

Лекция 2

ГРАФИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

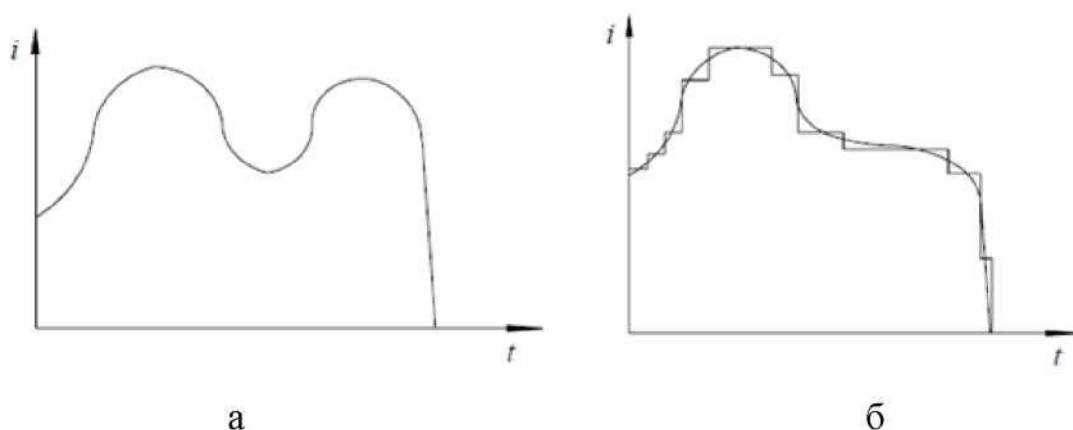
Общие сведения о графиках нагрузки

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 (рисунок 2.1).

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



а – непрерывный; б – дискретный
Рисунок 2.1 - Графики нагрузки

Для решения практических задач электроснабжения непрерывный график заменяют дискретным (рисунок 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:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n p_i(t), \quad (2.1)$$

$$Q(t) = \sum_{i=1}^n q_i(t), \quad (2.2)$$

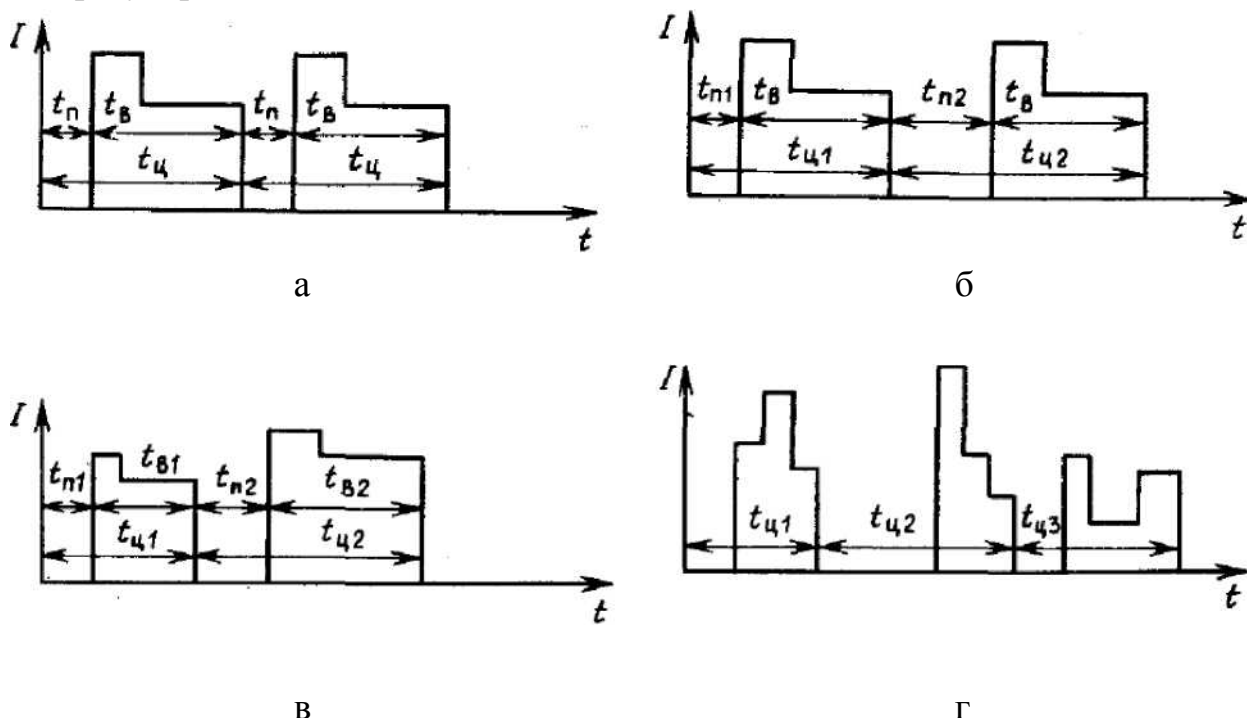
$$I(t) = \frac{\sqrt{P^2(t) + Q^2(t)}}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (2.3)$$

