

## ЛЕКЦИЯ №5. ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

### 2.1. Общие положения

Электрическая нагрузка отдельных потребителей, а, следовательно, и суммарная их нагрузка, определяющая режим работы электростанций в энергосистеме, непрерывно меняется. Принято отражать этот факт графиком нагрузки, т. е. *диаграммой изменения мощности (тока) электроустановки во времени*.

По виду фиксируемого параметра различают графики активной  $P$ , реактивной  $Q$ , полной (кажущейся)  $S$  мощностей и тока  $I$  электроустановки. Как правило, графики отражают изменение нагрузки за определенный период времени. По этому признаку их подразделяют на суточные (24 ч), сезонные, годовые и т. п.

В зависимости от объекта исследования различают *графики нагрузок потребления электроэнергии электроприемником, цехом, предприятием, городом, в энергосистеме и др., и графики производства электрической энергии электростанцией, энергосистемой*.

Нагрузки электрических систем (ЭС) складываются из нагрузок отдельных потребителей.

Графики электрических нагрузок отдельных потребителей зависят от их отраслевой принадлежности, суточных режимов работы, величиной потребляемой электрической мощности, времени года, дней недели (рабочие и выходные дни).

Графики нагрузки используют для анализа работы электроустановок, для проектирования системы электроснабжения, для составления прогнозов электропотребления, планирования ремонтов оборудования, а также в процессе эксплуатации для ведения нормального режима работы.

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.

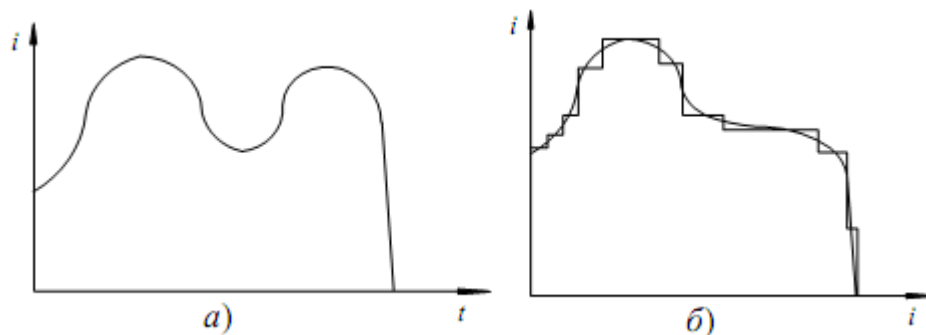


Рис. 2.1. Графики нагрузки:

а – непрерывный; б – 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:

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

Выражение  $I(t) = \sum_1^n i_i(t)$  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.

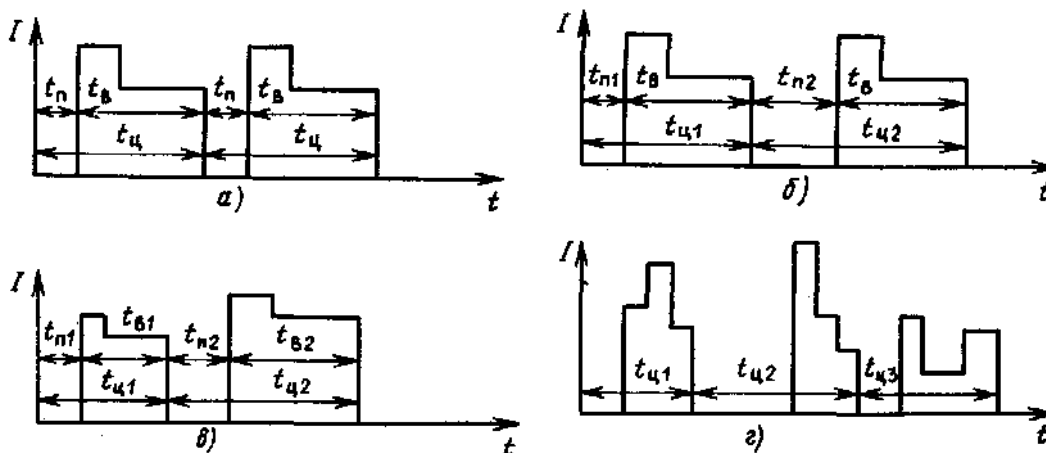


Рис. 2.2. Индивидуальные графики нагрузки различных типов:

