi = 0,7\text{--}0,8$).

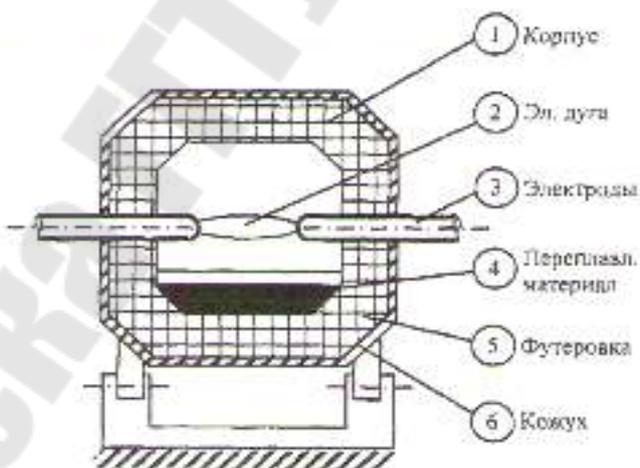
Также печи прямого действия используются для получения изделий из хрусталя: $S_n = 400\text{--}4000 \text{ кВА}$; $U_n = 380 \text{ В}$; $f = 50 \text{ Гц}$.

В большинстве случаев печи сопротивления относятся ко II категории надежности электроснабжения. Они работают в продолжительном режиме.

Дуговые электрические печи по способу нагрева делятся на печи прямого и косвенного действия (рис. 3.2).



а)



б)

Рис. 3.2. Дуговые сталеплавильные печи:
а – прямого действия; б – косвенного действия

Рассмотрим дуговую сталеплавильную печь (ДСП). Такие печи питаются от специального печного трансформатора, позволяющего управлять электрической дугой путем регулирования напряжения от 500 до 1000 В. Дуга в печах прямого действия возникает между электродами (выполняются из медно-графитового сплава) и шихтой (металл со специальными до-

бавками). При этом ток дуги достигает 100–150 кА, $\cos\varphi = 0,85–0,9$, $S = 400–200000$ кВ · А, $U_1 = 6, 10, 35, 110$ кВ, $U_{II} = 500–1000$ В.

Часто дуговые сталеплавильные печи различают не по мощности, а по количеству стали в танках (электросталь). Для получения большого количества стали применяют вакуумные дуговые печи. Питание таких печей осуществляется на постоянном напряжении. По надежности электроснабжения дуговые сталеплавильные печи относятся к I категории.

Печи, в которых дуга горит между электродами, и за счет этого плавится металл, называют печами косвенного действия. Они являются однофазными: $U_n = 6, 10$ кВ; $S_n = 125–600$ кВ · А. Используется, как правило, для выплавки меди и ее сплавов. Являются электроприемниками переменного тока и относятся к I категории надежности электроснабжения.

Индукционные и электротермические установки подразделяются на плавильные печи и установки для закалки стальных изделий и установки для сквозного нагрева диэлектриков.

При плавке металла в индукционных печах теплота выделяется в самом металле за счет прохождения по нему индукционного тока.

При этом плавильные печи выпускаются со стальным сердечником и без него (рис. 3.3).

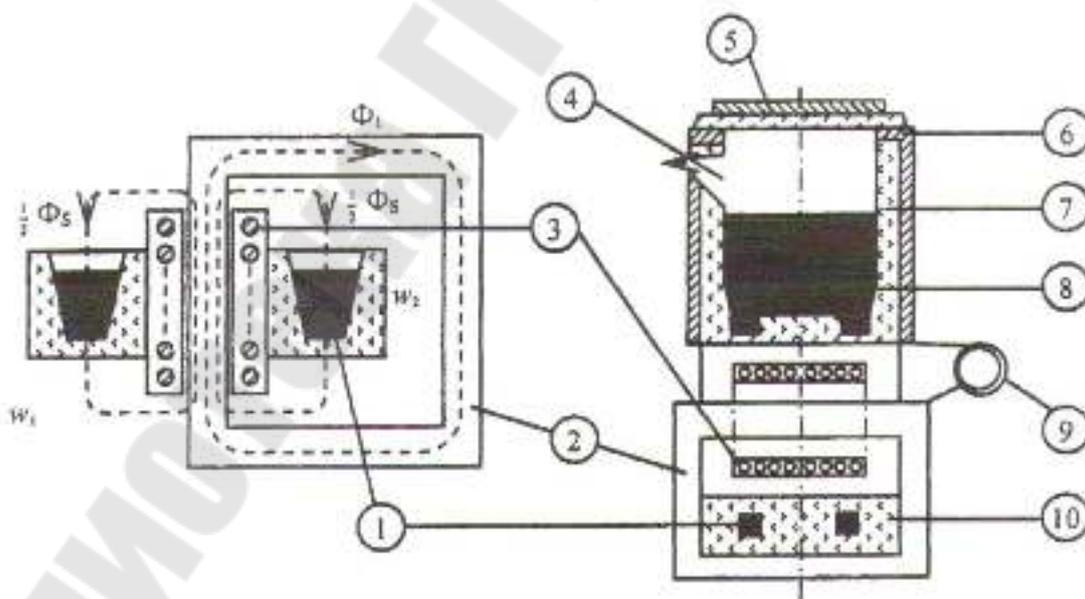


Рис. 3.3. Индукционная электроустановка

Возникающий в короткозамкнутом витке (канал с металлом) ток, проходя по металлу, выделяет теплоту согласно закону Джоуля-Ленца.

По конструкции (рис. 3.3) индукционные каналные печи представляют собой футерованную ванну 7, заключенную в металлический корпус 6. Индукционная единица состоит из индуктора 3, шихтованного магнитопровода 2 из трансформаторной стали и подового камня 10 с охватывающими индуктор плавильными каналами 1. Для слива металла 8 через сливной носок 4 печь наклоняется при помощи гидро- или пневмопривода. Загрузку печи ведут сверху через проем, закрытый во время плавки футерованной крышкой 5. Подъем крышки производится гидро- или пневмоприводом. Подовый камень 10 охлаждается воздухом при помощи вентилятора 9 через зазор между индуктором и подовым камнем. Достоинством таких печей является высокий КПД, составляющий 60–95 %.

Таким образом, печи со стальным сердечником называют канальными: $S_n = 125\text{--}2000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $U = 0,38; 6; 10 \text{ кВ}$. Выпускаются в одно-, двух- и трехфазном исполнении и состоят из индуктора (сердечник и обмотка), конденсаторной батареи (т. к. индуктор имеет низкий $\cos \varphi$), коммутационно-защитной аппаратуры и аппаратуры управления. Такие печи используют для плавки цветных металлов, чугуна, высококачественно стали ($\cos \varphi = 0,2\text{--}0,8$).

Для плавки качественной стали используют печи с $S = 80\text{--}2000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, $f = 500\text{--}2400 \text{ Гц}$. Для получения повышенной частоты применяют тиристорные преобразователи.

Индукционные электроустановки чаще относят ко II категории надежности электроснабжения.

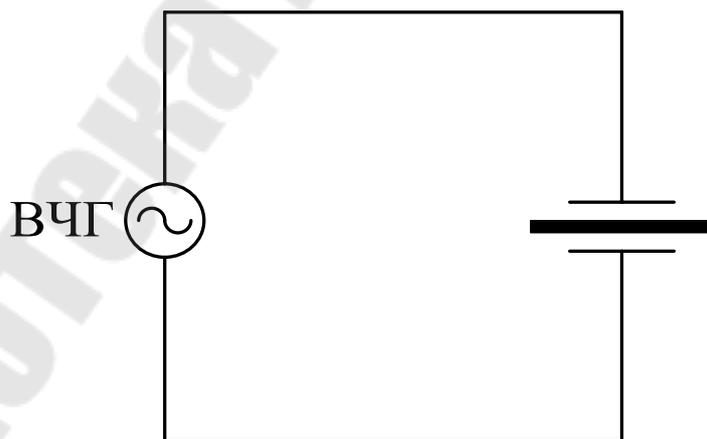


Рис. 3.4. Электрическая схема установки нагрева диэлектриков

В установках для нагрева диэлектриков (электротермические установки) нагреваемый материал помещается в электрическое поле конденсатора, и нагрев происходит за счет токов смещения (рис. 3.4).

Эта группа установок широко применяется для клейки и сушки древесины, нагрева пресс порошков, пайки и сварки пластиков, стерилизации продуктов и т. п. Питание осуществляется от высокочастотного генератора (ВЧГ) током с частотой 20–40 МГц и выше. В отношении бесперебойности электроснабжения установки для нагрева диэлектриков относятся к приемникам электрической энергии II категории.

Установки смешанного нагрева 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 – 100 МВ · А (например, печь для возгонки желтого фосфора). Коэффициент мощности 0,85–0,92. В отношении бесперебойности электроснабжения печи для рудотермических процессов относятся к приемникам электрической энергии II 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 с вторичным напряжением 45–60 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 I категории.

При электроснабжении цехов, имеющих вакуумные электрические печи всех типов, необходимо учитывать, что перерыв в питании вакуумных насосов приводит к аварии и браку дорогостоящей продукции. Эти печи следует отнести к приемникам электрической энергии II категории.

Электросварочные установки – это специфические электроприемники, особенно при расчете электрических нагрузок. По технологии электрическая сварка делится на дуговую, контактную и специальную.

Основным оборудованием дуговых электросварочных установок является источник питания, электропривод перемещения тележек и подачи сварочной проволоки, устройство для поджигания и стабилизации дуги, коммутационно-защитная аппаратура и аппараты управления.

Источники питания дуговых сварочных установок:

- постоянного тока – электромашинные преобразователи, выпрямители и передвижные сварочные подстанции;
- переменного тока, которые представляют собой одно- или трехфазные трансформаторы.

Чаще дуговая электросварка осуществляется на постоянном токе. Сварочное оборудование для контактной электросварки также питается постоянным или переменным током. При использовании источников питания постоянного тока сварочная нагрузка распределяется по трем фазам сети равномерно, однако график нагрузки остается неравномерным.