Выражение $I(t) \approx \sum i_i(t)$ 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 (рисунок 2.2):

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



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

Рисунок 2.2 – Индивидуальные графики нагрузки различных типов

Периодические графики (рисунок 2.2, а) отвечают строго ритмичному производству с одинаковыми токами и временем t_n , t_b , t_c за разные циклы: $t_{n1} = t_{n2} = const$, $t_{b1} = t_{b2} = const$, $t_{c1} = t_{c2} = const$, характеризуются стабильностью потребления электроэнергии за среднее время цикла $W_1 = W_2 = const$.

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

Циклические графики (рисунок 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_c у таких графиков за разные циклы не равны и изменяются по случайному закону: $t_{n1} \neq t_{n2} \neq const$, $t_{b1} \neq t_{b2} \neq const$, $W_1 = W_2 = const$.

Нециклические графики (рисунок 2.2, в) имеют электроприемники, когда выполняемые ими операции строго не регламентированы, например, станки на ремонтных участках. В этом случае t_b , t_n и t_c 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: $t_{n1} \neq t_{n2} \neq const$, $t_{b1} \neq t_{b2} \neq const$, $W_1 = W_2 = const$.

Нерегулярные графики (рисунок 2.2, г) встречаются редко. Их имеют электроприемники, которые обслуживают технологические процессы с неустановившимся характером. При этом условие стабильности потребления электроэнергии уже не соблюдается: $t_{n1} \neq t_{n2} \neq const$, $t_{b1} \neq t_{b2} \neq const$, $t_{c1} \neq t_{c2} \neq const$, $W_1 \neq W_2 \neq const$.

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 (рисунок 2.3).

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.

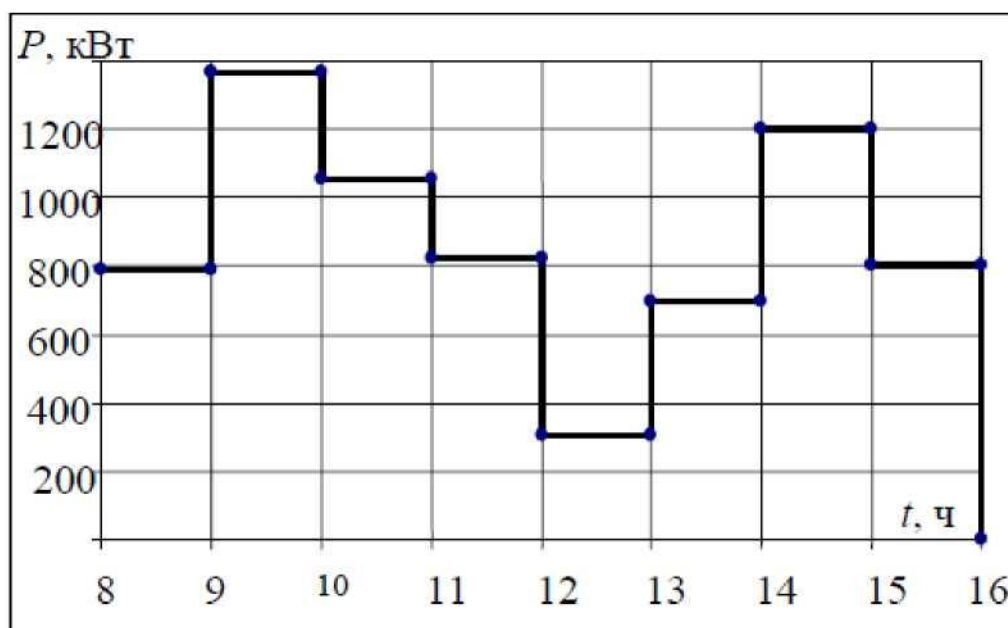


Рисунок 2.3 – Групповой график нагрузки потребителя электроэнергии за смену

Суточные (сменные) графики нагрузки (рисунок 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 технологическим процессом.