а – периодические; б – циклические; в – нециклические; г – нерегулярные

**Периодические графики** (рис. 2.2, а) отвечают строго ритмичному производству с одинаковыми токами и временем  $t_{п}$ ,  $t_{в}$ ,  $t_{ц}$  за разные циклы:

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

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  $t_{п}$  и циклов  $t_{ц}$  у таких графиков за разные циклы не равны и изменяются по случайному закону:

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

**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, г) 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).

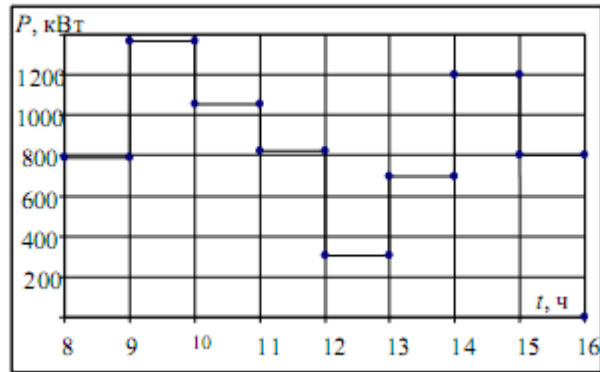


Рис. 2.3. Групповой график нагрузки потребителя электроэнергии за смену

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).

Различают два временных периода:

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

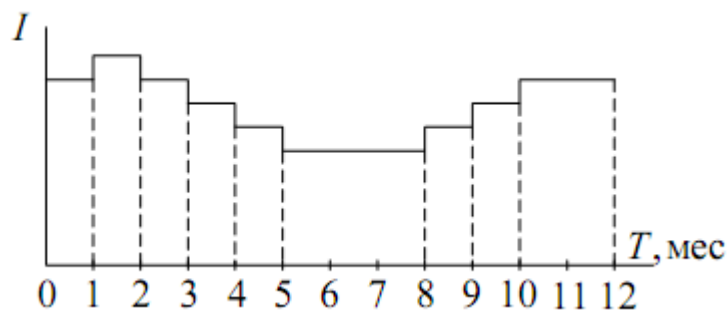


Рис. 2.4. Годовой график нагрузки потребителя электроэнергии

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 максимальных потерь  $\tau$ ), а также для установления закона распределения вероятности нагрузки.

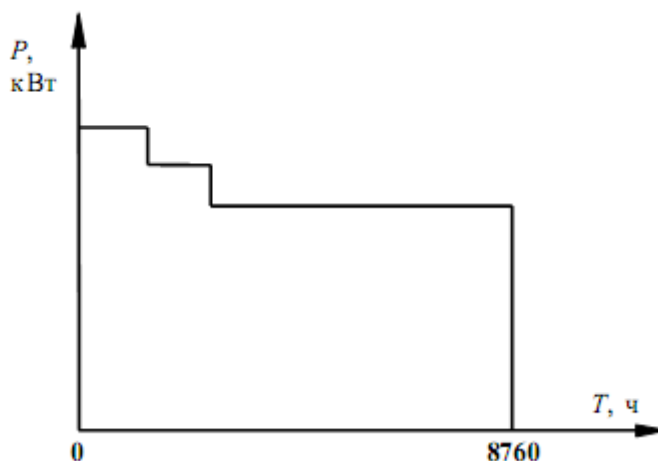


Рис. 2.5. Упорядоченный график нагрузки потребителя электроэнергии

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

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

$$P_{\Sigma} \leq \sum P_{mi}.$$

## 2.2. Суточные графики нагрузки потребителей

Фактический график нагрузки может быть получен с помощью регистрирующих приборов, которые фиксируют изменения соответствующего параметра во времени. Перспективный график нагрузки потребителей определяется в процессе проектирования. Для его построения надо располагать прежде всего сведениями об установленной мощности электроприемников, под которой понимают их суммарную номинальную мощность. Для активной нагрузки

$$P_{уст} = \sum P_{ном}, \text{ Вт}, \quad (2.1)$$

Присоединенная мощность на шинах подстанции потребителей:

$$P_{пр} = \sum P_{ном} / (\eta_{ср.ном} * \eta_{ср.сети}), \quad (2.2)$$

где  $\eta_{ср.ном}$  и  $\eta_{ср.сети}$  — соответственно средние КПД электроустановок потребителей и местной сети при номинальной нагрузке.

