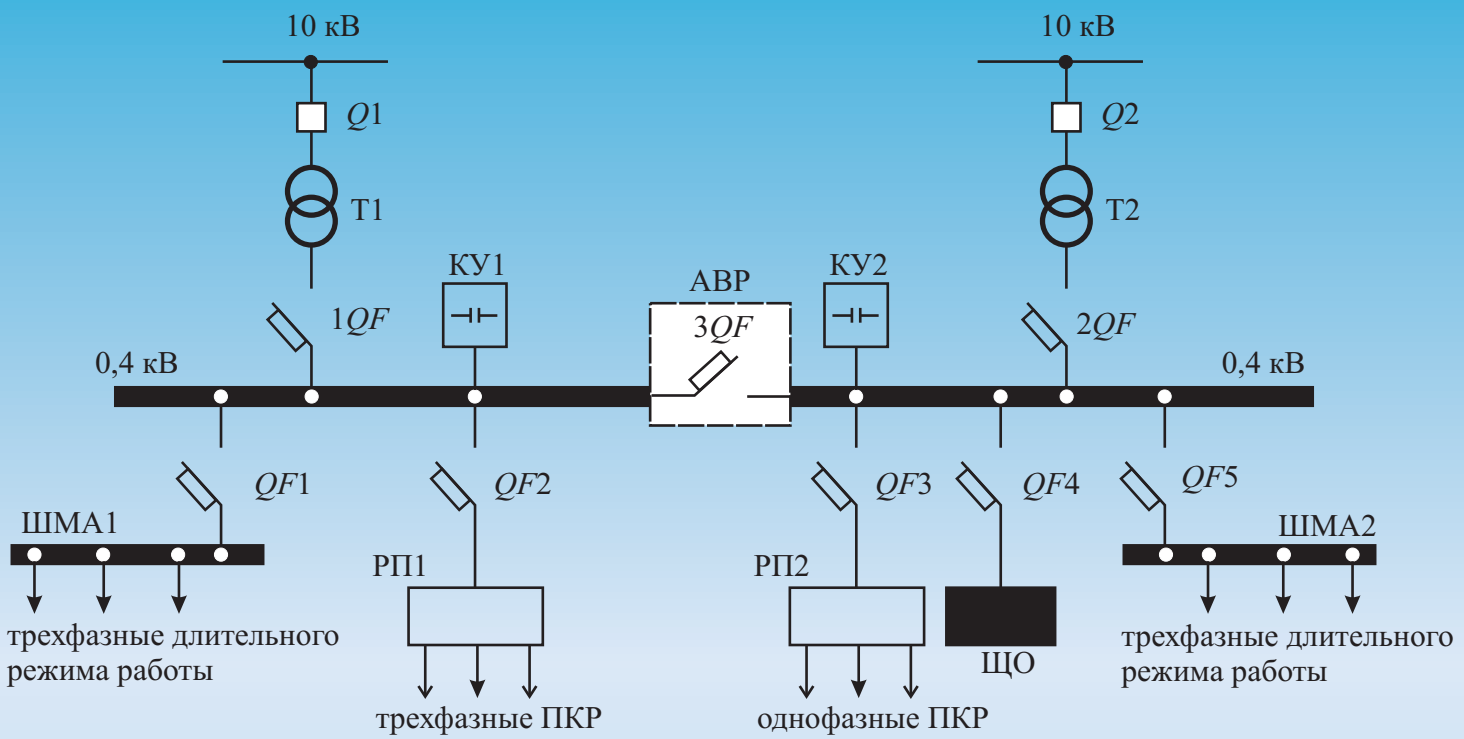
Библиотека СОК



А.В. Кабышев

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ

Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
"Томский политехнический университет"

А.В. Кабышев

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ

Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования

Учебное пособие

Издательство
Томского политехнического университета
Томск 2007

ББК 31.29–5я73
УДК 658.26:621.31(076)
К 124

Кабышев А.В.

К124 Электроснабжение объектов. Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования: учебное пособие/А.В. Кабышев. –Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 185с.

В пособии изложены способы расчета электрических нагрузок промышленных предприятий и методика оценки по ним температуры нагрева электрооборудования. Приведены основные положения метода упорядоченных диаграмм, расчет с использованием коэффициентов спроса и разновременности максимумов нагрузки, определение пиковых и несимметричных нагрузок. Нагрев проводников, силовых трансформаторов и электродвигателей изложен с учетом графиков их нагрузок и режима работы. Теоретические основы расчета сопровождаются рассмотрением большого числа примеров. Для закрепления изложенного материала по каждому из разделов приведены тестовые и расчетные задания.

Пособие подготовлено на кафедре электроснабжения промышленных предприятий ТПУ, ориентировано на студентов электроэнергетических и электромеханических специальностей, предназначено для самостоятельной работы.

ББК 31.29–5я73
УДК 658.26:621.31(076)

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензенты
Доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
ФГНУ НИИ высоких напряжений
В.И. Курец
Технический директор
ОАО "Томский электроламповый завод", г.Томск
А.И. Прудников

© Томский политехнический университет, 2007
© Оформление. Издательство ТПУ, 2007
© А.В. Кабышев, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ 5
1.1. Приемники и потребители электроэнергии 5
1.2. Графики электрических нагрузок, коэффициенты их характеризующие, параметры электропотребления 13
1.3. Расчет электрических нагрузок 20
1.3.1. Определение расчетных электрических нагрузок в трехфазных сетях 20
1.3.2. Расчет несимметричных электрических нагрузок 38
1.3.3. Пиковые нагрузки 48
1.4. Определение расчетной электрической нагрузки цеха 53
1.5. Тестовые и расчетные задания по определению электрических нагрузок 67
1.5.1. Тестовые задания 67
1.5.2. Расчетные задания 92
2. НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ 118
2.1. Нагрев проводников 118
2.1.1. Установившийся нагрев проводника при длительной нагрузке 119
2.1.2. Изменение превышения нагрева проводника при переменной нагрузке 121
2.1.3. Учет постоянной времени нагрева при выборе сечения проводников 131
2.2. Тепловой режим трансформаторов 133
2.2.1. Тепловая диаграмма трансформатора 133
2.2.2. Нагрев трансформаторов при неравномерном графике нагрузки 136
2.2.3. Нагрузочная способность трансформатора 140
2.3. Нагрев электрических машин 148
2.4. Старение электрической изоляции 148
2.5. Тестовые и расчетные задания по нагреву проводников и электрооборудования 155
2.5.1. Тестовые задания 155
2.5.2. Расчетные задания 165
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 176
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 178
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 179

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование систем электроснабжения требует комплексного подхода к выбору и оптимизации схем электрических сетей, технико-экономическому обоснованию решений, определяющих состав, структуру, внешние и внутренние связи, динамику развития, параметры и надежность работы системы в целом и ее отдельных элементов. Особое место среди этих вопросов занимает задача определения электрических нагрузок объектов – для отдельных групп электроприемников, цехов и предприятия в целом. Расчет нагрузок – это первый и основополагающий этап проектирования внутризаводской и цеховой сетей.

Основное значение имеет определение величины расчетных нагрузок, задающих выбор элементов сети по необходимой пропускной способности из условий нагрева. Для проверки элементов сетей по условиям перегрузки, выбора устройств и уставок защиты, проверки электрических сетей по условиям самозапуска двигателей требуется определение пиковых токов. В эксплуатации при работе электрооборудования и проводников в послеаварийном режиме, а также при росте нагрузок необходимы оценки нагрева изделий, чтобы исключить их длительную перегрузку, влияющую на ресурс работы. Поэтому правильное определение электрических нагрузок является решающим фактором при проектировании и эксплуатации электрических сетей систем электроснабжения.