Коэффициент мощности этих установок при номинальной нагрузке составляет 0,7–0,8, и такие установки относительно длительное время работают в режиме холостого хода ($\cos\varphi_{xx} = 0,4$).

Электросварочные установки переменного тока представляют собой однофазную нагрузку в виде сварочных трансформаторов для дуговой сварки и сварочных аппаратов контактной сварки, питающихся от трехфазного силового трансформатора.

Практически всегда сварка на переменном токе представляет собой однофазную нагрузку с неравномерной загрузкой фаз и низким $\cos\varphi$ (0,3–0,35).

К специальным видам сварочных установок относятся:

- высокочастотные;
- лазерные;
- плазменные;
- электронно-лучевые.

Такие виды сварки используются, когда необходимо получить высокое качество сваривания. Сварка, осуществляемая при частоте более 50 Гц, менее энергоемка. Ее применяют при производстве сварных труб, при сварке оболочек электрических кабелей. При этом сварка осуществляется в трубоэлектросварочных станках ($P_n = 50$ МВт, $U_n = 6–10$ кВ).

Сварочные установки относятся ко II категории надежности электроснабжения.

5. Выпрямительные и преобразовательные установки используются для преобразования трехфазного тока в постоянный или трехфазного тока промышленной частоты 50 Гц в трехфазный или однофазный ток пониженной, повышенной или высокой частоты.

В зависимости от типа преобразователей тока установки делятся:

- 1) на полупроводниковые преобразовательные установки;
- 2) на преобразовательные установки с ртутными выпрямителями;
- 3) на преобразовательные установки с двигателями-генераторами;
- 4) на 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 др. 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, дополнительные затраты электроэнергии на новое выделение этого же металла.

Электролизные установки должны снабжаться электрической энергией, как приемники II категории, но допускают кратковременные перерывы в питании. Режим работы электролизных установок дает достаточно равномерный и симметричный по фазам график нагрузки. Коэффициент мощности электролизных установок составляет 0,85–0,9. Особенностью электролизного процесса является необходимость поддержания постоянства выпрямленного тока. В связи с этим возникает необходимость регулирования напряжения со стороны переменного тока.

Преобразовательные установки для внутрипромышленного 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 I или II категории, допускающие кратковременный перерыв в питании. Питание этих установок производится переменным током промышленной частоты напряжением 0,38–35 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 I и II категорий.

Коммунально-бытовые приемники и потребители электроэнергии

К коммунально-бытовым потребителям электроэнергии относятся общественные и административные учреждения (школы, детские сады, поликлиники, больницы, театры и т. д.), жилые дома и коммунальные предприятия (бани, прачечные, столовые, предприятия бытового обслуживания).

Коммунально-бытовые потребители расходуют порядка 25–35 % общего энергопотребления республики. При этом доля потребляемой ими электроэнергии постоянно растет.

Рассмотрим характеристики основных приемников электроэнергии коммунально-бытовых потребителей (табл. 3.1).

Таблица 3.1

**Характеристики основных приемников электроэнергии
коммунально-бытовых потребителей**

Наименование	P_n , кВт	W , кВт · ч/год	K_n
1. Электроплита	2–7	440	0,6
2. Оборудование для подогрева жидкости	1–4	300	0,5
3. Холодильник	0,18–0,3	570	0,6
4. Телевизор	0,06	180	0,8
5. Компьютер	0,3	40	0,4
6. Пылесос	1–1,5	65	0,7
7. Утюг	2	30	0,8
8. Печь СВЧ	0,8–1,5	120	0,5

Основным приемником электроэнергии в жилищном секторе является холодильник. На долю холодильников приходится около 25 % всей расходуемой электроэнергии, на долю освещения – около 40 %.

Энергопотребление является одной из важнейших характеристик бытовой электротехники, поэтому в 1992 г. с целью повышения эффективности электробытовых приборов Европейским сообществом была принята директива 92/75/ЕЕС, согласно которой с января 1995 г. каждый прибор европейских производителей обязан иметь наклейку, отображающую ее энергетические характеристики. На этой наклейке латинскими буквами отображаются классы энергоэффективности (от А до G). Например, для холодильников энергопотребление класса А примерно в 3 раза меньше, чем энергопотребление такого же холодильника класса G.

**Сельскохозяйственные
потребители электроэнергии**

В сельских районах находятся следующие потребители электроэнергии:

1. Жилые дома (жилым сельским домом при расчете нагрузок считается многоквартирный дом или квартира в многоквартирном доме, имеющая отдельный счетчик электроэнергии).

2. Предприятия, обслуживающие население (больницы, школы, магазины, бани и т. д.).

3. Производственные потребители колхозов и совхозов (животноводческие фермы, зерноочистительные пункты, хранилища сельскохозяйственной продукции, котельные и т. д.).

4. Предприятия по переработке сельскохозяйственной продукции (молокозаводы, консервные заводы, мясокомбинаты и т. д.).

Характеристики этих потребителей, необходимые для определения расчетных нагрузок, изложены в справочной литературе.

На предприятиях по производству сельскохозяйственной продукции производственный процесс осуществляется средствами, оказывающими воздействие на животных и растения. К таким средствам относятся системы электрического нагрева:

1) электрокалориферы ($P_n = 5-100$ кВт), используемые для создания оптимальных параметров воздуха (температура, влажность, концентрация пыли и т.д.);

2) электроводонагреватели ($P_n = 5-1000$ кВт) для нагрева воды при отсутствии централизованного горячего водоснабжения;

3) электроустановки для сушки сельскохозяйственной продукции и кормов;

4) лампы термоизлучателей, используемые для облучения скота и птицы.

Для привода механизмов в сельском хозяйстве, как правило, используются асинхронные двигатели (синхронные двигатели и двигатели постоянного тока используются очень редко).

Мельницы, измельчители кормов, овощетерки, насосы для орошения, подъемно-транспортные механизмы – механизмы, для которых специально выпускаются электродвигатели, что обусловлено сложными условиями эксплуатации (химически активная атмосфера животноводческих помещений, большая запыленность зерноочистительно-сушильных комплексов, высокая влажность в кормоцехах, а также необходимость работать под открытым небом).

Также большое значение в сельском хозяйстве имеют осветительные и облучающие электроустановки. Они оказывают биологическое воздействие на животных и растения. Облучатели используются для дезинфекции воздуха, ультрафиолетового облучения, обогрева инфракрасными лучами.

На долю сельскохозяйственных потребителей электроэнергии приходится около 11 % всей расходуемой электроэнергии в республике.

Потребители электроэнергии электрифицированного транспорта

В настоящее время электротяга применяется на всех видах транспорта (магистральный, городской, промышленный, сельскохозяйственный, водный, воздушный).

На транспорте нашли применение 2 системы тока (табл. 3.2):

- система постоянного тока;
- однофазного переменного тока промышленной частоты.

Таблица 3.2

**Характеристика питания потребителей
электрифицированного транспорта**

Вид транспорта	Ток	Напряжение	
		тяговой подстанции, В	токоприемника, В
Трамвай, троллейбус	постоянный	600	550
Метро	постоянный	825	750
Железнодорожный	магистральный	однофазный,	3300
	пригородный	50 Гц	27500
Промышленный	подземный	постоянный	275, 600,
	наземный	постоянный,	1650,
переменный,		3300,	
	50 Гц	11000	250, 550, 1500, 3000, 10000
Электромобили	Постоянный (аккумуляторные батареи)	—	36, 72
Электрокары, электропогрузчики			24, 36, 72

На долю электрифицированного транспорта приходится 2–5 % общего расхода электроэнергии страны. В перспективе эта доля будет расти.

ТЕМА 4

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Определение расчетной нагрузки, является одной из основных задач электроснабжения. При этом различают 2 величины расчетной нагрузки:

- определяющая максимальный нагрев проводника;
- вызывающая максимальный износ изоляции.

Расчетной нагрузкой по пику нагрева проводника называется такая неизменная во времени нагрузка, которая обуславливает максимальный перегрев проводника над температурой окружающей среды. Расчетной нагрузкой по пику теплового износа изоляции называется такая неизменная во времени нагрузка, которая вызывает такой же максимальный тепловой износ изоляции, как и реальная, изменяющаяся во времени нагрузка.

Для решения практических задач используют наибольшую из этих двух нагрузок. В общем случае расчетный ток определяется по выражению

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_{\text{ср.взв}}};$$
$$\cos \varphi_{\text{ср.взв}} = \frac{W}{\sqrt{V^2 + W^2}},$$

где W – расход активной электроэнергии, кВт · ч; V – расход реактивной электроэнергии, квар · ч.

Величина расчетной нагрузки определяет выбор токоведущих элементов СЭС, а также обуславливает ее основные технико-экономические показатели. Так, если величина расчетной нагрузки превышена относительно фактической, то это приведет к увеличению капитальных затрат на СЭС. Если она меньше фактической, то это ведет к ускоренному износу оборудования, к увеличению потерь мощности и энергии, может привести к повреждению электрооборудования и перерывам электроснабжения.

Для определения расчетной нагрузки имеется большое количество методов, и все эти методы условно можно разделить на основные и вспомогательные. К основным методам относятся статистический и метод упорядоченных диаграмм показателей графиков нагрузки.

Вспомогательными методами являются метод коэффициента спроса, удельной мощности на единицу производственной площади, удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции либо оказываемых услуг.

Статистический метод определения расчетной нагрузки

Статистический метод основан на положении о том, что нагрузка, при числе электроприемников от 4-х и более, подчиняется нормальному закону распределения вероятности (закон Гаусса). При этом плотность распределения вероятности нагрузки определяется выражением

$$\varphi(p) = -\frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(P-P_c)^2}{2\sigma^2}},$$

где σ – среднеквадратическое отклонение нагрузки от математического ожидания.