В практике эксплуатации обычно действительная нагрузка потребителей меньше суммарной установленной мощности. Это обстоятельство учитывается коэффициентами одновременности  $k_o$  и загрузки  $k_z$ . Тогда выражение для максимальной нагрузки потребителя будет иметь вид:

$$P_{MAX} = k_{СПР} * \sum P_{ном}, \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

где  $k_{СПР}$  — коэффициент спроса для рассматриваемой группы потребителей.

Коэффициенты спроса определяются на основании опыта эксплуатации однотипных потребителей и приводятся в справочной литературе. Средние значения коэффициентов спроса для некоторых промышленных потребителей приведены в таблица 2.1. Приведенное выше значение максимальной нагрузки является наибольшим в году и соответствует обычно периоду зимнего максимума нагрузки.

Кроме  $P_{MAX}$ , для построения графика необходимо знать характер изменения нагрузки потребителя во времени, который при проектировании обычно определяется по типовым графикам. Типовой график нагрузки строится по результатам исследования аналогичных действующих потребителей и приводится в справочной литературе в виде, показанном на рис. 2.1.а.

Несмотря на то, что нагрузки ЭС складываются из большого количества различных потребителей, полного выравнивания суммарного суточного, недельного, месячного, годового графиков не происходит.

*Суточный график нагрузок имеет, как правило, два явно выраженных максимума (пика) нагрузок – утренний и вечерний.* Между утренним и вечерним пиками находится зона относительно сниженной нагрузки и более глу-

бокое снижение нагрузки (провал) имеет место в течение шести – восьми часов ночного времени. Суточные графики нагрузки (Рис.2.1.) можно разделить на базовую нагрузку, ограниченную минимальной ночной нагрузкой (3), и переменную часть. В свою очередь, переменная часть суточного графика подразделяется на полупиковую, между минимальной ночной и дневной нагрузками (2), и пиковую, (1) между минимальной дневной и максимальной нагрузками..

Для удобства расчетов график выполняется ступенчатым. Наибольшая возможная за сутки нагрузка принимается за 100%, а остальные ступени графика показывают относительное значение нагрузки для данного времени суток.

При известном  $P_{MAX}$  можно перевести типовой график в график нагрузки данного потребителя, используя соотношение для каждой ступени графика:

$$P_{ст} = \frac{n\%}{100} \cdot P_{max}, \quad (2.4)$$

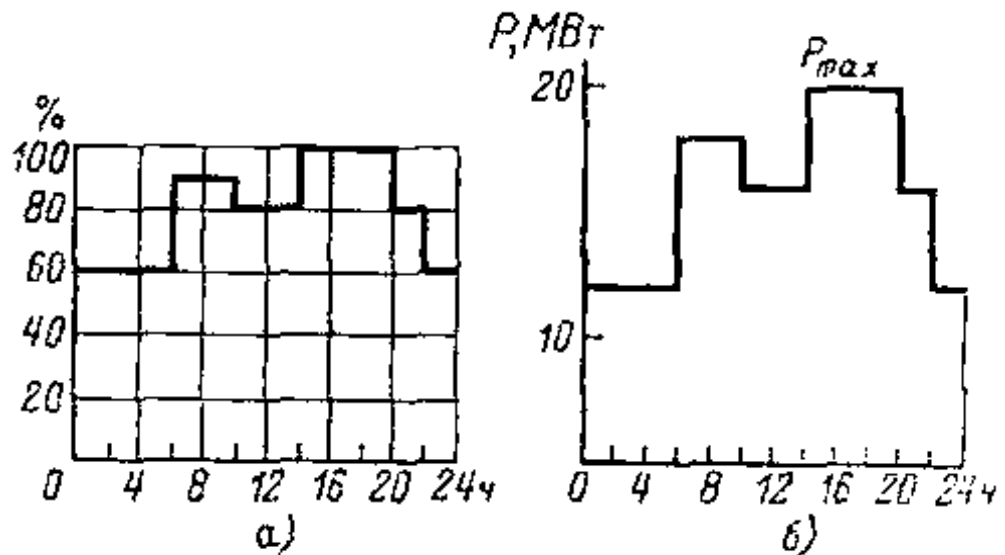
где  $n, \%$  — ордината соответствующей ступени типового графика, %.