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

Различают два временных периода:

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

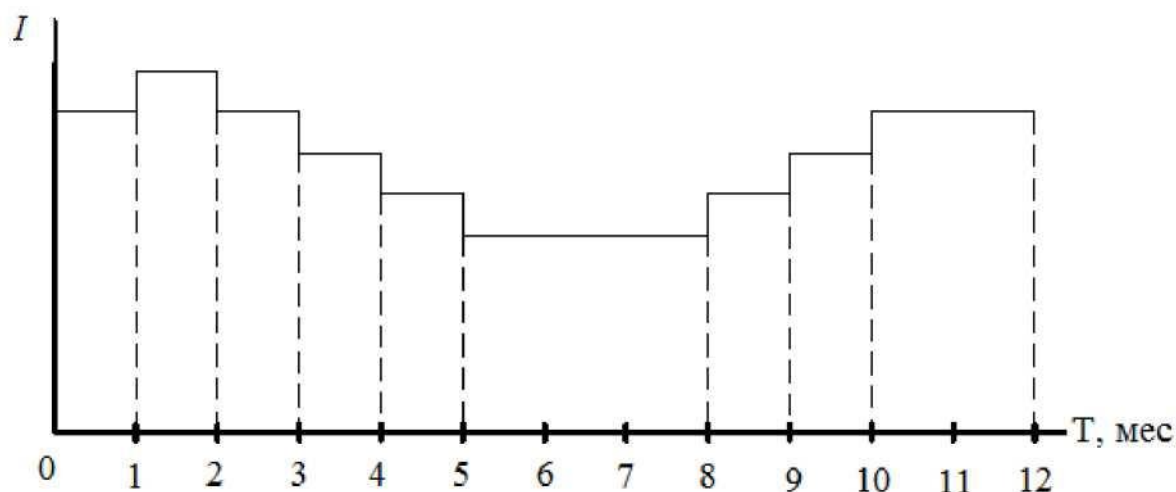


Рисунок 2.4 - Годовой график нагрузки потребителя электроэнергии

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 (рисунок 2.5).

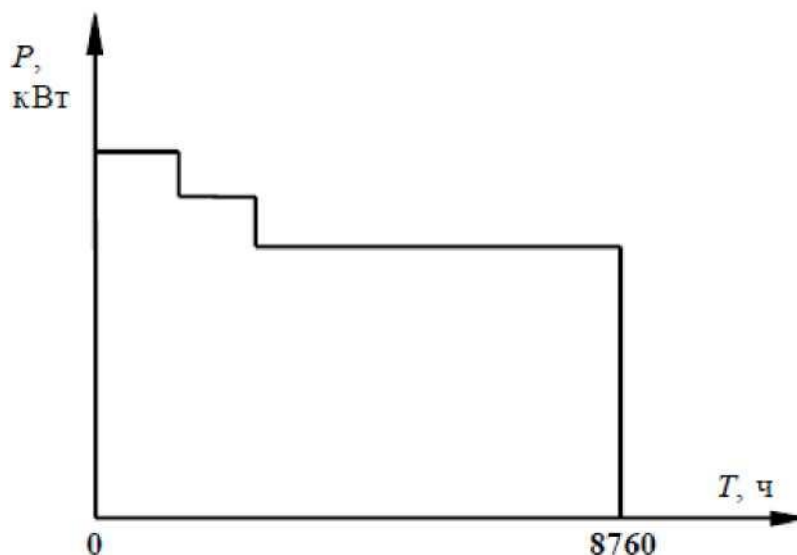


Рисунок 2.5 – Упорядоченный график нагрузки потребителя электроэнергии

Упорядоченные графики используют для определения расхода электроэнергии и времени максимума нагрузки T_m (времени максимальных потерь t), а также для установления закона распределения вероятности нагрузки.

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

Данное явление характеризуется коэффициентом совмещения максимумов: $K_0 = K_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{\sum P_{mi}}$. 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: $K_0 = f(K_u; T_m)$.