В основе статистического метода заложено одно из основных правил теории вероятности случайных величин, подчиняющихся нормальному закону распределения (правило трех сигм): вероятность того, что случайная величина, подчиняющаяся нормальному закону распределения вероятности, отклонится от своего математического ожидания на величину, превышающую утроенное значение среднеквадратического отклонения, практически равна 0:

$$P = 1 - 0,9973 = 0,0027.$$

Распространяя данное правило к определению расчетной нагрузки, очевидно, что с вероятностью 0,9973 электрическая нагрузка будет находиться в следующих пределах:

$$P_c - 3\sigma \leq P \leq P_c + 3\sigma.$$

Тогда критические значения нагрузки могут быть определены по выражениям:

$$P_{\max} = P_c + 3\sigma, P_{\min} = P_c - 3\sigma;$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (P_i - P_c)^2 \cdot \Delta t_i}{T}}, P_c = \frac{\sum P_i \cdot \Delta t_i}{T}.$$

В практических целях не целесообразно определять расчетную (максимальную) нагрузку с очень высокой вероятностью, поэтому выражение для определения P_p принимает вид:

$$P_p = P_c + \beta \cdot \sigma,$$

где β – кратность меры рассеивания (коэффициент Стьюдента).

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

Таблица 4.1

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	0,003

На практике при определении расчетной нагрузки без учета теплового износа изоляции принимают $\beta = 2,5$. В этом случае вероятность того, что реальная нагрузка превысит расчетную, составляет 0,005 или 0,5 % (табл. 4.1).

В некоторых случаях $\beta = 1,65$, при этом вероятность превышения реальной нагрузки составляет 0,05 или 5%, что является приемлемым для инженерных расчетов. Под вероятностью превышения реальной нагрузки расчетной понимается доля времени, в течение которого реальная нагрузка может быть больше, чем расчетная.

Для современных потребителей электроэнергии, режимы работы которых отличаются нестабильностью, закон распределения вероятности нагрузки иногда отличается от нормального.

Вероятности нагрузки при равномерном законе распределения:

$$P_c - \sqrt{3}\sigma < P < P_c + \sqrt{3}\sigma, P_m = P_p = P_c + \sqrt{3}\sigma.$$

При этом все значения нагрузки равновероятны.

Статистический метод применяется на стадии реконструкции СЭС, когда известны графики нагрузки.

Метод упорядоченных диаграмм

В случае, когда количество электроприемников в группе более 3-х, для определения расчетной электрической нагрузки при проектировании СЭС используется метод упорядоченных диаграмм. Данный метод является основным для определения расчетной нагрузки для напряже-

ния до 1 кВ и применяется в основном при проектировании цехового электроснабжения. Сущность метода упорядоченных диаграмм заключается в установлении связи между расчетной мощностью нагрузки и показателями режимов работы электроприемников группы:

$$P_M = K_M \cdot K_{\text{и}} \cdot P_{\text{уст}},$$

где K_M – коэффициент максимума графика нагрузки; $K_{\text{и}}$ – групповой коэффициент использования; $P_{\text{уст}}$ – установленная мощность электроприемников в группе.

С 1992 г. выражение для определения расчетной мощности нагрузки унифицировано и имеет вид:

$$P_p = K_p \cdot P_{\text{см}} = K_p \cdot K_{\text{и}} \cdot P_{\text{уст}},$$

где K_p – коэффициент расчетной активной нагрузки.

В то время, как $K_M \geq 1$, значения K_p могут быть как больше, так и меньше единицы, в зависимости от того, на каком уровне СЭС определяется расчетная нагрузка.

Метод упорядоченных диаграмм основан на следующем алгоритме:

1. Определение установленной мощности группы электроприемников:

$$P_{\text{уст}} = \sum_1^n P_{\text{пасп}i}.$$

При этом значения $P_{\text{пасп}i}$ электроприемников, работающих в повторно-кратковременном режиме не приводятся к длительному режиму работы;

2. Определение группового коэффициента использования:

$$K_{\text{и}} = \frac{\sum k_{\text{и}i} \cdot P_{\text{н}i}}{\sum P_{\text{н}i}} = \frac{\sum k_{\text{и}i} \cdot P_{\text{н}i}}{P_{\text{уст}}},$$

где $k_{\text{и}i}$ – коэффициент использования i -го электроприемника, принимается по справочным данным в зависимости от наименования электроприемника.

3. Определение эффективного количества электроприемников в группе:

$$n_3 = \frac{(\sum P_{\text{н}i})^2}{\sum P_{\text{н}i}^2} = \frac{P_{\text{уст}}^2}{\sum P_{\text{н}i}^2}.$$

Эффективное количество электроприемников $n_э$ – такое количество электроприемников, одинаковых по мощности и по режиму работы, которое обеспечивают такую же расчетную нагрузку, как и реальное количество электроприемников, разных по мощностям и режимам работы.

4. Определение по справочным номограммам коэффициента расчетной активной нагрузки:

$$K_p = f(K_{и}; n_э; T_о),$$

где $T_о$ – постоянная времени нагрева элемента СЭС, на который определяется расчетная нагрузка:

1) $T_о = 10$ мин – цеховые электросети, выполненные распределительными шинопроводами (ШРА) и распределительными шкафами (ШР или ПР);

2) $T_о = 2,5$ ч – магистральные шинопроводы (ШМА), вводно-распределительные устройства (ВРУ), цеховые трансформаторные подстанции (ЦТП);

3) $T_о = 30$ мин – для сетей 6–10 кВ. В этом случае $K_p = 1$ и не зависит от $K_{и}$ и $n_э$.

5. Определяется расчетная активная нагрузка:

$$P_p = K_p \cdot K_{и} \cdot P_{уст.}$$

6. Определение расчетной реактивной нагрузки. При этом возможны 2 случая:

1) если $T_о = 10$ мин, то $Q_p = K_{рм} \cdot \sum (P_{нi} \cdot k_{иi} \cdot \text{tg}\varphi_i)$,

где $\text{tg}\varphi_i$ – коэффициент реактивной мощности i -го электроприемника в группе, определяется по справочным данным в зависимости от наименования электроприемника; $K_{рм}$ – коэффициент расчетный реактивной нагрузки:

$$K_{рм} = \begin{cases} 1,1 & \text{при } n_э \leq 10 \\ 1 & \text{при } n_э > 10; \end{cases}$$

2) если $T_о = 2,5$ ч (ШМА, ВРУ, ЦТП), а также при $T_о = 30$ мин (сети 6–10кВ), то

$$Q_p = P_p \cdot \text{tg}\varphi_{\text{ср.взв}},$$

где $\text{tg}\varphi_{\text{ср.взв}}$ – средневзвешенный коэффициент реактивной мощности группы электроприемников:

$$\text{tg}\varphi_{\text{ср.взв}} = \frac{\sum P_{нi} \cdot \text{tg}\varphi_i}{\sum P_{нi}} = \frac{\sum P_{нi} \cdot \text{tg}\varphi_i}{P_{уст}} = \frac{V}{W}.$$

7. Определение полной расчетной нагрузки:

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

8. Определение расчетного тока:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_H}.$$

Полученный ток используется для выбора элементов электрической сети по условию допустимого нагрева. При этом условие допустимого нагрева является основным для проектирования систем цехового электроснабжения. Исключения составляют цеха, время использования максимальной нагрузки (T_M) которых > 5000 часов. В этом случае выбор элементов электроснабжения осуществляется по экономическим условиям (согласно ПУЭ).

Определение расчетной нагрузки для группы из трех или менее электроприемников

В качестве расчетной нагрузки принимается суммарная установленная электрическая нагрузка электроприемников:

$$P_p = \sum \frac{P_{Hi}}{\eta_{Hi}}; Q_p = \sum q_{Hi} = \sum \frac{P_{Hi}}{\eta_{Hi}} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{Hi}; S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}; I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_H},$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{Hi}$ – номинальный коэффициент реактивной мощности электроприемника, указывается в паспортных данных электроприемника; η_{Hi} – номинальный коэффициент полезного действия электроприемника.

Для одиночных электроприемников в качестве расчетной принимается номинальная нагрузка, приведенная к длительному режиму работы:

$$p_p = \frac{P_{Hi}}{\eta_{Hi}} \sqrt{\text{ПВ}}; q_p = \frac{P_{Hi}}{\eta_{Hi}} \operatorname{tg} \varphi_{Hi} \sqrt{\text{ПВ}}; S_p = \sqrt{p_p^2 + q_p^2};$$

$$i_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_H} = \frac{P_H \cdot \sqrt{\text{ПВ}}}{\sqrt{3} U_H \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H}.$$

Полученное значение тока используется для расчета ответвлений к электроприемникам (выбор провода, магнитного пускателя, защитной аппаратуры).

Вспомогательные методы определения расчетной нагрузки

На практике в ряде случаев отсутствуют графики электрической нагрузки (ГЭН), а также сведения о режимах работы электроприемников. В этих случаях расчетную нагрузку определяют вспомогательными (эмпирическими) методами:

1. Метод коэффициента спроса.
2. Метод удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции.
3. Метод удельной плотности нагрузки на единицу производственной площади.

1. Метод коэффициента спроса

Расчетная нагрузка определяется по выражению

$$P_p = K_c \cdot P_{уст}; Q_p = P_p \cdot \operatorname{tg} \varphi,$$

где K_c – коэффициент спроса группы электроприемников. Значение K_c принимается по справочным таблицам в зависимости от состава группы электроприемников, наименования потребителя (физически K_c показывает долю суммы номинальных мощностей электроприемников, статистически отражающей максимальный, практически ожидаемый режим одновременной работы и загрузки некоторого сочетания установленных электроприемников); $\operatorname{tg} \varphi$ – средневзвешенный коэффициент реактивной мощности рассматриваемого потребителя электроэнергии, определяется по справочным данным.

Метод широко используется для определения расчетной нагрузки цехов предприятия и завода в целом, особенно на предпроектных стадиях.