На рисунке 2.1.б показан график потребителя электроэнергии, полученной из типового (рисунке 2.1.а) при  $P_{MAX} = 20 \text{ MВт}$ .

Обычно для каждого потребителя дается несколько суточных графиков, которые характеризуют его работу в разное время года и в разные дни недели. Это - типовые графики зимних и летних суток для рабочих дней, график выходного дня и т. д. Основным является обычно зимний суточный график рабочего дня. Его максимальная нагрузка  $P_{MAX}$  принимается за 100%, и ординаты всех остальных графиков задаются в процентах именно этого значения (рисунке 2.2.).

Таблица 2.1 – Коэффициент спроса  $k_{сп}$

Потребитель	Среднее значение коэффициента спроса $k_{СПР}$
Черная металлургия:	
доменный цех	0,6
мартеновский цех	0,3
установка непрерывной разливки стали	0,7
прокатные станы	0,4- 0,6
машиностроение	0,14- 0,6
Химическая промышленность	0,7- 0,9
Текстильная промышленность	0,7 - 0,85
Производственная вентиляция и кондиционирование	0,9



а - типовой; б - в именованных единицах.

Рис. 2.1 – Суточные графики активной нагрузки потребителя

Кроме графиков активной нагрузки, используют графики реактивной нагрузки. Типовые графики реактивного потребления также имеют ординаты ступеней, %, абсолютного максимума:

$$Q_{max} = P_{max} \operatorname{tg} \varphi_{max}, \text{ вар} \quad (2.5)$$

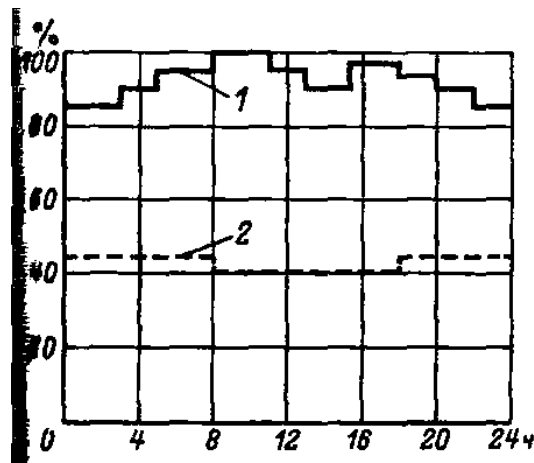
где  $\operatorname{tg} \varphi_{max}$  – определяется по значению  $\cos \varphi_{max}$ , которое должно быть задано, как исходный параметр для данного потребителя.

Суточный график полной мощности можно получить, используя известные графики активной и реактивной нагрузок. Значения мощности по ступеням графика (рис. 2.3.) определяются по выражениям

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \\ S_2 &= \sqrt{P_2^2 + Q_2^2} \\ \dots\dots\dots \\ S_n &= \sqrt{P_n^2 + Q_n^2} \end{aligned} \right\}, \quad (2.6)$$

где  $P_n$  и  $Q_n$  - активная и реактивная нагрузки данной ступени в именованных единицах.