Предлагаемое учебное пособие предназначено для студентов электроэнергетических и электромеханических специальностей. В нем изложены способы расчета электрических нагрузок на различных уровнях системы электроснабжения объекта, даны рекомендации по оценке температуры нагрева проводников, силовых трансформаторов и электродвигателей. Рассматриваются основные положения метода упорядоченных диаграмм показателей графиков нагрузок, расчет с использованием коэффициентов спроса и разновременности максимумов нагрузки, вспомогательные методы определения расчетных нагрузок, определение пиковых и несимметричных нагрузок. Нагрев электрооборудования излагается с учетом графиков нагрузок и режима его работы.

Наличие данного пособия не освобождает студентов от необходимости использования другой учебной литературы при проработке отдельных вопросов излагаемых тем.

По вопросам, которые изложены только частично, по тексту даются ссылки на соответствующую литературу.

1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1. Приемники и потребители электроэнергии

Электроприемником называется аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии.

Потребителем электрической энергии является электроприемник или группа электроприемников, объединенных технологическим процессом и размещающихся на определенной территории.

Различают восемь номинальных режимов работы электроприемников (ЭП), которые определяют временные графики нагрузок:

- продолжительный (длительный);
- кратковременный;
- периодический повторно-кратковременный;
- периодический повторно-кратковременный с влиянием пусковых процессов;
- периодический повторно-кратковременный с влиянием пусковых процессов и электрического торможения;
- перемежающийся;
- периодический перемежающийся с влиянием пусковых процессов и электрическим торможением;
- периодический перемежающийся с периодически изменяющейся частотой вращения.

Для большинства ЭП промышленных предприятий характерны первые три режима работы. Для них на рис. 1.1 представлен характер изменения нагрузки P, потерь мощности ΔP и кривой нагрева θ.

Продолжительный режим S_1 – это режим, когда работа ЭП при неизменной нагрузке продолжается столь длительное время, что превышение температуры нагрева всех его частей над температурой окружающей среды достигает практически установившегося значения (рис. 1.1,а). При этом все параметры рабочего режима, указанные в паспорте на ЭП, соответствуют режиму работы S_1. Практически установившейся $\theta_{уст}$ считается температура, изменение которой в течение 1 часа не превышает 1°С при практически неизменных нагрузках сети и температуре окружающей среды. Для ЭП продолжительного режима работы ее значение достигается за время 3τ, где τ – постоянная времени нагрева (это время, в течение которого температура ЭП и проводника питающей сети достигла бы

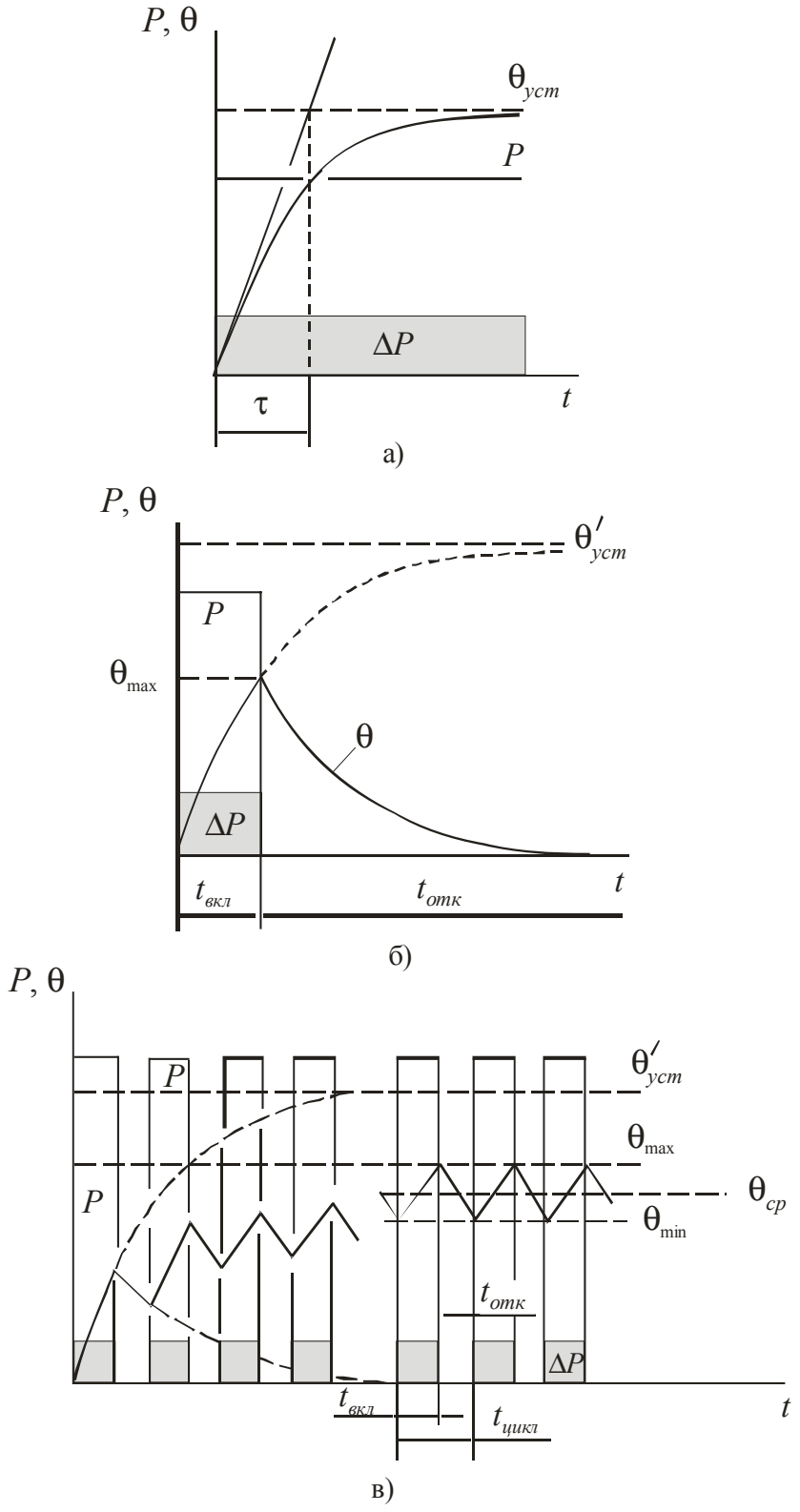


Рис. 1.1. Графики основных режимов работы электроприемников: а – продолжительный; б – кратковременный; в – повторно-кратковременный. $\theta'_{уст}$ – предполагаемое установившееся значение температуры.

установившегося значения $\theta_{уст}$, если бы отсутствовала отдача тепла в окружающую среду). Методика определения τ приведена на рис. 1.1,а.

Для силовой (двигательной) нагрузки и нагрузки электропечей номинальная мощность ЭП принимается по паспортным данным:

$$P_{ном\ ЭП} = P_{пасп}, \qquad (1.1)$$

а для трансформаторов и выпрямительных электроустановок рассчитывается по соотношению:

$$P_{ном} = S_{пасп} \cdot \cos\varphi_{пасп}. \qquad (1.2)$$

Кратковременный режим S_2 (рис. 1.1,б) характеризуется небольшими по времени периодами работы и длительными паузами с отключением ЭП от сети. В этом случае при нагреве температура частей оборудования не достигает установившихся значений, а при отключении происходит охлаждение до температуры, превышающей температуру окружающей среды не более чем на 2°С.

Ориентировочно потребляемая мощность ЭП в режиме S_2 определяется:

$$P_{S2} \le P_{S1}\sqrt{\frac{1}{1-\exp\left(-\,t/\tau\right)}}, \qquad (1.3)$$

где P_{S1} – номинальная мощность электроприемника в режиме S_1.

Периодический *повторно-кратковременный режим* (*ПКР*) работы S_3 – это режим, при котором кратковременные периоды работы ЭП чередуются с паузами. При этом и рабочие периоды, и паузы не настолько длительны, чтобы температура достигала установившихся значений. В результате многократных циклов температура достигает некоторой средней установившейся величины $\theta_{ср}$ (рис. 1.1,в). При этом потери при пуске почти не оказывают влияния на температуру частей ЭП.