2. Метод удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции

$$P_c = \frac{C_{уд} \cdot \Pi}{T}, \text{ кВт},$$

где Π – объем произведенной продукции за время T ; $C_{уд}$ – удельный расход электроэнергии, характеризует эффективность использования электроэнергии, $\frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{ед. прод.}}$:

$$C_{уд} = \frac{W}{\Pi}.$$

Метод используется для определения средней нагрузки участков, отделений и цехов, где технологическая продукция Π однородна и количественно мало меняется. Значения удельного расхода электроэнергии приводятся в справочной литературе в зависимости от наименования продукции, однако на практике эти значения могут отличаться. Значение удельных расходов электроэнергии целесообразно принимать по результату их измерения, а также по результатам разработки норм расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции.

3. Метод удельной плотности нагрузки на единицу производственной площади

Удельная плотность нагрузки определяется на основании обследования цехов действующих промышленных предприятий:

$$S_{уд} = \frac{S_p}{F_{ц}}, \quad \frac{\text{кВ} \cdot \text{А}}{\text{м}^2}; \quad P_{уд} = \frac{P_p}{F_{ц}}, \quad \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2},$$

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

Значения $S_{уд}$, $P_{уд}$ приводятся в справочной литературе в зависимости от наименования потребителя и площади его производственных помещений. Например, для металлообрабатывающих цехов $P_{уд} = 0,12\text{--}0,25 \text{ кВт/м}^2$.

Расчетная нагрузка определяется по выражению

$$P_p = P_{уд} \cdot F.$$

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

$$P_{р.о} = K_{с.о} \cdot P_{уд.о} \cdot F,$$

где $K_{с.о}$ – коэффициент спроса осветительной нагрузки; $P_{уд.о}$ – удельная мощность осветительной нагрузки, которая в зависимости от требований к освещенности изменяется в широких пределах (4–100 Вт/м²).

Определение расчетной нагрузки потребителей на напряжении 6–10 кВ

Задача заключается в поиске расчетной электрической нагрузки цехов потребителя, а также на шинах его источников питания (РП, ГПП, ПГВ). При определении расчетной нагрузки, как правило, используют вспомогательные методы расчета: метод коэффициента

спроса для определения расчетной силовой нагрузки и метод удельной плотности нагрузки для определения расчетной осветительной мощности.

Расчет выполняется в следующем порядке:

1. Методом коэффициента спроса определяется расчетная нагрузка каждого из участков (цехов) потребителя:

$$P_{pci} = K_{ci} \cdot P_{устi}; Q_{pci} = P_{pci} \cdot \operatorname{tg}\varphi_i,$$

где K_{ci} , $\operatorname{tg}\varphi_i$ – коэффициенты спроса и реактивной мощности i -го участка (цеха) предприятия, принимаются по справочным данным.

2. Методом удельной плотности нагрузки определяется расчетная осветительная мощность:

$$P_{poi} = K_{coi} \cdot P_{уд.oi} \cdot F_i,$$

где K_{coi} – коэффициент спроса осветительной нагрузки i -го участка; $P_{уд.oi}$ – коэффициент удельной мощности осветительной нагрузки, Вт/м²; F_i – площадь участка.

3. Рассчитывается суммарная полная нагрузка всех участков (цехов) потребителя:

$$P_{p\Sigma} = P_{p\Sigma i} + \Sigma P_{poi}; Q_{p\Sigma} = \Sigma Q_{pci}; S_{p\Sigma} = \sqrt{P_{p\Sigma}^2 + Q_{p\Sigma}^2}.$$

4. Определяется расчетная нагрузка предприятия в целом:

$$P_{pp} = K_o \cdot (P_{p\Sigma} + \Delta P_{л} + \Delta P_{т} + P_{вн}); Q_{pp} = K_o \cdot (Q_{p\Sigma} + \Delta Q_{т} + Q_{вн}),$$

где K_o – коэффициент одновременности максимумов нагрузки, находится в зависимости от группового коэффициента использования и количества присоединений (участков) потребителей, $K_o = f(K_{и}; n)$ по справочной номограмме и учитывает разновременность максимумов нагрузки отдельных участков потребителя; $P_{вн}$, $Q_{вн}$ – расчетная активная и реактивная нагрузки электроприемников высокого напряжения потребителя:

$$P_{вн} = K_c \cdot P_{н}^{BH}; Q_{вн} = P_{вн} \cdot \operatorname{tg}\varphi.$$

Из формул видно, что при определении расчетной нагрузки потребителя в целом учитываются потери мощности в элементах системы внутриводского электроснабжения (кабельные линии и цеховые трансформаторы). На стадии, когда нет схем электроснабжения и отсутствуют сведения об ее элементах, потери мощности в них допускается определять по приближенным выражениям:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_T &= 0,025 S_{p\Sigma} \\ \Delta Q_T &= 0,1 S_{p\Sigma} \end{aligned} \right\} \text{для трансформаторов,}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{л} &= 0,035 S_{p\Sigma} \\ \Delta Q_{л} &\approx 0 \end{aligned} \right\} \text{для кабелей.}$$

На основании расчета нагрузки потребителя выбираются высоковольтные кабельные линии, необходимые для канализации электроэнергии по территории потребителя, а также элементы РП, ГПП, ПГВ:

$$S_{рп} = \sqrt{P_{рп}^2 + Q_{рп}^2}; I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} U_H}.$$

Определение расчетной нагрузки при наличии однофазных электроприемников в группе

Наряду с 3-фазными электроприемниками потребители электроэнергии используют также и однофазные электроприемники (сварочные агрегаты, гальванические электроустановки, осветительные электроустановки и др.).

Если неравномерность однофазных электроприемников не превышает 15 % общей мощности 3-фазных электроприемников в группе, то они учитываются как 3-фазные электроприемники той же суммарной мощности. Неравномерность нагрузки по фазам рассчитывается по выражению

$$\Delta P = \frac{P_{н.маx} - P_{н.мин}}{P_{н.мин}},$$

где $P_{н.маx}$ – номинальная нагрузка наиболее нагруженной из фаз; $P_{н.мин}$ – номинальная нагрузка наименее нагруженной из фаз.

При наличии однофазных электроприемников, когда их количество не превышает 3-х, эквивалентная расчетная 3-фазная нагрузка определяется следующим образом:

1. Рассчитывается эквивалентная нагрузка по фазам:

$$\begin{aligned} P_a &= (P_{ab} + P_{ac})/2 + P_a, & P_b &= (P_{ab} + P_{bc})/2 + P_b, \\ P_c &= (P_{bc} + P_{ac})/2 + P_c; \end{aligned}$$

2. Выбирается наиболее загруженная фаза и определяется расчетная эквивалентная 3-фазная нагрузка (например, фазы А):

$$P_p = 3P_a.$$

Если однофазные электроприемники в группе включены на фазное напряжение, то в качестве расчетной принимается утроенное значение нагрузки наиболее загруженной фазы:

$$P_p = 3P_\phi.$$

Если же однофазные электроприемники подключены на линейное напряжение, то расчетная нагрузка определяется как произведение мощности наиболее мощного электроприемника на $\sqrt{3}$:

$$P_p = \sqrt{3} P_\phi.$$

Расчетная нагрузка для однофазных электроприемников в случае, когда их количество больше, чем 3, при одинаковых коэффициентах использования $K_{и}$ и мощности $\cos\varphi$ определяется по формулам:

$$P_p = 3 K_{и} K_p P_{н.мах.ф}; \quad Q_p = 3 K_{и} K_p P_{н.мах.ф} \cdot \operatorname{tg}\varphi,$$

где K_p – коэффициент расчетной активной нагрузки, определяется в зависимости от группового коэффициента использования $K_{и}$ и эффективного количества электроприемников в группе: $K_p = f(K_{и}; n_э)$.

При этом эффективное количество однофазных электроприемников определяется по выражениям:

$$1) n_э = \frac{2 \Sigma P_{н.о}}{3 P_{н.о.мах}} \text{ – для однофазных электроприемников,}$$

где $\Sigma P_{н.о}$ – сумма номинальных мощностей однофазных электроприемников в группе; $P_{н.о.мах}$ – наибольшая номинальная мощность однофазного электроприемника в группе.

$$2) n_э = \frac{(\Sigma P_{н.3i} + \Sigma P_{н.оi})^2}{\Sigma P_{н.3i}^2 + \Sigma P_{н.оi}^2} \text{ – для групп с однофазными и трехфазными электроприемниками,}$$

где $P_{н.3i}$ – номинальная нагрузка 3-фазного электроприемника; $P_{н.оi}$ – эквивалентная номинальная нагрузка однофазного электроприемника наиболее загруженной фазы.

В общем случае, когда количество однофазных электроприемников более 3-х, значения $K_{и}$ и $\cos\varphi$ различны, электроприемники

включены как на фазное, так и на линейное напряжение, расчетная нагрузка определяется в следующей последовательности:

1. Определяется средняя нагрузка по фазам. Например, для фазы А:

$$P_{c.a} = K_{и} P_{ab} p_{(ab)a} + K_{и} P_{ca} p_{(ca)a} + K'_{и} P_{ao},$$

где P_{ab} , P_{ca} – нагрузка присоединений на линейное напряжение; P_{ao} – нагрузка, присоединенная на фазное напряжение; $p_{(ab)a}$, $p_{(ca)a}$ – коэффициенты приведения нагрузок, включенных на линейное напряжение АВ и СА соответственно к фазе А. Значения этих коэффициентов принимаются по табл. 4.2 в зависимости от $\cos\varphi$.

Таблица 4.2.

Коэффициенты приведения однофазной нагрузки, включенной на линейное напряжение, к нагрузке, отнесенной к одной фазе трехфазного тока и фазному напряжению

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

2. Из полученных значений находится наиболее загруженная фаза по активной и реактивной мощности, например, фаза «а», после чего определяется эффективное число электроприемников. При этом коэффициент использования $K_{и}$ определяется для наиболее загруженной фазы. Например, для фазы А:

$$K_{и.а} = \frac{P_{см(а)}}{\left(\frac{P_{ab} + P_{ca}}{2}\right) + P_{ao}},$$

где P_{ab} , P_{ca} – суммарные номинальные мощности однофазных электроприемников, включенных на $U_{л}$ между наиболее загруженной фазой и смежные с ней фазы в 3-фазной системе; P_{ao} – суммарная номинальная мощность однофазных электроприемников, включенных на фазное напряжение наиболее загруженной фазы.