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):

$$P_c = \frac{\int_0^T P(t) dt}{T} \quad (2.4)$$

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

$$P_c = \frac{W}{T} \quad (2.5)$$

$$Q_c = \frac{V}{T} \quad (2.6)$$

$$P_c = \frac{\sum P_i \cdot \Delta t_i}{T} \quad (2.7)$$

$$i_c = \frac{1}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot T} \cdot \int_0^T \sqrt{P^2 + Q^2} dt \approx \frac{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (2.8)$$

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

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:

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T P^2(t) dt}, \quad (2.9)$$

$$I_{ск} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T I^2(t) dt} \quad (2.10)$$

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot \Delta t}{T}} \quad (2.11)$$

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

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

Максимальная длительная нагрузка характеризуется периодом усреднения от нескольких минут до нескольких часов (рисунок 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:

$$I_{пик} \geq I_{\text{дл}} \geq I_{ск} \geq I_c$$

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

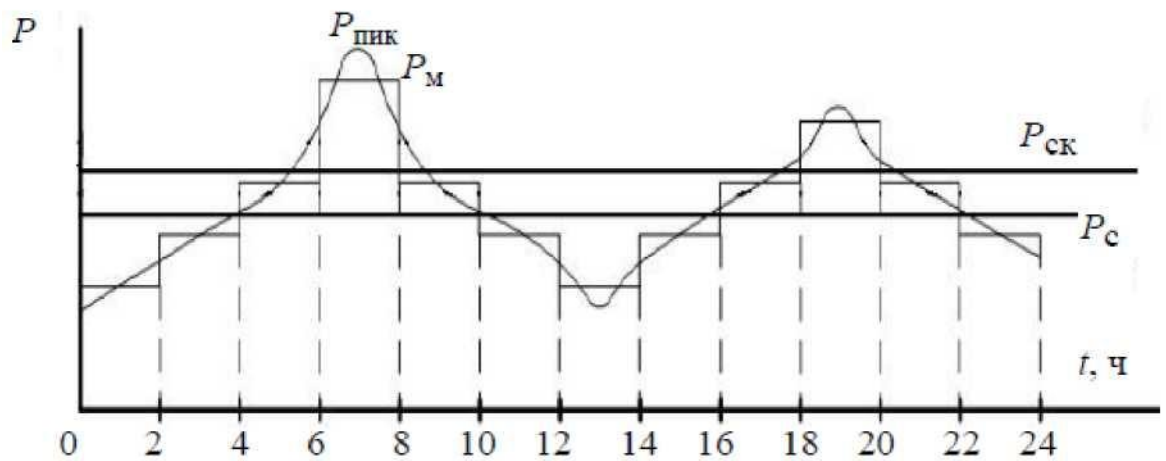


Рисунок 2.6 – Физические величины графика нагрузки

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:

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

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

где W , V – расходы активной и реактивной нагрузки соответственно.

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:

$$T_0 = \frac{G \cdot c}{F}, \quad (2.13)$$

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 таблице 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 мм^2 , 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.