1 - график рабочего дня;  
 2 - график выходного дня  
 Рис. 2.2 – Пример типового графика конкретного вида производства (черная металлургия)

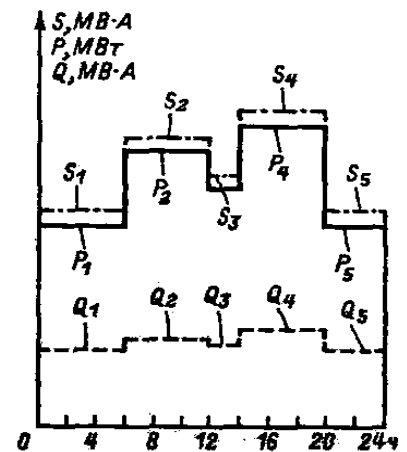
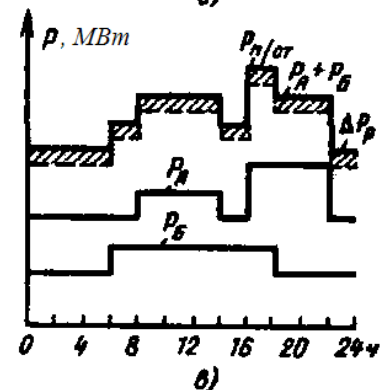
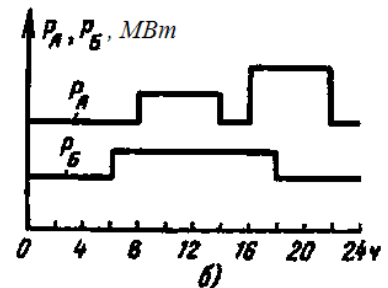
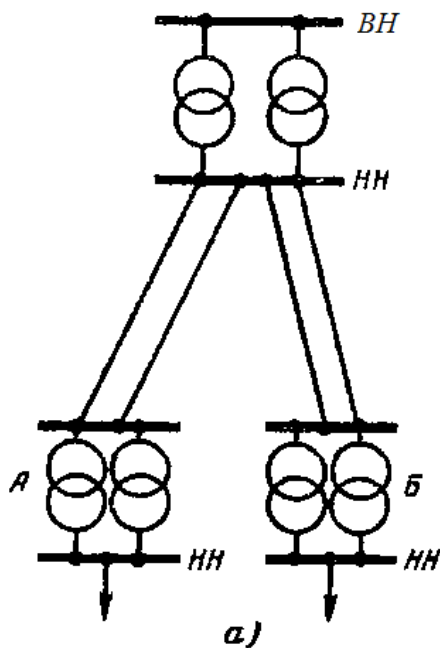


Рис. 2.3 – Суточные графики активной, реактивной и полной мощности потребителя

### 2.3. Суточные графики районных подстанций

Эти графики определяются с учетом потерь активной и реактивной мощностей в линиях и трансформаторах при распределении электроэнергии.



а – схема сети; б – график нагрузки отдельных потребителей;  
 в – суммарный график нагрузки

Рис. 2.4 – К построению графика активной нагрузки электрической сети (на шинах районной подстанции):

Потери мощности от протекания тока в проводах линий и в обмотках трансформаторов являются переменными величинами, зависящими от

нагрузки. Постоянную часть потерь мощности в сети определяют в основном потери холостого хода трансформаторов. Суммарные потери для любой ступени графика нагрузки подстанции могут быть найдены из выражений

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{p,n} &= \sum \Delta P_{p,i}^{nocm} + \sum \Delta P_{p,i,max}^{nep} \left( \frac{S_i}{S_{i,max}} \right)^2 ; \\ \Delta Q_{p,n} &= \sum \Delta Q_{p,i}^{nocm} + \sum \Delta Q_{p,i,max}^{nep} \left( \frac{S_i}{S_{i,max}} \right)^2 \end{aligned} \right\}, \quad (2.7)$$

Способ построения графика активной нагрузки для конкретной сети показан на рисунке 2.4.