Далее определяется коэффициент расчетной мощности:

$$K_p = f(n_{э}, K_{и})$$

и расчетная нагрузка:

$$P_p = 3K_p K_{и} P_{\text{ном.макс.ф}} = 3K_p P_{\text{ср}}, \quad Q_p = 3Q_{\text{ср}} K_{\text{м.р.}}$$

Уточнение метода упорядоченных диаграмм

В 1992 г. метод упорядоченных диаграмм вышел в новой редакции, включающей следующие уточнения и дополнения:

1. Электроприемники повторно-кратковременного режима не приводятся к длительному режиму работы.

2. При определении расчетной нагрузки за установленную мощность многодвигательного станка принимается сумма номинальных мощностей одновременно работающих электродвигателей.

3. Коэффициент максимума K_m в выражении для определения P_p ($P_p = K_m K_{и} P_{\text{уст}}$) заменен на коэффициент расчетной нагрузки K_p , значения которого уточнены.

4. Для определения K_p используются две номограммы, полученные для различных уровней цехового электроснабжения. В одной номограмме значения K_p принимаются для питающих сетей напряжением до 1 кВ, выполненных распределительными шинопроводами, шкафами, коммутационными ящиками, с постоянной времени нагрева 10 мин. В другой номограмме значения K_p приведены для определения расчетной нагрузки на шинах 0,4 кВ цеховой трансформаторной подстанции (ЦТП), магистральных шинопроводах и вводно-распределительных устройствах ($T_0 = 2,5$ ч).

5. При определении расчетной нагрузки цехов заводских электрических сетей напряжением 6–10 кВ, $K_p = 1$. Для таких сетей $T_0 = 30$ мин.

6. Коэффициент совмещения максимумов нагрузки участков потребителя (K_{Σ}) заменен на коэффициент одновременности (K_0), значения которого определяются в зависимости от группового коэффициента использования и количества присоединений по справочным данным.

Метод упорядоченных диаграмм позволяет рассчитывать электрическую нагрузку с вероятностью 0,95.

Учет нагрузочной способности элементов системы электроснабжения при определении расчетной нагрузки статистическим методом

Нагрузочная способность электрической сети определяется постоянной времени нагрева и длительно допустимым током ее токоведущих элементов. На практике при определении расчетной нагрузки в качестве усреднения принимается интервал времени, который, как правило, составляет 30 мин.

Реальное утроенное значение постоянной времени нагрева токоведущих частей электрической сети часто отличается от 30 мин. В частности, анализ параметров проводников показывает, что для проводов и кабелей, проложенных в трубах, $T_0 = 30$ мин имеет место лишь при сечении 35 мм^2 . Во всех остальных случаях целесообразно определять расчетную нагрузку с учетом реального периода усреднения графика нагрузки T :

$$P_p = P_c + \frac{\beta \cdot \sigma_{30}}{\sqrt{\frac{T}{3 \cdot 10}}},$$

где σ_{30} – среднеквадратическое отклонение нагрузки, определяемое по графику с периодом усреднения 30 мин; T – реальный период усреднения графика нагрузки.

Учет реальной постоянной времени нагрева при определении расчетной нагрузки методом упорядоченных диаграмм

Для учета T_0 может использоваться способ, основанный на следующем алгоритме:

1. Пусть определены значения расчетного тока I_p и коэффициента расчетной нагрузки K_p группы электроприемников методом упорядоченных диаграмм. Руководствуясь условиями нагрева по справочным данным выбираем сечение проводника F для питания группы электроприемников;

2. Для выбранного проводника по справочнику определяем его постоянную времени нагрева T_0 , пересчитываем K_p с учетом реального значения T_0 относительно ее начального значения:

$$K_{pt} = 1 + \frac{K_p - 1}{\sqrt{\frac{3T_0}{3 \cdot 10}}}.$$

3. Уточняем исходный расчетный ток:

$$I'_p = I_p \cdot \frac{K_{pt}}{K_p}.$$

4. Используя значение I'_p , выбираем сечение проводника F' .

5. Проверяем условие $F' = F$. Если оно не выполняется, то расчет повторяется по пп. 2–4 до тех пор, пока сечение проводника, полученное на последней итерации, не будет равным сечению проводника, полученному на предпоследней итерации.

Алгоритм предполагает, что после нескольких итераций расчетная нагрузка группы электроприемников будет соответствовать длительно допустимому току проводника с его реальной постоянной времени нагрева T_0 . Учет реальной постоянной времени нагрева позволяет экономить металл в области больших сечений, повышает надежность СЭС в области малых сечений.

Пиковая нагрузка приемников и потребителей электроэнергии

Пиковой нагрузкой одного или нескольких электроприемников называется максимально возможная кратковременная электрическая нагрузка. Практически, продолжительность такой нагрузки составляет 0,5–2 с. Значение пиковой нагрузки необходимо для расчетов параметров срабатывания и выбора комплектов аппаратов защиты и автоматики в СЭС потребителей.

Пиковая нагрузка возникает при пуске электродвигателей, работе дуговых электропечей, электрической сварке и т. д.

1. Определение пиковой электрической нагрузки одиночных электроприемников

Для одиночных электроприемников пиковый ток приравнивается к их пусковому току:

$$i_{\text{пик}} = K_{\text{п}} \cdot i_{\text{н}},$$

где $K_{\text{п}}$ – кратность пускового тока по отношению к номинальному; $i_{\text{н}}$ – номинальный ток электроприемника, при этом нагрузка не приводится к длительному режиму работы (для электроприемников, работающих в ПКР).

$$i_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} \text{ – для электродвигателей;}$$

$$i_{\text{н}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_{\text{н}}} \text{ – для электрических печей и сварочных агрегатов.}$$

Значение кратности пуска $K_{\text{п}}$ обычно указывается в паспорте электроприемника. В случае, когда отсутствуют паспортные данные по значениям пускового тока электроприемника, в качестве величины пикового тока допускается принимать:

- 1) 5-кратное значение номинального тока $i_{\text{н}}$ асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором;
- 2) не ниже 2,5-кратного значения $i_{\text{н}}$ двигателя постоянного тока или асинхронного электродвигателя с контактными кольцами;
- 3) не ниже 3-кратного значения номинального тока для печных или сварочных трансформаторов.

Определение пикового тока группы электроприемников

Для группы электроприемников пиковый ток определяется, исходя из следующего предположения: пиковый ток возникает при работе всех электроприемников в группе в момент пуска электроприемника с наибольшим пусковым током. В инженерных расчетах допускается определять пиковый ток по упрощенному выражению

$$I_{\text{пик}} = i_{\text{п.макс}} + I_{\text{р}} - k_{\text{и}} \cdot i_{\text{н.макс}},$$

где $i_{\text{п.макс}}$ – наибольший из пусковых токов электроприемников в группе; $I_{\text{р}}$ – расчетный (максимальный) ток группы электроприемников; $i_{\text{н.макс}}$ – номинальный ток электроприемника с наибольшим пусковым током; $k_{\text{и}}$ – коэффициент использования электроприемника с наибольшим пусковым током.

Более точно пиковый ток группы электроприемников определяется по выражению:

$$I_{\text{пик}} = i_{\text{п.макс}} + K_{\text{р}}' \cdot \frac{\sqrt{(P_{\text{с}} - p_{\text{с}})^2 + (Q_{\text{с}} - q_{\text{с}})^2}}{\sqrt{3} U_{\text{н}}},$$

где $P_{\text{с}}$, $Q_{\text{с}}$ – средние активная и реактивная нагрузки группы электроприемников за наиболее загруженную смену; $p_{\text{с}}$, $q_{\text{с}}$ – средние активная и реактивная нагрузки электродвигателя с наибольшим пусковым током за наиболее загруженную смену; $K_{\text{р}}'$ – коэффициент расчетной нагрузки группы электроприемников без учета электродвигателя с наибольшим пусковым током.

Пиковый ток используется для определения параметров срабатывания и выбора коммутационно защитной аппаратуры элементов системы электроснабжения.

ТЕМА 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА И ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Определение расхода электроэнергии необходимо для осуществления денежных расчетов за электропотребление с энергоснабжающей организацией, для оценки удельного расхода электроэнергии на единицу выпускаемой продукции, с целью контроля энергоэффективности.

Расход электроэнергии, как правило, определяется по показаниям счетчиков. В случаях, когда счетчики отсутствуют, либо когда необходимо сравнить их показания с теоретически обоснованным расходом электроэнергии, применяют аналитические методы расчета.

1. Метод удельного расхода электроэнергии

$$W = C_{\text{уд}} \cdot \Pi,$$

где $C_{\text{уд}}$ – удельный расход электроэнергии на единицу выпускаемой продукции, значение которого нормируется по каждому виду продукции (услуг), при этом нормы удельного расхода энергии используются потребителями с целью контроля за эффективностью электропотребления; Π – объем выпущенной продукции за время T ; W – расхода электроэнергии за время T .

На практике значения $C_{\text{уд}}$ часто являются нестабильными (рис. 5.1), особенно это характерно в рыночных условиях функционирования.

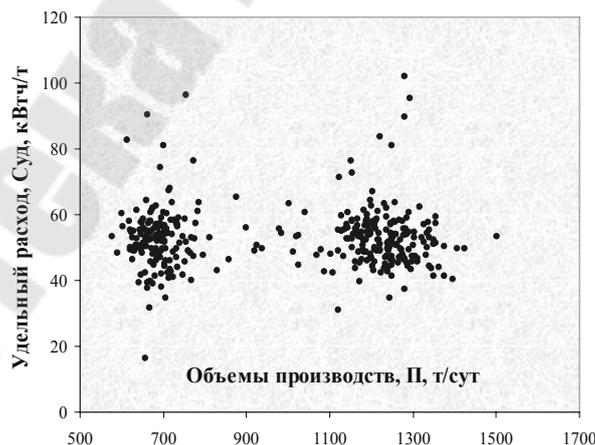


Рис. 5.1. Корреляционное поле точек зависимости суточного удельного электропотребления от производительности ОАО «Мозырьсоль»

Поэтому данный метод определения расхода электроэнергии является приближенным.