Электроприемники ПКР характеризуются величиной продолжительности включения (в относительных единицах или процентах):

$$\text{ПВ} = \frac{t_{вкл}}{t_{вкл} + t_{откл}} = \frac{t_{вкл}}{t_{цикл}}, \qquad (1.4)$$

где $t_{вкл}$ – период работы;

$t_{откл}$ – период отключения;

$t_{цикл}$ – время всего цикла.

Продолжительность цикла обычно не превышает 10 мин. Если $t_{цикл} > 10$ мин, то режим работы считается продолжительным.

Для ЭП повторно-кратковременного режима указанная в паспорте мощность повторно-кратковременного режима должна быть приведена к номинальной мощности продолжительного режима $P_{ном}$ при ПВ = 100%:

$$P_{ном} = P_{пасп}\sqrt{ПВ_{пасп}}\,, \qquad (1.5)$$

где $P_{пасп}$ – паспортная мощность электроприемника, кВт;

$ПВ_{пасп}$ – паспортная продолжительность включения, отн.ед., (стандартный ряд значений ПВ: 15, 25, 40 и 60%).

Для сварочных машин и трансформаторов электрических печей, паспортная мощность которых указывается в кВА, номинальная активная мощность определяется:

$$P_{ном} = S_{пасп}\cos\varphi_{пасп}\sqrt{ПВ_{пасп}}\,, \qquad (1.6)$$

где $S_{пасп}$ – паспортная мощность трансформатора;

$\cos\varphi_{пасп}$ и $ПВ_{пасп}$ – паспортные значения коэффициента мощности и продолжительности включения.

Периодический *повторно-кратковременный режим с влиянием пусковых процессов* S_4 (рис. 1.2) – это последовательность идентичных циклов работы, каждый из которых включает время пуска t_c, время работы при постоянной нагрузке t_p и время паузы t_n, за которое ЭП не охлаждается до температуры окружающей среды.

Периодический *повторно-кратковременный режим с влиянием пусковых процессов и электрического торможения* S_5 (рис. 1.3) – отличается от режима S_4 наличием дополнительного периода быстрого электрического торможения t_m. Характерен для приводов лифтов и подъемно-транспортных систем.

Перемежающийся режим работы S_6 (рис. 1.4) – это режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки установки t_p чередуются с периодами холостого хода t_{xx}. При этом превышения температуры частей электрооборудования не достигают установившихся значений.

Относительная продолжительность нагрузки составляет:

$$ПН = \frac{t_p}{t_p + t_{xx}}\,, \qquad (1.7)$$

где t_p – рабочее время механизма;

t_{xx} – время его холостого хода.

Периодический *перемежающийся режим с влиянием пусковых процессов и электрическим торможением* S_7 – включает последовательность идентичных циклов, содержащих время пуска t_c, время работы с постоянной нагрузкой и время быстрого торможения t_T (рис. 1.5).

Периодический *перемежающийся режим с периодически изменяющейся частотой вращения* S_8 – основным его отличием от S_7

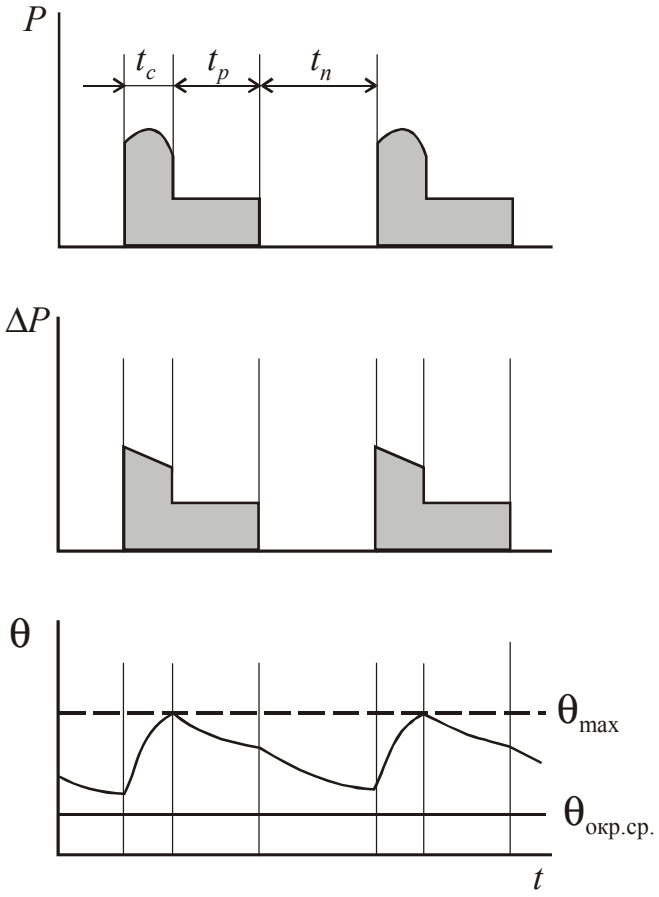


Рис. 1.2. Графики работы ЭП с повторно-кратковременным режимом с влиянием пусковых процессов

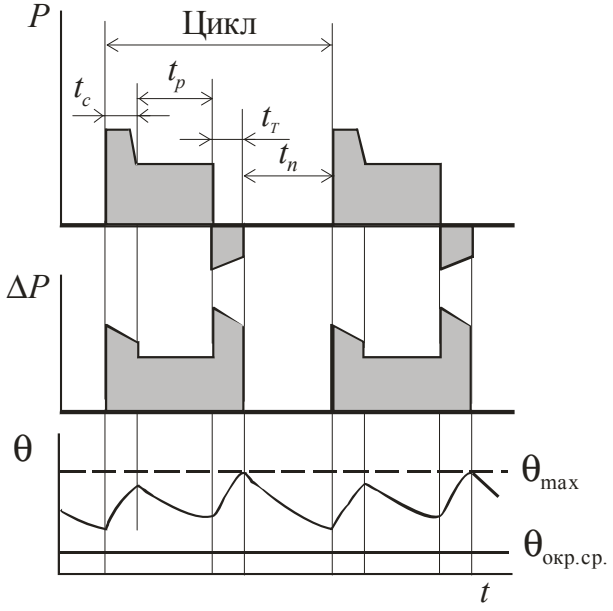


Рис. 1.3. Графики работы ЭП с повторно-кратковременным режимом с влиянием пусковых процессов и электрического торможения

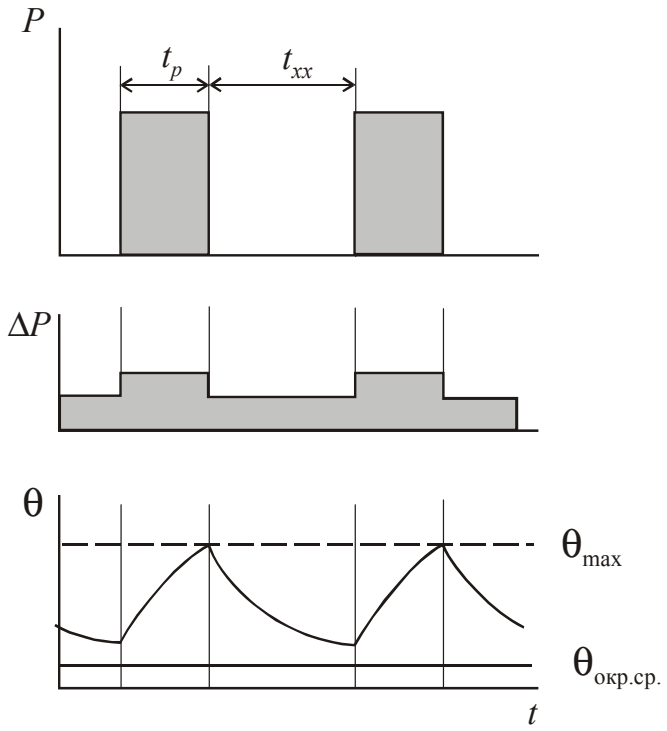


Рис. 1.4. Графики работы ЭП с перемежающимся режимом

является различная частота вращения при неизменных нагрузках на валу, то есть при мощности P_1 частота n_1, при мощности $P_2 = P_1$ – частота n_2 и т.д. (рис. 1.6). Такой режим работы характерен для многоскоростных двигателей, работающих с неизменной нагрузкой на валу, например, в приводах моталок со ступенчатой намоткой или экструдерах.