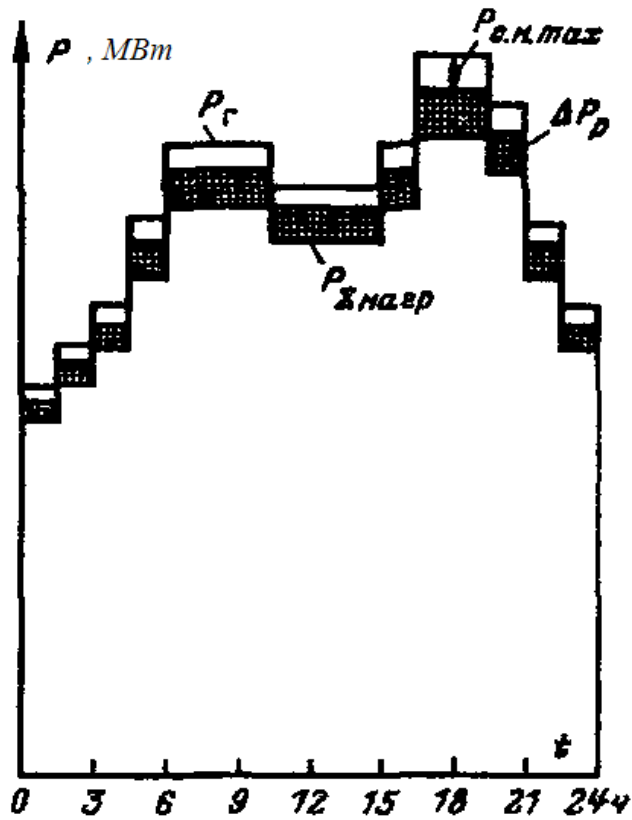


Рис. 2.5 – Графики активной нагрузки энергосистемы

#### 2.4. Суточные графики нагрузки электростанций

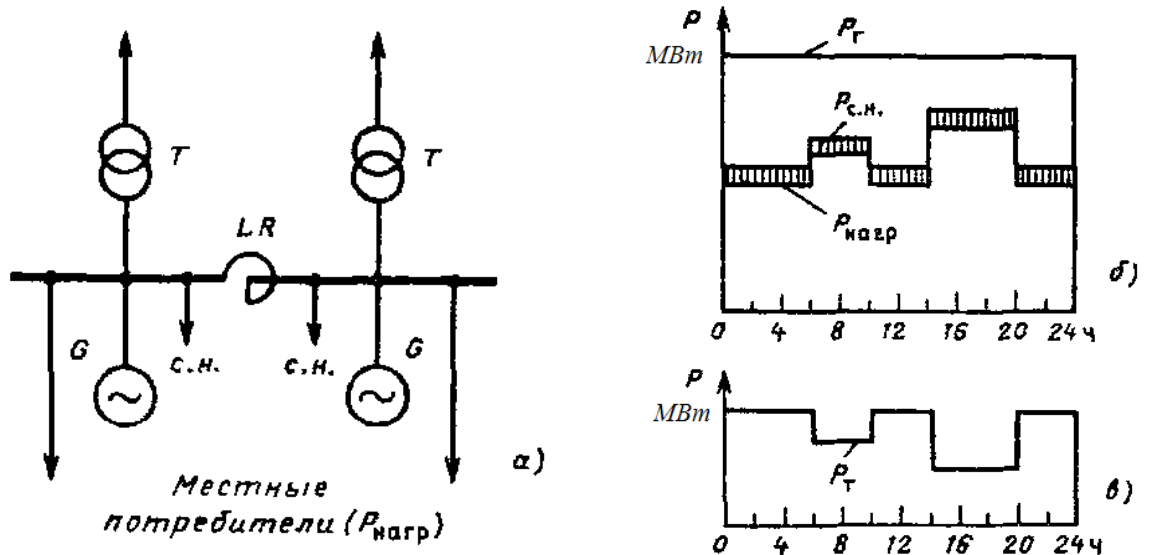
Суммируя графики нагрузки потребителей и потери распределения в электрических сетях в целом по энергосистеме, получают результирующий график нагрузки электростанций энергосистемы.

График нагрузки генераторов энергосистемы получают из графика мощности, отпускаемой с шин, учитывая дополнительно расход электроэнергии на собственные нужды (рис. 2.6). При значительных колебаниях нагрузки электростанций необходимо учитывать переменный характер потребления собственных нужд

$$P_{c,n} = \left( 0,4 + 0,6 \frac{P_i}{P_{уст}} \right) \cdot P_{c,n,max}, \quad (2.8)$$

где  $P_i$  – мощность, отдаваемая с шин станции;  
 $P_{уст}$  – установленная мощность генераторов;  
 $P_{c,n,max}$  – максимальный расход на собственные нужды;

Коэффициенты 0,4 и 0,6 приблизительно характеризуют соответствующую долю постоянной и переменной части расхода на собственные нужды  $P_{c,n,max}$ .