2. Определение расхода электроэнергии по графику нагрузки

Расход электроэнергии численно равен площади фигуры, ограниченной графиком электрической нагрузки (рис. 5.2):

$$W = \sum P_i \cdot \Delta t_i.$$

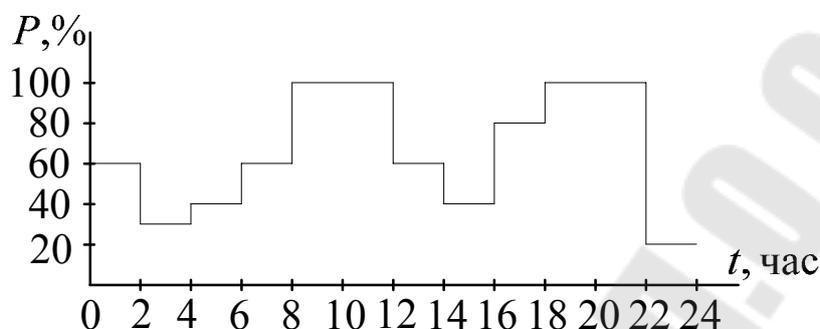


Рис. 5.2. График нагрузки потребителя электроэнергии

Метод является точным, но на практике часто отсутствуют графики электрической нагрузки, поэтому используются укрупненные методы определения расхода электроэнергии.

3. Метод коэффициента использования

Годовой расход электроэнергии определяется по выражению

$$W_{\Gamma} = P_{\text{уст}} \cdot K_{\text{и}} \cdot \alpha \cdot T_{\Gamma},$$

где T_{Γ} – годовой фонд рабочего времени; α – коэффициент сменности по энергоиспользованию, показывает связь между средней нагрузкой за наиболее нагруженную смену и среднегодовой нагрузкой:

$$\alpha = \frac{P_{\text{с.г.}}}{P_{\text{с}}} \leq 1.$$

Значения этого коэффициента приводятся в справочных таблицах для различных потребителей электроэнергии.

В случаях, когда отсутствуют данные об α , годовой расход электроэнергии определяется по выражению

$$W_{\Gamma} = P_{\text{с}} \cdot (T_1 + T_2 \cdot \beta_2 + T_3 \cdot \beta_3) \cdot C,$$

где T_1, T_2, T_3 – годовой фонд рабочего времени за 1-ю, 2-ю и 3-ю рабочие смены; β_2, β_3 – коэффициенты, учитывающие степень менее нагруженной 2-й и 3-й смены относительно первой; C – коэффициент, учитывающий работу в выходные и праздничные дни.

Данный метод на практике используется очень редко.

4. Определение расхода электроэнергии через максимальную нагрузку

Годовой расход электроэнергии определяется по выражению

$$W_{\Gamma} = P_{\text{M}} \cdot T_{\text{M}},$$

где P_{M} – максимальная нагрузка потребителя; T_{M} – время использования максимума нагрузки, т.е. время, в течение которого потребитель израсходует столько же электроэнергии при работе с максимальной нагрузкой, сколько и при работе по реальной нагрузке за годовой фонд рабочего времени (рис. 5.3):

$$W_{\Gamma} = P_{\text{c}} \cdot T, \quad W_{\Gamma} = P_{\text{M}} \cdot K_{\text{зг}} \cdot T.$$

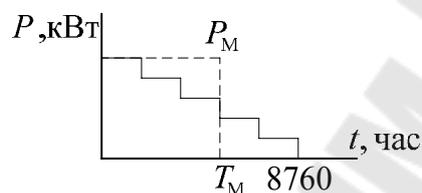


Рис. 5.3. Определение расхода электроэнергии через максимальную нагрузку

5. Определение расхода электроэнергии по уравнению регрессии (расчетно-статистический метод)

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

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

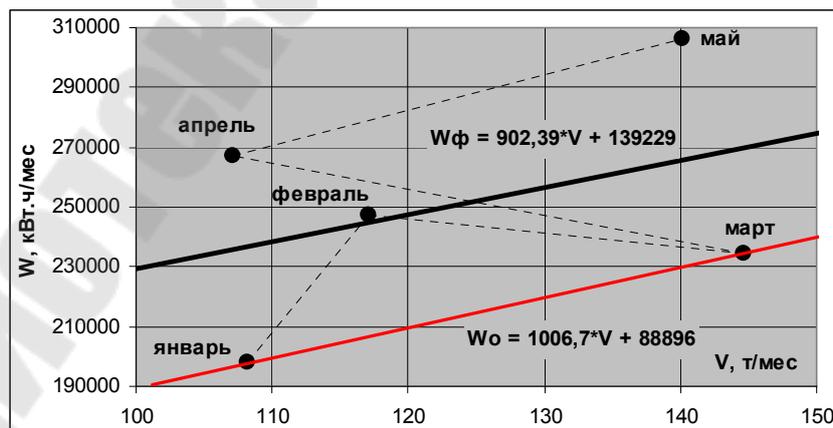


Рис. 5.4. Модели месячного расхода электрической энергии

На практике также могут использоваться и нелинейные уравнения регрессии.

Определение расхода реактивной энергии

Расход реактивной энергии определяется аналогично расходу активной энергии. В общем случае реактивное энергопотребление определяется по выражению

$$V_{\Gamma} = W_{\Gamma} \cdot \operatorname{tg} \varphi_{\text{ср.вз}},$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{\text{ср.вз}}$ – средневзвешенный коэффициент реактивной мощности, может быть выражен через средневзвешенный коэффициент активной мощности:

$$\cos \varphi_{\text{ср.вз}} = \frac{W}{\sqrt{W^2 + V^2}}.$$

Определение расхода реактивной энергии необходимо для осуществления денежных расчетов за реактивное электропотребление (при необходимости), а также для выбора компенсирующих устройств.

Определение потерь мощности и энергии в системах электроснабжения

В настоящее время 10–15 % электрической энергии теряется при ее транспортировке и трансформации. Поэтому актуальной является задача воздействия на факторы, определяющие потери электроэнергии, с целью их снижения.

Основные потери электрической энергии в системах электроснабжения имеют место в линиях электропередачи и трансформаторах. Существуют несколько способов определения потерь мощности и энергии.

1. Определение потерь мощности и энергии по средней (среднеквадратичной) нагрузке

$$\Delta P = 3(I_{\text{с}} \cdot K_{\text{ф.г}})^2 \cdot R = \left(\frac{S_{\text{с}} \cdot K_{\text{ф.г}}}{U_{\text{н}}}\right)^2 \cdot R = \left(\frac{S_{\text{ск}}}{U_{\text{н}}}\right)^2 \cdot R,$$

где $I_{\text{с}}$, $S_{\text{с}}$ – средний ток и мощность потребителя; $K_{\text{ф.г}}$ – коэффициент формы графика нагрузки; R – сопротивление элемента системы электроснабжения; $S_{\text{ск}}$ – среднеквадратичная нагрузка потребителя.

В данном случае потери электрической энергии определяются по выражению:

$$\Delta W_{\Gamma} = \Delta P \cdot T_{\Gamma},$$

где T_{Γ} – годовой фонд рабочего времени.

2. Определение потерь мощности и энергии по максимальной мощности нагрузки (метод времени максимальных потерь)

$$\Delta P_M = \left(\frac{S_M}{U_H}\right)^2 \cdot R,$$

где S_M – максимальная мощность нагрузки.

Потери электрической энергии здесь определяются по выражению

$$\Delta W_\Gamma = \Delta P_M \cdot \tau,$$

где τ – время максимальных потерь. Это время, в течение которого теряется столько же энергии при работе с максимальной нагрузкой, сколько за время работы потребителя по реальному графику:

$$\tau = \left(\frac{P_{ск}}{P_M}\right)^2 \cdot T = (K_{ф.г} \cdot K_{з.г})^2 \cdot T.$$

Время максимальных потерь может также определяться по эмпирическому выражению

$$\tau = (0,124 + T \cdot 10^{-4})^2 \cdot 8760.$$

Данное выражение может быть использовано для определения годового времени максимальных потерь потребителей, у которых $T_M > 3000$ ч, если $\cos\varphi > 0,6$.

T_M – 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:

$$T_M = K_{зг} \cdot T_\Gamma.$$

Для определения τ могут также использоваться номограммы, представляющие собой зависимость $\tau = f(T_M, \cos\varphi)$.

3. Приближенный расчет потерь мощности в линиях электропередачи и трансформаторах

На предпроектных стадиях, когда отсутствуют сведения о схеме электроснабжения и неизвестны параметры ее элементов, при определении расчетной нагрузки вспомогательными методами потери мощности и энергии в линиях и трансформаторах допускается учитывать приближенно используя следующие выражения:

– потери в трансформаторах:

$$\Delta P_T = 0,02 \cdot S_{p\Sigma} \text{ , } \Delta Q_T = 0,1 S_{p\Sigma} \text{ ,}$$

где $S_{p\Sigma}$ – суммарная расчетная мощность нагрузки потребителя;

– потери в линиях электропередачи (канализация электроэнергии по территории предприятия обычно осуществляется кабельными линиями):

$$\Delta P_L = 0,035 S_{p\Sigma} \text{ , } \Delta Q_L \approx 0.$$

На предприятиях канализация электроэнергии осуществляется, как правило, кабельными линиями. При этом активное сопротивление кабеля в 10 и более раз превышает реактивное сопротивление, поэтому потерями реактивной мощности пренебрегают.