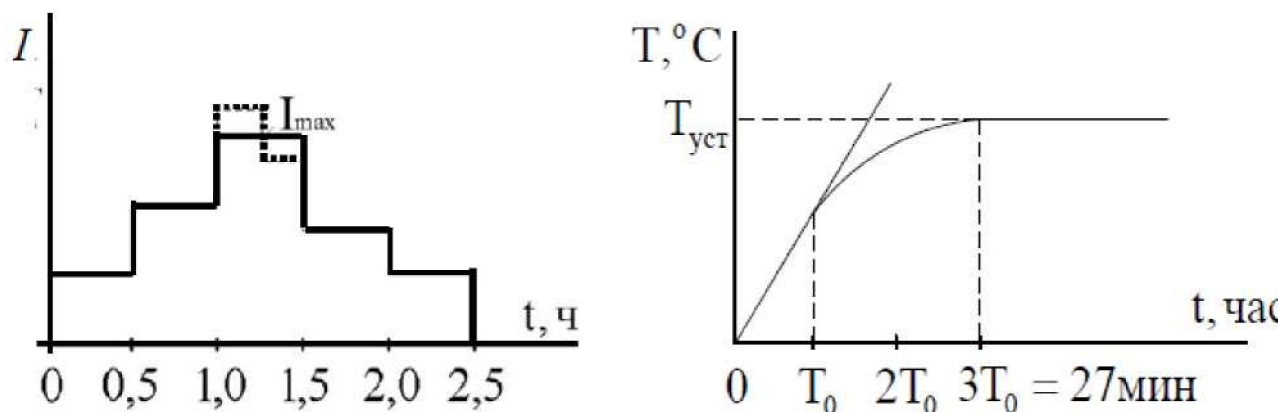


Рисунок 2.7 - Обоснование периода усреднения графика нагрузки

Предположим, что используя максимальную нагрузку (I_{\max}), представленную на графике (рисунок 2.7, $T_{уст}$ - установившаяся температура), выбран проводник сечением 35 мм^2 . Постоянная времени нагрева данного проводника $T_0 = 9$ минут. Это означает, что температура его нагрева станет равной $T_{уст}$,

через время $3T_0 = 27$ минут. В результате период нагрева практически соответствует периоду усреднения графика нагрузки, равному 30 минут.

Предположим, что используя эту же усредненную за 30 минут максимальную нагрузку I_{max} , выбран проводник сечением 6 мм^2 . Постоянная времени его нагрева $T_0 = 3$ минуты, поэтому период нагрева до установившейся температуры составит 9 минут (рисунок 2.8). Это означает, что для выбора такого проводника целесообразно использовать график с периодом усреднения 9 минут.

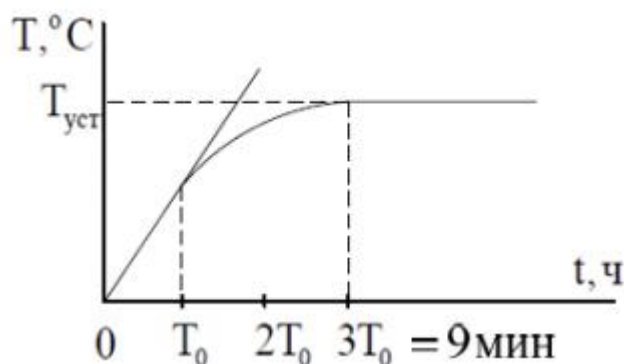


Рисунок 2.8 - Изменение температуры во времени проводника при $T_0 = 9$ мин

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:

Коэффициент максимума графика:

$$K_m = \frac{P_m}{P_c} \quad (2.14)$$

где P_m – максимальная нагрузка;

где P_c – средняя нагрузка.

В практике электроснабжения при определении расчетных нагрузок

вместо коэффициента максимума используют коэффициент расчетной нагрузки:

$$K_{\text{м}} = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{с}}} \quad (2.15)$$

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 использования, эффективного количества электроприемников и постоянной времени нагрева токоведущих частей: $K_{\text{р}} = f(K_{\text{и}}; n_{\text{э}}; T_0)$.

При этом приняты следующие постоянные времени нагрева:

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

$T_0 = 2,5$ ч - для магистральных шинопроводов, вводнораспределительных устройств и цеховых трансформаторных подстанций;

$T_0 > 30$ мин - для кабелей напряжением 6-10 кВ, питающих цеховые трансформаторные подстанции и распределительные пункты. Расчетная мощность нагрузки для этих элементов определяется при $K_{\text{р}} = 1$.

Коэффициент обратный коэффициенту максимума.

2. Коэффициент заполнения:

$$K_{\text{з.э}} = \frac{P_{\text{с}}}{P_{\text{м}}} = \frac{1}{K_{\text{м}}}$$

Коэффициент обратный коэффициенту максимума.

3. Коэффициент спроса:

$$K_{\text{с}} = \frac{P_{\text{р}}}{P_{\text{ном}}} \quad (2.18)$$

$$K_{\text{с}} = K_{\text{и}} \cdot K_{\text{м}},$$

где $K_{\text{и}}$ - коэффициент использования;

$K_{\text{м}}$ - коэффициент максимума.

4. Коэффициент формы графика:

$$K_{\text{ф.э}} = \frac{P_{\text{ск}}}{P_{\text{с}}} \geq 1$$

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

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

Например, режим работы насосного агрегата привода нефтедобывающего станка-качалки характеризуется периодическим графиком нагрузки (рисунок 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.