Пример 1.1. Определить номинальную мощность группы трехфазных электроприемников с указанными в таблице 1.1 техническими данными.

Таблица 1.1.

Паспортные данные электроприемников (к примеру 1.1)

№ п/п	Наименование электроприемника	Количество ЭП	Паспортное значение мощности	Паспортное значение cosφ
1	Молот ковочный	7	15 кВт	0,65
2	Пресс штамповочный	12	4,5 кВт	0,60
3	Кран мостовой, ПВ=25%	2	30 кВт	0,50
4	Тележка подвесная, ПВ=40%	4	8 кВт	0,50
5	Тельфер транспортный, ПВ=60%	3	10 кВт	0,50
6	Трансформатор сварочный, ПВ=40%	5	28 кВА	0,40
7	Аппарат дуговой сварки, ПВ=60%	5	16 кВА	0,35
8	Аппарат стыковой сварки, ПВ=25%	5	14 кВА	0,45

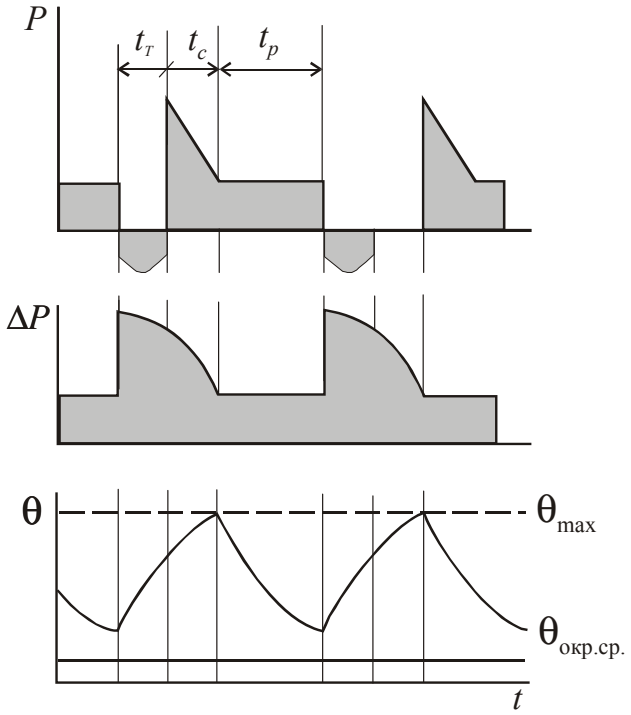


Рис. 1.5. Графики работы электроприемников с перемежающимся режимом с влиянием пусковых процессов и электрическим торможением

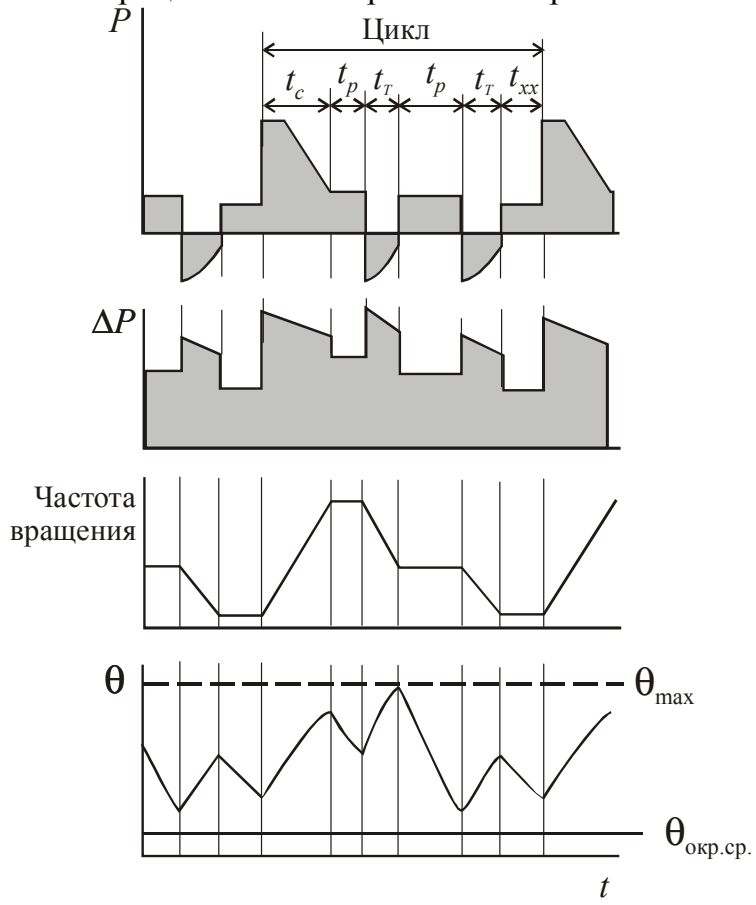


Рис. 1.6. Графики работы электроприемников с перемежающимся режимом с периодически изменяющейся частотой вращения

Решение.

1. В зависимости от режима работы электроприемники разбиваются на подгруппы:

- продолжительный режим (поз. 1, 2);
- повторно-кратковременный режим (поз. 3-8).

2. Номинальная мощность ЭП продолжительного режима работы определяется по соотношению (1.1):

$$P_{ном\ 1,\ 2} = \sum_{i=1}^{n} P_{насп\ i} = 7 \cdot 15 + 12 \cdot 4{,}5 = 159 \text{ кВт}.$$

3. Для электроприемников ПКР указанная в паспорте мощность приводится к номинальной мощности продолжительного режима при ПВ=100%. Номинальная мощность подъемно-транспортных средств (поз. 3-5) рассчитывается по выражению (1.5), так как в паспорте задана активная мощность (кВт), а сварочного оборудования (поз. 6-8) – по (1.6), так как в паспорте указана полная мощность (кВА) и cosφ:

$$P_{ном\ 3–5} = \sum_{i=1}^{n} P_{насп\ i} \sqrt{\text{ПВ}_{насп\ i}} = 7 \cdot 30 \cdot \sqrt{0{,}25} + 4 \cdot 8 \cdot \sqrt{0{,}4} + 3 \cdot 10 \cdot \sqrt{0{,}6} = 73{,}6 \text{ кВт};$$

$$P_{ном\ 6–8} = \sum_{i=1}^{n} S_{насп\ i} \cos\varphi_{насп\ i} \sqrt{\text{ПВ}_{насп\ i}} = 5 \cdot 28 \cdot 0{,}40 \cdot \sqrt{0{,}4} + 5 \cdot 16 \cdot 0{,}35 \cdot \sqrt{0{,}6} +$$

$$+ 5 \cdot 14 \cdot 0{,}45 \cdot \sqrt{0{,}25} = 72{,}9 \text{ кВт}.$$

4. Номинальная мощность всей группы электроприемников:

$$P_{ном} = P_{ном\ 1,\ 2} + P_{ном\ 3–5} + P_{ном\ 6–8} = 159 + 73{,}6 + 72{,}9 = 305{,}5 \text{ кВт}.$$

Пример 1.2. Определить режим работы электроприемника, график нагрузки которого приведен на рис.1.7.

Решение.

Из графика нагрузки видно, что периоды работы электроприемника ($t_{вкл}$) чередуется с паузами($t_{откл}$). Время цикла составляет:

$$t_{цикл} = t_{вкл} + t_{откл} = 8 + 6 = 14 \text{ мин}.$$

При длительности цикла $t_{цикл} > 10$ мин режим работы электроприемника считается продолжительным.