Пути снижения потерь мощности и энергии в элементах систем электроснабжения потребителей

В условиях низкой загрузки элементов системы электроснабжения потребителей, относительные потери мощности и энергии резко возрастают. В этих условиях необходимо рассмотреть мероприятия, позволяющие снизить потери мощности и энергии.

1. Определение оптимального количества работающих трансформаторов

потери мощности в трансформаторах определяются по выражению

$$\Delta P_T = \frac{1}{n} \left(\frac{S}{S_H} \right)^2 \Delta P_{K3} + n \Delta P_{XX}.$$

Потери энергии:

$$\Delta W_T = \frac{1}{n} \left(\frac{S_M}{S_{HT}} \right)^2 \Delta P_{K3} \cdot \tau + n \Delta P_{XX} \cdot T_T = \left(\frac{1}{n} \left(\frac{S_{CK}}{S_{HT}} \right)^2 \Delta P_{K3} + n \Delta P_{XX} \right) \cdot T_T,$$

где T_T – время работы трансформаторов в течение года.

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

$$\left(\frac{S}{S_H} \right)^2 \Delta P_{K3} + \Delta P_{XX} = \frac{1}{2} \left(\frac{S}{S_H} \right)^2 \Delta P_{K3} + 2 \Delta P_{XX}, \quad S_T = S_{HT} \cdot \sqrt{\frac{2 \Delta P_{XX}}{\Delta P_{K3}}},$$

где S_T – граничная мощность нагрузки потребителя электроэнергии.

При $S > S_{\Gamma}$ целесообразна работа 2-х трансформаторов, если же $S < S_{\Gamma}$, то следует использовать в работе один трансформатор.

В общем случае, при количестве трансформаторов n , S_{Γ} определяется как:

$$S_{\Gamma} = S_{\text{HT}} \sqrt{\frac{n(n-1) \cdot \Delta P_{\text{XX}}}{\Delta P_{\text{КЗ}}}}.$$

2. Оптимизация загрузки трансформаторов потребителя

Задача заключается в перераспределении нагрузок потребителя таким образом, чтобы КПД установленных трансформаторов был максимальным, что имеет место при выполнении условия

$$\Delta P_{\text{м}} = \Delta P_{\text{ст}},$$

откуда следует уравнение

$$\frac{1}{n} \left(\frac{S_0}{S_{\text{HT}}} \right)^2 \Delta P_{\text{КЗ}} = n \Delta P_{\text{XX}}, \quad S_0 = n S_{\text{HT}} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{XX}}}{\Delta P_{\text{КЗ}}}}.$$

В данном случае речь идет об оптимизации режимов работы уже установленных трансформаторов. Однако снижение потерь мощности и энергии необходимо планировать уже на стадии проектирования. На этой стадии целесообразно говорить не о минимальных потерях электроэнергии, а о минимальных затратах, которые учитывают стоимость потерь электроэнергии и трансформаторов.

Из представленных выше выражений следует, что потери мощности и энергии в трансформаторах определяются соотношением потерь холостого хода и короткого замыкания в них. Также эти потери определяются режимом работы потребителя, формально описываемым показателями графика нагрузки. В связи с этим электротехническая промышленность производит трансформаторы с различным соотношением потерь холостого хода и короткого замыкания (табл. 5.1), и при выборе определенного типа трансформатора необходимо учитывать эти характеристики, а также показатели режима работы потребителя.

Таблица 5.1

Технические характеристики трансформаторов

Марка	ТМГ			ТМГМШ			ТМГСИ		
Номинальная мощность, S_{HT} , кВ · А	400	630	1000	400	630	1000	400	630	1000
Потери холостого хода, ΔP_{XX} , кВт	0,83	1,24	1,6	0,6	0,94	1,25	0,83	1,24	1,6

Марка	ТМГ			ТМГМШ			ТМГСИ		
	5,4	7,6	10,8	5,4	7,6	10,8	6	8,6	12,4
Потери короткого замыкания, $\Delta P_{кз}$, кВт	5,4	7,6	10,8	5,4	7,6	10,8	6	8,6	12,4
Стоимость, дол.	9227	14528	20368	10309	13749	22758	8732	16233	19276

3. Регулирование напряжения в цеховых сетях потребителей

Регулирование напряжения в цеховых сетях потребителей электроэнергии является одним из возможных путей энергосбережения.

Пределы отклонения напряжения от номинального значения ($U_{ном}$) регламентируются ГОСТ и составляют $\pm 5\%$. Каждый электроприемник выпускается предприятием-изготовителем для работы при номинальном напряжении и обеспечивает нормальное функционирование при отклонениях напряжения в пределах, допускаемых ГОСТом. При отклонениях напряжения в допускаемых пределах показатели работы электроприемника не остаются постоянными, при этом существенно изменяется также потребляемая из сети мощность.

Результаты проведенных исследований показали, например, что из-за повышения напряжения на зажимах источников света увеличивается потребляемая мощность, что ведет к повышению расхода электроэнергии. Известно выражение, показывающее изменение мощности от напряжения на зажимах ламп накаливания и комплектах: лампа ДРЛ-ПРА. Увеличение потребляемой мощности при увеличении напряжения характерно и для других электроприемников. Поскольку не отмечалось отрицательного влияния на работу технологического оборудования при регулировании напряжения в пределах, допустимых по ГОСТ, целесообразно определение и поддержание оптимального напряжения в цеховых электросетях.

Одним из наиболее дешевых и простых способов управления режимом напряжения является применение сухих автотрансформаторов. Так как в основу положено пятипроцентное регулирование напряжения, то электромагнитная (типовая) мощность сухого автотрансформатора меньше номинальной мощности трансформатора подстанции, с которым последовательно работает автотрансформатор, в 20 раз.

Это устройство весьма миниатюрно и может быть установлено наверху подстанции, на стене помещения. В условиях действующего предприятия наиболее предпочтительными точками установки сухих автотрансформаторов являются вводы 0,4 кВ распределительных

подстанций 6-35/0,4 кВ. При этом регулирование напряжения становится локальным и поэтому наиболее эффективным.

Схема регулирования напряжения (рис. 5. включает в свой состав: автотрансформатор АТСЗ-1000/5, реле максимального напряжения и схему управления. Схемой предусмотрено два режима работы: ручной и автоматический.

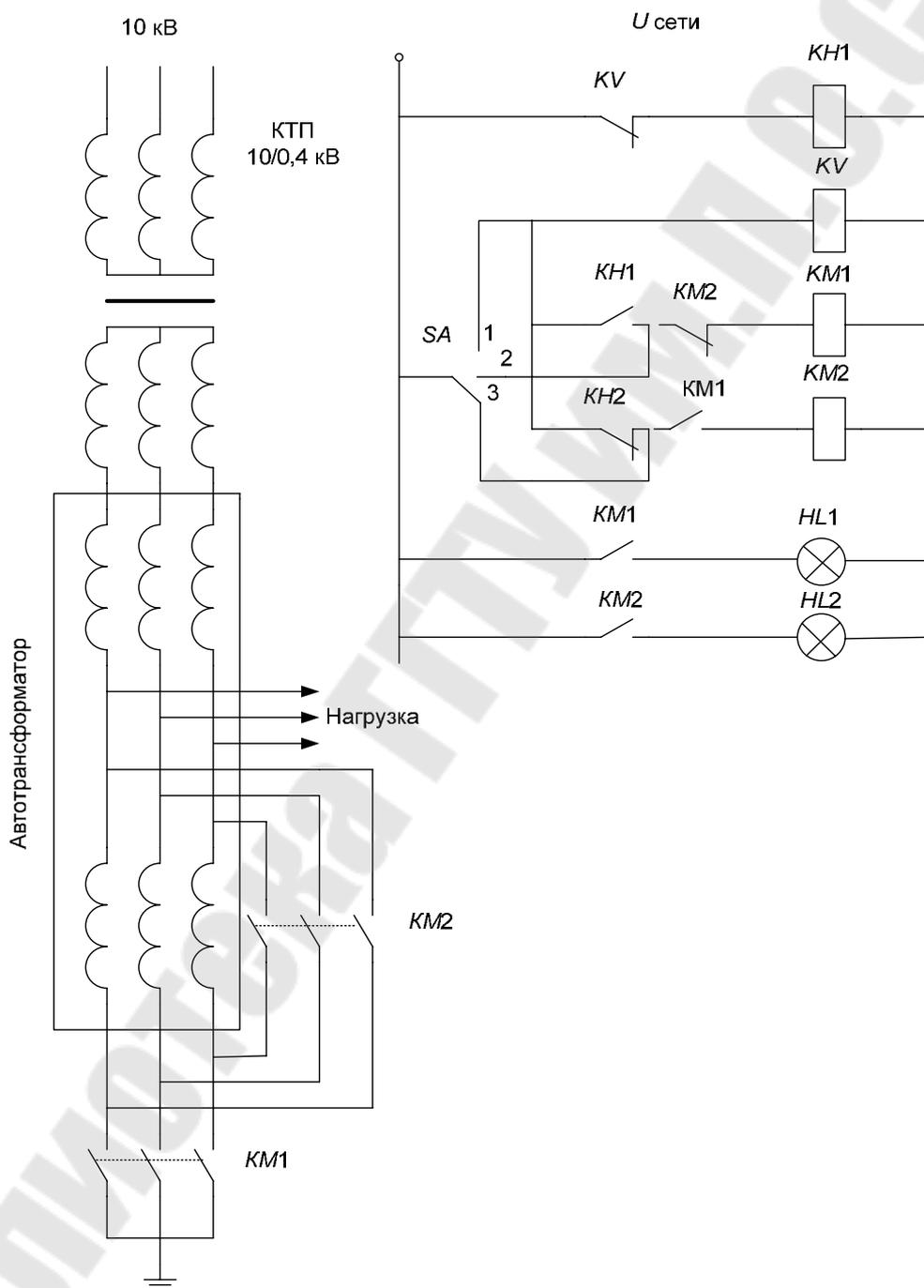


Рис. 5.5. Схема регулирования напряжения с помощью автотрансформатора

Работа схемы в автоматическом режиме. При повышении вторичного напряжения силового трансформатора, замыкается контакт реле KV и подает напряжение на катушку реле $KH1$. Реле своим контактом $KH1.1$ подключает магнитный пускатель $KM1$ и контактом $KH1.2$ отключает магнитный пускатель $KM2$, который своими контактами шунтировал автотрансформатор. Пускатель $KM1$ подключает АТСЗ-1000/5 в схему подстанции, обеспечивая снижение напряжения. При снижении напряжения на величину заданного гистерезиса возврата реле KV срабатывает, отключает реле $KH1$ от сети. После отключения реле $KH1$ автотрансформатор выводится из работы. Рекомендуются установки реле KV :

- напряжение срабатывания 230 В;
- гистерезис возврата 5 %.