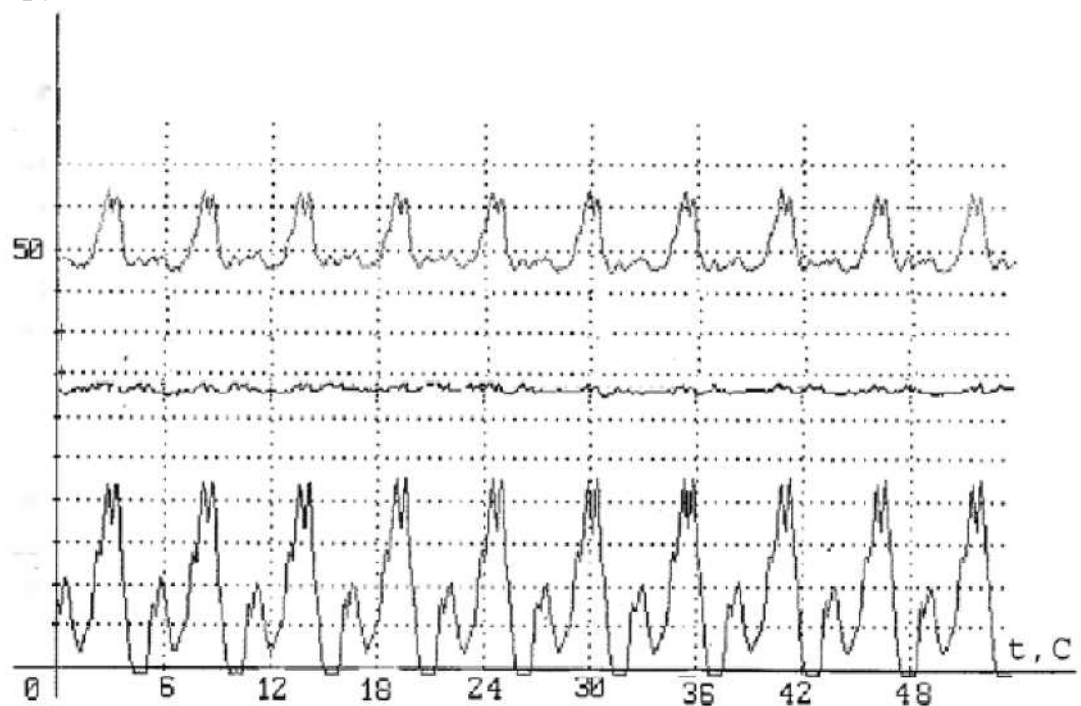


Рисунок 2.9 - График нагрузки агрегата нефтедобычи типа ШГН с двигателем марки Asle ($P_n = 50$ кВт, $\cos \varphi_k = 0,85$)

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:

$$K_B = \frac{\sum K_{ei} P_{ni}}{\sum P_{ni}}$$

Коэффициент включения K_e характеризует использование электроприемников по времени.

3. Коэффициент загрузки:

$$K_3 = \frac{P_{св}}{P_{ном}}$$

где $P_{св}$ - средняя мощность нагрузки за время включения (2.22)
электроприемника:

$$P_{св} = \frac{T_{ц}}{T_{г}} P_c$$

где $T_{ц}$ - время цикла;

$T_{г}$ - время включения;

P_c - средняя нагрузка за цикл или смену

$$P_{св} = \frac{\sum P_i \cdot \Delta t_i}{T_{г}} \quad (2.24)$$

Коэффициент загрузки характеризует использование электроприемников по мощности.

3. Коэффициент использования:

$$K_u = \frac{P_c}{P_{ном}} \quad (2.25)$$

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

$$K_u = \frac{\sum K_{ui} P_{номi}}{\sum P_{номi}} \quad (2.26)$$

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 $K_u = 0,12-0,2$).

$$K_u = K_z \cdot K_e \quad (2.27)$$

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 (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Характеристики режимов работы электроприемников

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

Контрольные вопросы.

- 1) Что называют графиком электрической нагрузки, какие нагрузки выделяют?
- 2) Типы индивидуальных графиков нагрузки.
- 3) Типы групповых графиков нагрузки.
- 4) Показатели графиков нагрузки.
- 5) Коэффициенты, характеризующие графики нагрузки.
- 6) Коэффициенты, характеризующие режимы работы электроприемников.