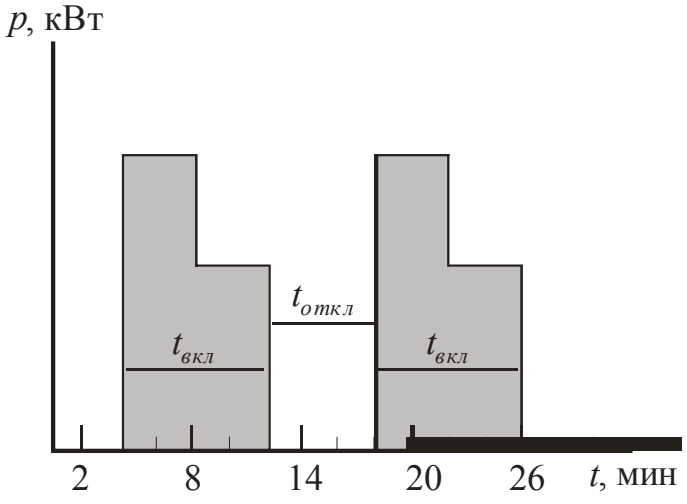


Рис. 1.7. График нагрузки электроприемника (к примеру 1.2)

1.2. Графики электрических нагрузок, коэффициенты их характеризующие, параметры электропотребления

Электрическая нагрузка – это электрическая мощность $P(t)$ при равномерном потреблении электроэнергии W в течение времени t:

$$P = \frac{W}{t}. \qquad (1.8)$$

Для рационального проектирования электроустановок и их эксплуатации необходимо знать изменение нагрузок в течение смены, суток, месяца, года. Это изменение характеризуется графиками нагрузок. График нагрузки – это кривая (диаграмма), показывающая изменение нагрузок за определенный промежуток времени. Обычно графики нагрузки строятся и анализируются за базисное время, кратное длительности законченного технологического цикла. Различают индивидуальные и групповые графики, графики активных и реактивных нагрузок.

По *продолжительности* графики нагрузки строятся суточными и годовыми. При построении суммарного суточного или годового графика нагрузки необходимо определить нагрузки потребителей предприятия и учесть потери мощности в электрооборудовании и в сети (рис.1.8). Предприятия каждой отрасли промышленности имеют свой, характерный график нагрузки, определяемый технологическим процессом производства [1].

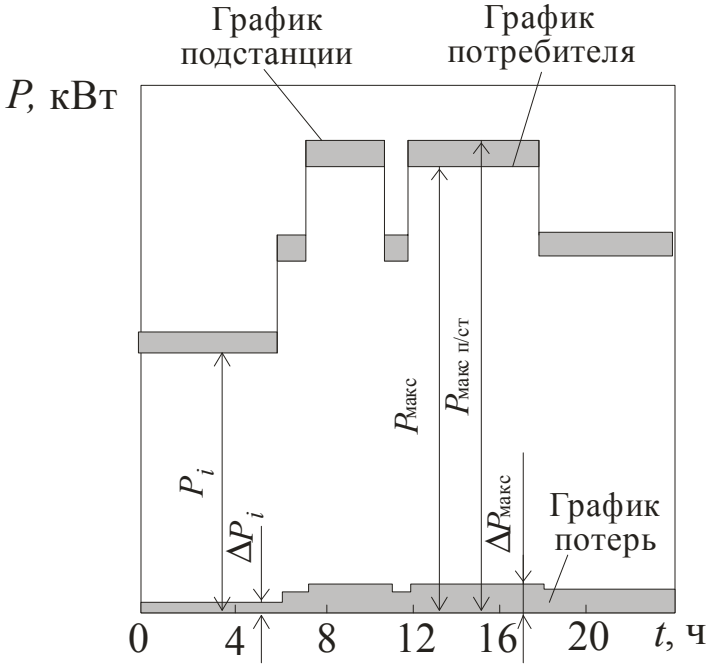


Рис. 1.8. Суммарный суточный график нагрузки промышленного предприятия

С точки зрения *регулярности* нагрузок их *индивидуальные* графики подразделяются на:

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

У периодических графиков, соответствующих поточному производству, время цикла $t_ц$ строго постоянно (рис. 1.9,а):

$$t_ц = t_p + t_o, \tag{1.9}$$

где t_p, t_o – времена работы и остановки (паузы), которые также постоянны.

У циклических графиков (рис. 1.9,б), соответствующих непоточному производству, время остановок различно, но характер и продолжительность рабочих интервалов неизменны. За базисное время средняя продолжительность цикла составляет:

$$t_{ц\,ср} = t_p + \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{o\,i}}{n}, \tag{1.10}$$

где n – число циклов за базисное время;

$t_{o\,i}$ – время остановки внутри циклов.

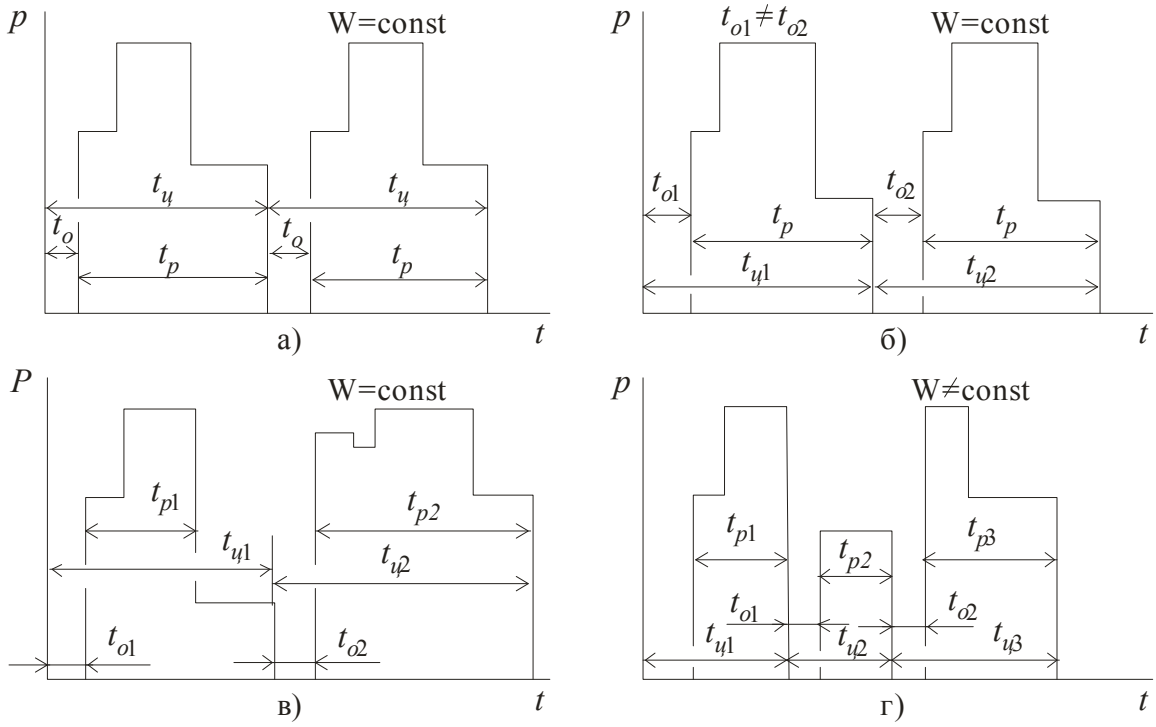


Рис. 1.9. Индивидуальные графики нагрузок:
а – периодический; б – циклический; в – нециклический; г – нерегулярный

У нециклического (рис. 1.9,в) и нерегулярного (рис. 1.9,г) графиков время циклов, рабочее время и время пауз различно. Для всех графиков, кроме нерегулярных, потребление электроэнергии за смену является постоянной величиной.

Групповые графики нагрузок определяются суммированием индивидуальных графиков нагрузок электроприемников, входящих в данную группу. По степени *регулярности* они подразделяются на:

- периодические;
- почти периодические;
- нерегулярные.