Уставки реле максимального напряжения могут меняться в зависимости от следующих факторов: вторичного напряжения трансформатора, протяженности питающей и распределительной сети, характера и величины нагрузки.

Работа схемы в ручном режиме. В ручном режиме включение и отключение трансформатора производится электротехническим персоналом. Для этого переключатель SA устанавливают в положение 2. Включается магнитный пускатель $KM1$ и своими силовыми контактами подключает АТСЗ-1000/5 к сети.

Оценочный расчет величины нерационального расхода электроэнергии при работе цеховых электроприемников при повышенном напряжении ведется по следующим формулам:

Определяется фактический линейный ток:

$$I_{\phi} = \frac{P_{\text{ср}}}{\sqrt{3} U_{\text{м}}};$$

эквивалентное сопротивление нагрузки:

$$R_{\text{эк}} = \frac{U_{\text{м}}}{I_{\phi}};$$

суммарный линейный ток при отрегулированном напряжении:

$$I_0 = \frac{U_0}{R_{\text{эк}}};$$

суммарная расчетная мощность при отрегулированном напряжении:

$$P_0 = \sqrt{3} I_0 U_0;$$

приращение мощности:

$$\Delta P = P_{\text{ср}} - P_0;$$

годовая экономия электроэнергии при снижении напряжения:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P \cdot T.$$

Для унификации оценочных расчетов эффективности регулирования напряжения может использоваться номограмма (рис. 5.6).

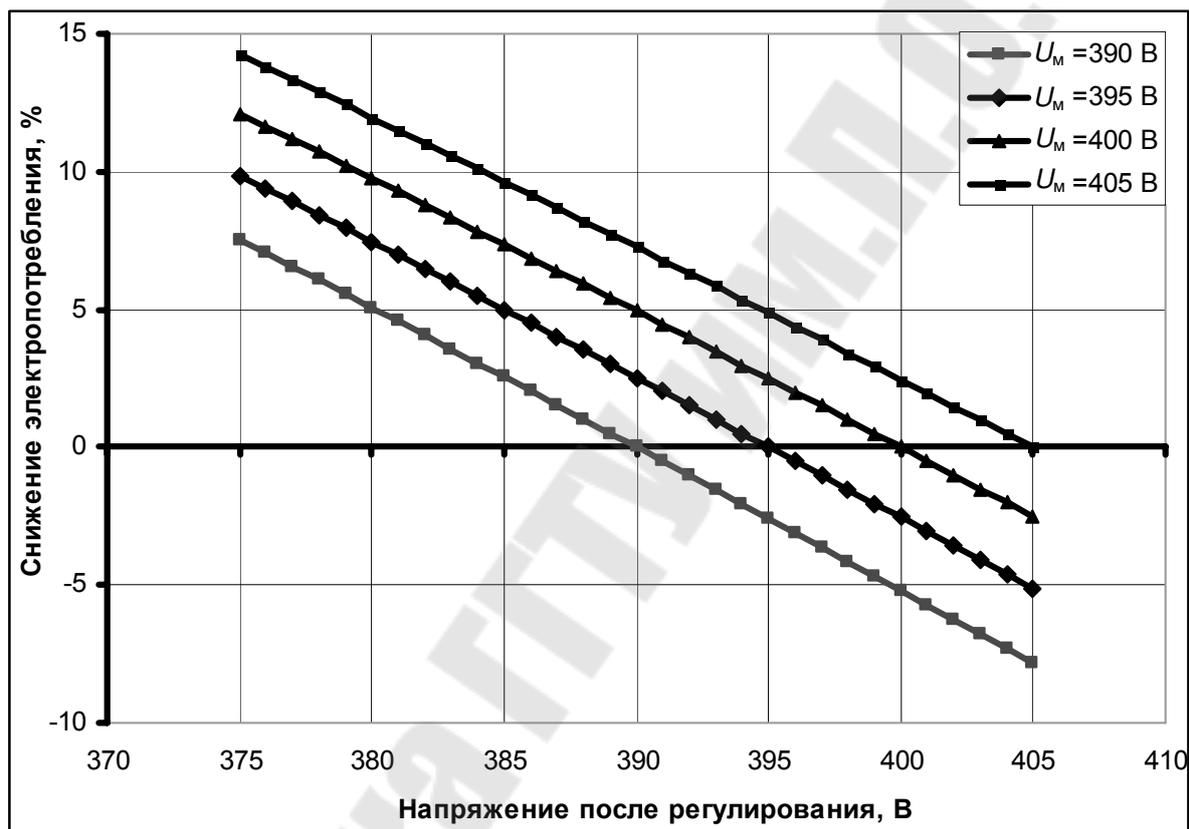


Рис. 5.6. Номограмма для унификации оценочных расчетов эффективности регулирования напряжения

4. Компенсация реактивной мощности нагрузки

Потери мощности определяются по выражению:

$$\Delta P = \left(\frac{S}{U_H}\right)^2 \cdot R = \frac{P^2 + (Q - Q_K)^2}{U_H^2} \cdot R,$$

где Q_K – мощность компенсирующего устройства.

Компенсация позволяет разгрузить элементы системы электро-снабжения, что приводит к снижению потерь мощности и энергии в них.

Значительная доля теряемой энергии, в несколько раз превышающая потери в линиях и трансформаторах, приходится на приемники электроэнергии. Так, электрические двигатели в условиях низкой нагрузки работают с КПД, равным 40–60 %. Поэтому одним из путей снижения этих потерь является замена низко загруженных электродвигателей двигателями меньшей мощности.

Рекомендуемая литература

Основная

1. Правила устройства электроустановок / Главгосэнергонадзор ; Мин-во топлива и энергетики РФ. – Москва : Главгосэнергонадзор, 1998. – 549 с.
2. Ус, А. Г. Электроснабжение промышленных предприятий и гражданских зданий / А. Г. Ус, Л. И. Евминов. – Минск : Пион, 2002. – 457 с.
3. Головкин, П. И. Энергосистема и потребители электрической энергии / П. И. Головкин. – Москва : Энергоатомиздат, 1979.
4. Радкевич, В. Н. Проектирование систем электроснабжения / В. Н. Радкевич. – Минск : Пион, 2001. – 292 с.
5. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию : в 2 т. / под общей ред. А. А. Федорова. – Москва : Энергоатомиздат, 1987.

Дополнительная

1. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С. Д. Волобринский [и др.]. – Ленинград : Энергия, 1971.
2. Шидловский, А. К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий / А. К. Шидловский, Г. Я. Вагин, Э. Г. Куренный. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.
3. Кудрин, Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б. И. Кудрин, В. В. Прокопчик. – Минск : Выш. шк., 1988. – 357 с.
4. Колесник, Ю. Н. Способ учета постоянной времени нагрева при выборе проводников и их согласовании с защитным аппаратом / Ю. Н. Колесник, Д. С. Смягликов // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2004. – № 3.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Тема 1. Основные понятия о приемниках и потребителях электроэнергии	5
Классификация электроприемников	5
Классификация потребителей электрической энергии.....	8
Характеристики электроприемников	9
Тема 2. Графики электрических нагрузок.....	12
Общие сведения о графиках нагрузки.....	12
Индивидуальные графики нагрузки (ИГН)	13
Графики групповой нагрузки.....	14
Показатели графиков нагрузки	17
Коэффициенты, характеризующие графики нагрузки.....	22
Тема 3. Характерные приемники электроэнергии.....	27
Коммунально-бытовые приемники и потребители электроэнергии.....	38
Сельскохозяйственные потребители электроэнергии	39
Потребители электроэнергии электрифицированного транспорта.....	40
Тема 4. Методы определения расчетной электрической нагрузки	42
Статистический метод определения расчетной нагрузки.	43
Метод упорядоченных диаграмм	44
Определение расчетной нагрузки для группы из трех или менее электроприемников	47
Вспомогательные методы определения расчетной нагрузки.....	48
Определение расчетной нагрузки потребителей на напряжении 6–10 кВ	49
Определение расчетной нагрузки при наличии однофазных электроприемников в группе.....	51
Уточнение метода упорядоченных диаграмм	54
Учет нагрузочной способности элементов СЭС при определении расчетной нагрузки статистическим методом	54
Учет реальной постоянной времени нагрева при определении расчетной нагрузки методом упорядоченных диаграмм.....	55
Пиковая нагрузка приемников и потребителей электроэнергии	56
Определение пикового тока группы электроприемников.....	57

Тема 5. Определение расхода и потерь электроэнергии потребителей.....	58
Определение расхода реактивной энергии.....	61
Определение потерь мощности и энергии в системах электроснабжения.....	61
Пути снижения потерь мощности и энергии в элементах систем электроснабжения потребителей.....	63
Рекомендуемая литература.....	70

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

ПОТРЕБИТЕЛИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

**Курс лекций
по одноименной дисциплине
для студентов специальности 1-43 01 03
«Электроснабжение»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Редактор *М. В. Аникеенко*
Компьютерная верстка *М. В. Аникеенко*

Подписано в печать 16.01.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 4,42. Уч.-изд. л. 3,76.

Изд. № 54.

E-mail: ic@gstu.gomel.by
<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр учреждения образования
«Гомельский государственный технический университет
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.