а — поясняющая схема;

б — графики выработки и потребления мощности на генераторном напряжении; в — график нагрузки трансформаторов связи

Рис. 2.6 – Графики активной нагрузки для ТЭЦ, работающей в энергосистеме

Нагрузка между отдельными электростанциями распределяется таким образом, чтобы обеспечить максимальную экономичность работы в целом по энергосистеме. Исходя из этих соображений, диспетчерская служба энергосистемы задает электростанциям суточные графики нагрузки.

При проектировании электрической части электростанции необходимо знать график нагрузки трансформаторов и автотрансформаторов связи с энергосистемой. Способ построения такого графика для трансформаторов связи ТЭЦ с энергосистемой показан на рис. 2.6.

Требуемый график  $P_T$  получают, вычитая из графика нагрузки генераторов  $P_G$  график потребления местной нагрузки и расход электроэнергии на собственные нужды  $P_{c,n}$ .

## 2.5. Годовой график продолжительности нагрузок

Этот график показывает длительность работы установки в течение года с различными нагрузками. По оси ординат откладывают нагрузки в со-

ответствующем масштабе, по оси абсцисс — часы года от 0 до 8760. Нагрузки на графике располагают в порядке их убывания от  $P_{max}$  до  $P_{min}$  (рис. 2.7.).

Построение годового графика продолжительности нагрузок производится на основании известных суточных графиков. На рис. 3.8. показан способ построения графика при наличии двух суточных графиков нагрузки — зимнего (183 дня) и летнего (182 дня).

Для наиболее распространенных потребителей электроэнергии в справочниках приводятся типовые графики активной и реактивной нагрузок по продолжительности.

График продолжительности нагрузок применяют в расчетах технико-экономических показателей установки, расчетах потерь электроэнергии, при оценке использования оборудования в течение года и т. п.

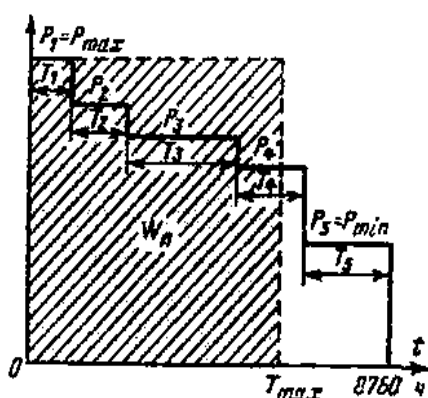


Рис. 2.7 – Годовой график продолжительности нагрузок

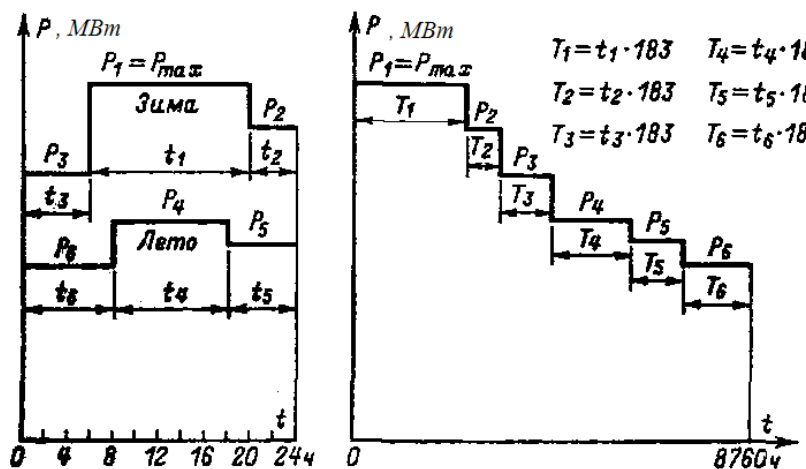


Рис. 2.8 – Способ построения годового графика продолжительности нагрузок

## ВОПРОСЫ

1. Дайте определение графиков электрических нагрузок.
2. Дать классификацию графиков электрических нагрузок.
3. Где используют графики электрических нагрузок?
4. Особенности построения суточных и годовых графиков электрических нагрузок?

## ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫЕ ИЗ ГРАФИКОВ НАГРУЗКИ

Площадь, ограниченная кривой графика активной нагрузки, численно равна энергии, произведенной или потребленной электроустановкой за рассматриваемый период:

$$W_{\Pi} = \sum_1^n P_i \times T_i, \text{ МВт}\cdot\text{час}, \quad (3.1)$$

где  $P_i$  – мощность  $i$ -й ступени графика;

$T_i$  – продолжительность ступени.

Средняя нагрузка установки за рассматриваемый период (сутки, год) равна:

$$P_{cp} = \frac{W_{\Pi}}{T}, \quad (3.2)$$

где  $T$  – длительность рассматриваемого периода;

$W_{\Pi}$  – электроэнергия за рассматриваемый период.

Степень неравномерности графика работы установки оценивают коэффициентом заполнения:

$$k_{zn} = \frac{W_n}{P_{max}T} = \frac{P_{cp}}{P_{max}}, \quad (3.3)$$

Коэффициент заполнения графика нагрузки показывает, во сколько раз выработанное (потребленное) количество электроэнергии за рассматриваемый период (сутки, год) меньше того количества энергии, которое было бы выработано (потреблено) за то же время, если бы нагрузка установки все время была максимальной. Очевидно, что чем равномернее график, тем ближе значение  $K_{3\Pi}$  к единице. Для характеристики графика нагрузки установки можно воспользоваться также условной продолжительностью использования максимальной нагрузки

$$T_{max} = \frac{W_{\Pi}}{P_{max}} \approx \frac{P_{cp}T}{P_{max}} = k_{zn}T, \quad (3.4)$$

Эта величина показывает, сколько часов за рассматриваемый период  $T$  (обычно год) установка должна была бы работать с неизменной максимальной нагрузкой, чтобы выработать (потребить) действительное количество электроэнергии  $W_{\Pi}$  за этот период времени. Определение величины  $T_{max}$  можно проиллюстрировать на примере рис. 3.7.

В практике применяют также коэффициент использования установленной мощности

$$k_{\Pi} = \frac{W_{\Pi}}{T \cdot P_{уст}} = \frac{P_{cp}}{P_{уст}}, \quad (3.5)$$

или продолжительность использования установленной мощности

$$T_{уст} = \frac{W_{\Pi}}{P_{уст}} = k_{\Pi}T, \quad (3.6)$$

При определении  $K_{И}$  под  $P_{УСТ}$  следует понимать суммарную установленную мощность всех агрегатов, включая резервные. Коэффициент использования  $K_{И}$  характеризует степень использования установленной мощности агрегатов. Очевидно, что  $K_{И} < 1$ , а  $T_{УСТ} < T$ . С учетом соотношения  $P_{УСТ} \geq P_{МАХ}$  имеем  $K_{И} \leq K_{ЗП}$ .

Регулирование графиков электрической нагрузки дает для потребителей и энергосистемы существенный эффект в повышении эффективности использования электрической энергии. Регулирование графиков электрической нагрузки осуществляется следующими путями:

- снижением максимума электрической нагрузки за счет более равномерного потребления электроэнергии в течение суток;
- смещением максимума нагрузки из пиковой зоны на другое время суток;
- увеличением числа часов использования максимальной нагрузки для потребителей электроэнергии;
- уменьшением потребления электроэнергии за счет исключения расточительного расходования электроэнергии и проведения энергосберегающих мероприятий для потребителей электроэнергии;
- привлечением для регулирования графиков нагрузки энергосистемы потребителей – регуляторов.

Регулирование графиков нагрузки достигается за счет применения двухставочных тарифов и зонных тарифов на электроэнергию, а также путем проведения различных организационно-технических мероприятий.

## ВОПРОСЫ

1. Какие технико-экономические показатели Вы знаете?
2. Коэффициент заполнения графика нагрузки показывает...
3. Сформулируйте определение «коэффициент использования установленной мощности».
4. Что показывает коэффициент заполнения графика нагрузки?
5. Способы регулирования графиков электрической нагрузки энергосистемы и потребителей.
6. Что такое число часов использования электрической мощности и от чего оно зависит? Как его можно определить?