Индивидуальные графики энергоемких ЭП с резкопеременной, толчковой нагрузкой необходимы для выбора электрических сетей этих электроприемников, расчета отклонений и колебаний напряжения, выбора мероприятий по улучшению качества электроэнергии.

Групповые графики используются для проектирования и оптимизации систем электроснабжения.

Суточные графики нагрузок потребителей могут строиться по показаниям счетчиков. Для этого фиксируют показания счетчиков активной и реактивной энергии через определенный интервал времени (30 или 60 мин) и определяют среднюю мощность нагрузки за этот интервал.

Анализ графиков нагрузки позволяет определить величину сечений проводов и жил кабелей, оценить потери напряжения, выбрать мощности генераторов электростанций, решить технико-экономические вопросы выбора оборудования, спроектировать оптимальный вариант системы электроснабжения объекта.

Суточные графики позволяют спланировать ремонт электрооборудования.

Годовые графики строятся по двум характерным суточным: за зимние и летние сутки. Они используются в технико-экономических расчетах при определении наивыгоднейшего типа и мощности трансформаторов подстанций, генераторов электростанций, при выборе вариантов электроснабжения.

Графики нагрузок характеризуются следующими параметрами:

- средняя активная и реактивная мощность нагрузки за наиболее загруженную смену:

$$P_{см} = \frac{W}{T_{см}};\ Q_{см} = \frac{V}{T_{см}}, \qquad (1.11)$$

где W и V – расход активной и реактивной энергии за наиболее загруженную смену (наиболее загруженной считается смена с

максимальным расходом активной энергии);

$T_{см}$ – продолжительность смены;

- среднесуточная мощность нагрузки (определяются аналогично среднесменным, только для суток);
- максимальная нагрузка заданной продолжительности – наибольшая из всех средних значений за заданный промежуток времени, например, из средних 30-минутных нагрузок наиболее загруженной смены (получасовой максимум);
- расчетная нагрузка по допустимому нагреву – такая длительная неизменная нагрузка элемента системы электроснабжения, которая эквивалентна ожидаемой изменяющейся нагрузке по тепловому воздействию (при переменном графике нагрузок принимаются максимальные нагрузки заданной продолжительности, а при мало изменяющемся (практически постоянном) – средняя нагрузка);
- среднеквадратичная нагрузка:

$$P_{срк} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + ... + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}}, \qquad (1.12)$$

где $P_1, P_2, \ldots, P_n$ – средние нагрузки за интервалы времени между замерами;

$t_1, t_2, \ldots, t_n$ – принятый интервал времени между замерами.

Аналогично определяются реактивная и полная нагрузки.

При исследовании и расчете электрических нагрузок применяют безразмерные показатели (коэффициенты) графиков нагрузок, характеризующие режим работы приемников электроэнергии по мощности или во времени. Расчетные формулы основных из них приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2.

Показатели графиков электрических нагрузок по активной мощности

Коэффициент	Расчетные формулы показателей	
	Индивидуальные графики	Групповые графики
Использования	$к_и = p_{см}/p_{ном}$ $к_и = к_{вкл} \cdot к_{загр}$	$K_и = \frac{P_{см}}{P_{ном}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} к_{и\,i} \cdot p_{ном\,i}}{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}}$ $K_и = K_{вкл} \cdot K_{загр}$

Окончание таблицы 1.2.

Коэффициент	Расчетные формулы показателей	
	Индивидуальные графики	Групповые графики
Включения	$\kappa_{вкл} = \frac{t_{вкл}}{t_{цикл}} = \frac{t_р + t_{хх}}{t_{цикл}}$	$K_{вкл} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \kappa_{вкл\,i} \cdot p_{ном\,i}}{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}}$
Загрузки	$\kappa_{загр} = \frac{p_{с.\,вкл}}{p_{ном}} = \frac{\kappa_и}{\kappa_{вкл}}$	$K_{загр} = \frac{K_и}{K_{вкл}}$
Формы графика нагрузки	$\kappa_ф = \frac{p_{ск}}{p_{см}}$	$K_ф = \frac{P_{ск}}{P_{см}}$ $P_{ск} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + ... + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}}$, где $P_1, P_2, \ldots, P_n$ – средняя нагрузка на интервалах времени между замерами показаний приборов; $t_1, t_2, \ldots, t_n$ – временные интервалы между замерами. По показаниям счетчиков W_a за m интервалов времени t: $K_ф = \sqrt{m} \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (\Delta W_{a\,i})^2}}{W_a}$, где m – число интервалов времени t, на которое разбит график нагрузки.
Максимума	—	$K_м = \frac{P_р}{P_{см}}$ $K_м = f(n_{эф,}\ K_и)$ – определяют по таблице (см., например [2])
Спроса	—	$K_с = \frac{P_р}{P_{ном}}$ $K_с = K_и \cdot K_м$
Заполнения графика нагрузки	—	$K_{з.г.} = \frac{P_{см}}{P_р} = \frac{1}{K_м}$
Разновременности максимумов нагрузки	—	$K_{р.м.} = \frac{P_р}{\sum_{i=1}^{n} P_{р\,i}}$ $K_{р.м.} = 0{,}85 \div 1{,}0$

Пример 1.3. При обследовании трехфазной линии, питающей 154 электродвигателя металлообрабатывающих станков с общей номинальной мощностью $P_{ном} = 370$ кВт ($p_{ном\,\min} = 1{,}1$ кВт, $p_{ном\,\max} = 3$ кВт) и коэффициентом включения $K_{вкл} = 0{,}6$, за наиболее загруженную смену был получен график нагрузки, показанный на рис. 1.10. Нагрузка фиксировалась с помощью счетчиков активной энергии через каждые 10 мин. Продолжительность смены $T_{см} = 7{,}5$ часов, расчетная нагрузка (получасовой максимум) составляет $P_{расч} = 62$ кВт. Определить расход электроэнергии за смену; максимальную, среднюю и среднеквадратичную нагрузку линии; коэффициенты, характеризующие данный график нагрузки.

Решение.

Площадь, ограниченная ступенчатой кривой графика нагрузки за $T_{см}$ (рис. 1.10), представляет собой потребленную за смену электроэнергию:

$$W = \sum_{i=1}^{n} P_i \cdot T_i = 37 \cdot \frac{1}{6} + 37 \cdot \frac{1}{6} + 48 \cdot \frac{1}{6} + \ldots = 405 \text{ кВт·ч}.$$

Из графика нагрузки линии (рис. 1.10) следует, что максимальная нагрузка составляет 90 кВт, а среднесменная:

$$P_{см} = \frac{W}{T_{см}} = \frac{405}{7{,}5} = 54 \text{ кВт}.$$

В соответствии с (1.12) среднеквадратичная нагрузка составит:

$$P_{срк} = \sqrt{\frac{P_1^2 T_1 + P_2^2 T_2 + \ldots + P_n^2 T_n}{T_1 + T_2 + \ldots + T_n}} = \sqrt{\frac{37^2 \cdot \frac{1}{6} + 37^2 \cdot \frac{1}{6} + 48^2 \cdot \frac{1}{6} + \ldots}{\frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \ldots}} = 58 \text{ кВт}$$

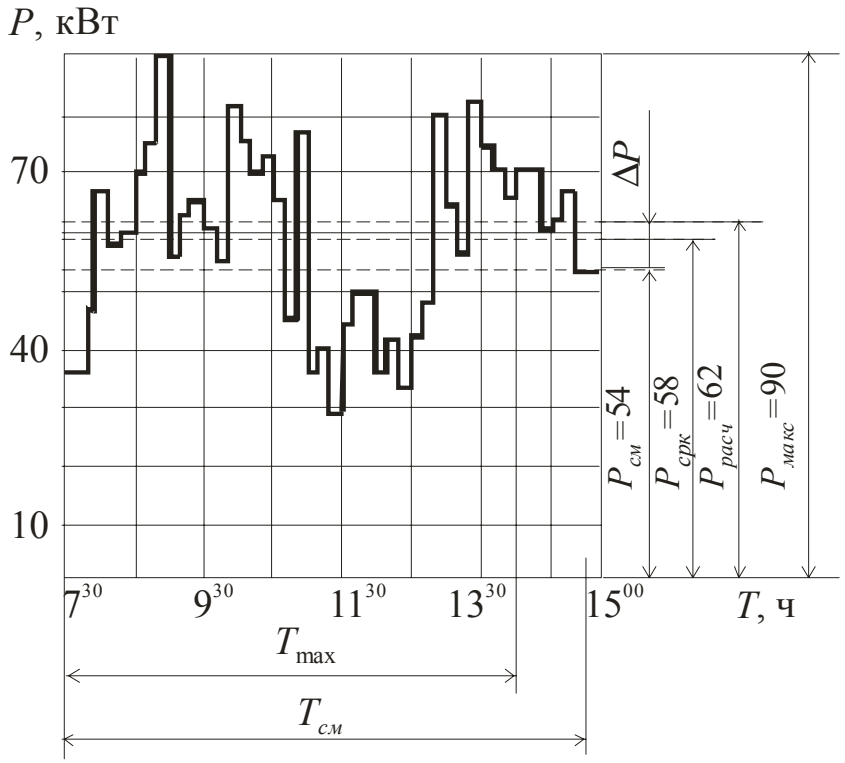


Рис. 1.10. График нагрузки линии, питающей участок цеха (к примеру 1.3)

По приведенному графику нагрузки и рассчитанным параметрам электропотребления могут быть определены (см. табл. 1.2):

- средневзвешенный коэффициент использования группы электроприемников: $K_и = \frac{P_{см}}{P_{ном}} = \frac{54}{370} = 0{,}15$;
- коэффициент загрузки: $K_{загр} = \frac{K_и}{K_{вкл}} = \frac{0{,}15}{0{,}6} = 0{,}25$;
- коэффициент формы графика нагрузки: $K_ф = \frac{P_{ск}}{P_{см}} = \frac{58}{54} = 1{,}08$;
- коэффициент максимума: $K_м = \frac{P_{расч}}{P_{см}} = \frac{62}{54} = 1{,}15$;
- коэффициент спроса: $K_с = \frac{P_{расч}}{P_{ном}} = \frac{62}{370} = 0{,}17$ или $K_с = K_и \cdot K_м = 0{,}15 \cdot 1{,}15 = 0{,}17$;
- коэффициент заполнения графика нагрузки: $K_{з.г.} = \frac{P_{см}}{P_{расч}} = \frac{54}{62} = 0{,}87$ или $K_{з.г.} = \frac{1}{K_м} = \frac{1}{1{,}15} = 0{,}87$;
- число часов использования максимума нагрузки: $T_{\max} = K_{з.г.} \cdot T_{см} = 0{,}87 \cdot 7{,}5 = 6{,}5$ ч.

Пример 1.4. Для электроприеника, график нагрузки которого приведен на рис. 1.7, определить коэффициенты включения и загрузки, если коэффициент использования равен 0,25.

Решение.

1. Коэффициент включения – это отношение продолжительности включения приемника в цикле $t_{вкл}$ ко всей продолжительности цикла $t_{цикл} = t_{вкл} + t_{откл}$. По графику нагрузки: $t_{вкл} = 8$ мин, $t_{цикл} = 14$ мин, то есть:

$$к_{вкл} = \frac{t_{вкл}}{t_{цикл}} = \frac{8}{14} = 0{,}57 .$$

2. Коэффициент загрузки – это отношение фактически потребленной приемником активной мощности $P_{факт}$ за время включения в течение цикла к его номинальной мощности $P_{ном}$. Если принять, что фактически потребленная за время включения мощность равна средней $P_{ср.\,вкл}$, то:

$$к_{загр} = \frac{P_{факт}}{P_{ном}} = \frac{P_{ср.\,вкл}}{P_{ном}} = \frac{1}{P_{ном}} \cdot \frac{1}{t_{вкл}} \int_0^{t_{цикл}} P dt = \frac{P_{ср}}{P_{ном}} \cdot \frac{t_{цикл}}{t_{вкл}} = \frac{к_и}{к_{вкл}} = \frac{0{,}25}{0{,}57} = 0{,}44 .$$

Коэффициент загрузки и включения непосредственно связаны с технологическим процессом и изменяются с изменением режима работы электропримемника.

1.3. Расчет электрических нагрузок

Расчет электрических нагрузок выполняется с целью правильного выбора сечений линий и распределительных устройств, коммутационных и защитных аппаратов, числа и мощности трансформаторов на разных уровнях системы электроснабжения. В зависимости от места определения расчетных нагрузок и необходимой точности расчет выполняется:

- методом упорядоченных диаграмм показателей графиков нагрузок (по средней мощности и коэффициенту максимума);
- по установленной мощности и коэффициенту спроса;
- по средней мощности и коэффициенту формы графика нагрузок;
- по удельной нагрузке на единицу производственной площади;
- по удельному расходу электроэнергии на единицу продукции при заданном объеме выпуска продукции за определенный период.

Определение расчетной нагрузки по удельным показателям дополняет первые три метода и позволяет проверить полученные по ним результаты.

1.3.1. Определение расчетных электрических нагрузок в трехфазных сетях

Метод упорядоченных диаграмм. Основной метод расчета электрических нагрузок. По нему определяются максимальные ($P_м$, $Q_м$, $S_м$) расчетные нагрузки группы электроприемников. Для этого в пределах расчетного узла выделяют группу ЭП с переменным (группа А) и группу ЭП с практически постоянным графиком нагрузок (группа Б).

К электроприемникам с практически постоянным графиком нагрузки могут быть отнесены такие, у которых $\kappa_и \geq 0{,}6$, $\kappa_{вкл} = 1$ и коэффициент заполнения суточного графика за наиболее загруженную смену $\kappa_{зап} \geq 0{,}9$. При отсутствии таких данных ЭП относят к электроприемникам с переменным графиком нагрузки.

Максимальные расчетные нагрузки группы приемников с *переменным графиком нагрузки* определяются из выражений:

$$P_м = K_м \cdot P_{см}; \quad Q_м = K'_м \cdot Q_{см}; \quad S_м = \sqrt{P_м^2 + Q_м^2}, \qquad (1.13)$$

где $P_м$, $Q_м$, $S_м$ – максимальные активная, реактивная и полная нагрузки;

$K_м$ – коэффициент максимума активной нагрузки (справочные данные, например [2]); $K'_м$ – коэффициент максимума реактивной нагрузки: $K'_м = 1{,}1$ при $n_{эф} \leq 10$ и $K'_м = 1$ при $n_{эф} > 10$;

$P_{см}$, $Q_{см}$ – средняя активная и реактивная мощности всей группы электроприемников за наиболее загруженную смену:

$$P_{см} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i}; \quad Q_{см} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} \cdot \mathrm{tg}\varphi_i, \tag{1.14}$$

где $\kappa_и$ – коэффициент использования отдельного ЭП (справочные данные [1]);

$p_{ном}$ – номинальная мощность отдельного ЭП, приведенная к длительному режиму (резервные ЭП не учитываются);

tgφ – коэффициент реактивной мощности (справочные данные [1]);

$K_м = f(K_и, n_{эф})$ – определяется по таблице или графикам [1, 2], может быть оценен по соотношению:

$$K_м = 1 + \frac{1{,}5}{\sqrt{n_{эф}}} \sqrt{\frac{1 - K_и}{K_и}}, \tag{1.15}$$

где $n_{эф}$ – эффективное число электроприемников;

$K_и$ – средневзвешенный коэффициент использования группы ЭП:

$$K_и = \frac{P_{см}}{P_{ном}}, \tag{1.16}$$

где $P_{ном}$ – суммарная номинальная мощность ЭП всей группы.

$n_{эф} = f(n, m, K_и, P_{ном})$ может быть определено по соотношению:

$$n_{эф} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}^2} = \frac{P_{ном}^2}{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}^2} \tag{1.17}$$

или одним из упрощенных способов,

где n – фактическое число электроприемников в группе;

m – показатель силовой сборки в группе:

$$m = \frac{p_{см\,\max}}{p_{ном\,\min}}, \tag{1.18}$$

где $p_{ном\,\max}$, $p_{ном\,\min}$ – номинальные приведенные к длительному режиму активные мощности наибольшего и наименьшего ЭП в группе.

Для электроприемников с *практически постоянным графиком нагрузки* максимальная расчетная нагрузка принимается равной средней мощности за наиболее загруженную смену ($P_м = P_{см}$; $Q_м = Q_{см}$).

Основные положения по определению расчетных электрических нагрузок методом упорядоченных диаграмм приведены в таблице 1.3.

Определение эффективного числа электроприемников. Под эффективным числом электроприемников понимается такое число

Таблица 1.3.

Сводка основных положений по определению расчетных электрических нагрузок методом упорядоченных диаграмм

<table>
<tr><td>Фактическое число электроприемников в группе, n</td><td>$m = \frac{P_{ном\ \max}}{P_{ном\ \min}}$</td><td>$n_{эф}$</td><td>$P_м$, кВт</td><td>$Q_м$, кВАр</td></tr>
<tr><td>Три и менее</td><td>не определяется</td><td></td><td>$P_м = \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}$</td><td>$Q_м = \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i} \cdot \mathrm{tg}\varphi_i$</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Более трех</td><td>$m \le 3$
При определении исключаются ЭП, суммарная мощность которых не превышает 5% $\sum_{i=1}^{n} p_{ном}$ группы</td><td>$n_{эф} = n$</td><td>$P_м = K_м \cdot P_{см} = K_м \cdot \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i}$
($K_м$ определяется по таблице)</td><td>При $n_{эф} \le 10$
$Q_м = 1{,}1 \cdot Q_{см}$;
при $n_{эф} > 10$
$Q_м = Q_{см} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} \cdot \mathrm{tg}\varphi_i$</td></tr>
<tr><td>$m > 3$
(точное определение не требуется)</td><td>$n_{эф} < 4$</td><td>$P_м = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{загр\,i} \cdot p_{ном\,i}$
(допускается принимать $\kappa_{загр}$=0,9 для ЭП длительного режима и $\kappa_{загр}$=0,75 для ЭП ПКР)</td><td>$Q_м = 0{,}75 \cdot P_м$
(для ЭП длительного режима cosφ=0,8; tgφ=0,75);
$Q_м = P_м$
(для ЭП ПКР cosφ=0,7; tgφ=1)</td></tr>
<tr><td>$m > 3$</td><td>$n_{эф} \ge 4$</td><td>$P_м = K_м \cdot P_{см}$
($K_м$ определяется по таблице)</td><td>При $n_{эф} \le 10$
$Q_м = 1{,}1 \cdot Q_{см}$;
при $n_{эф} > 10$
$Q_м = Q_{см} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} \cdot \mathrm{tg}\varphi_i$</td></tr>
<tr><td>$m > 3$</td><td>$n_{эф} > 200$</td><td>$P_м = P_{см} = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i}$</td><td>$Q_м = Q_{см}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Если более 75% установленной мощности расчетного узла составляют ЭП с практически постоянным графиком нагрузки ($\kappa_и \ge 0{,}6$, $\kappa_{вкл} \approx 1$, $\kappa_{заполн} > 0{,}9$ – насосы, компрессоры, вентиляторы)</td><td>не определяется</td><td>$P_м = P_{см} = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i}$</td><td>$Q_м = Q_{см} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} \cdot \mathrm{tg}\varphi_i$</td></tr>
<tr><td colspan="2">При наличии в расчетном узле ЭП с переменным и постоянным графиком нагрузки</td><td>Определяется только для ЭП с переменным графиком нагрузки</td><td>$P_м = P_{м1} + P_{м2} = K_м \cdot P_{см1} + P_{см2}$</td><td>$Q_м = Q_{м1} + Q_{см2}$</td></tr>
</table>

однородных по режиму работы приемников одинаковой мощности, которое обуславливает ту же величину расчетной нагрузки, что и группа фактических различных по номинальной мощности и режиму работы приемников.

Пример 1.5. К трем силовым распределительным пунктам присоединены 24 электроприемника длительного режима работы следует номинальных мощностей: 3 по 20 кВт, 6 по 10 кВт, 5 по 7 кВт и 10 по 4,5 кВт. Определить $n_{эф}$.

Решение.

Так как отсутствует дополнительная информация об электроприемниках, для определения $n_{эф}$ воспользуемся соотношением (1.17):

$$n_{эф} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}^2} = \frac{(3\cdot 20 + 6\cdot 10 + 5\cdot 7 + 10\cdot 4{,}5)^2}{3\cdot 20^2 + 6\cdot 10^2 + 5\cdot 7^2 + 10\cdot 4{,}5^2} = \frac{200^2}{2248} = 18.$$

Способы упрощенного вычисления $n_{эф}$.

1. При четырех и более фактических ЭП в группе эффективное число приемников $n_{эф}$ считается равным фактическому n при $m \le 3$ и любом $K_и$.

При определении $n_{эф}$ исключаются те наименьшие ЭП группы, суммарная номинальная мощность которых не превышает 5% суммарной номинальной мощности всей группы $P_{ном}$. При этом число исключенных электроприемников не учитывается также и в величине n.

Пример 1.6. Определить $n_{эф}$ для группы ЭП длительного режима работы следующих номинальных мощностей: 10 по 0,6 кВт, 5 по 4,5 кВт, 6 по 7 кВт, 5 по 10 кВт и 2 по 14 кВт. Групповой коэффициент использования $K_и$ = 0,5.

Решение.

Проверяем возможность принять в расчете $n_{эф} = n$. Определяем значение показателя силовой сборки в группе m.

Десять наименьших электроприемников по 0,6 кВт могут быть исключены, так как их суммарная мощность 6 кВт меньше 5% общей суммарной номинальной мощности приемников всей группы ($P_{ном}$ = 148,5 кВт). Тогда наибольшим по мощности в группе будет приемник 14 кВт, наименьшим – 4,5 кВт. Следовательно:

$$m = \frac{p_{ном\,\max}}{p_{ном\,\min}} = \frac{14}{4{,}5} \approx 3.$$

При m = 3 и $K_и$ = 0,5 значение $n_{эф}$ может быть принято равным n, что без учета исключенных приемников составит:

$$n_{эф} = 28 - 10 = 18.$$

Сравним полученный результат с расчетом по (1.17):

$$n_{эф} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}^2} = \frac{(10 \cdot 0{,}6 + 5 \cdot 4{,}5 + 6 \cdot 7 + 5 \cdot 10 + 2 \cdot 14)^2}{10 \cdot 0{,}6^2 + 5 \cdot 4{,}5^2 + 6 \cdot 7^2 + 5 \cdot 10^2 + 2 \cdot 14^2} = \frac{148{,}5^2}{1290{,}8} = 17\,.$$

Полученные значения $n_{эф}$ достаточно близки.

2. При $m > 3$ и $K_и \geq 0{,}2$ эффективное число электроприемников определяется по соотношению:

$$n_{эф} = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}}{p_{ном\,\max}}. \qquad (1.19)$$

В тех случаях, когда найденное по этой формуле $n_{эф}$ оказывается больше, чем n фактическое, следует принимать $n_{эф} = n$.

Пример 1.7.

Определить $n_{эф}$ для группы приемников длительного режима работы следующих номинальных мощностей: 4 по 20 кВт, 5 по 14 кВт, 6 по 10 кВт, 5 по 7 кВт, 4 по 4,5 кВт, 5 по 2,8 кВт и 20 по 1 кВт. Групповой коэффициент использования $K_и = 0{,}4$.

Решение.

Определим величины n и m:

$$n = 4 + 5 + 6 + 5 + 4 + 5 + 20 = 49\,;$$

$$m = \frac{p_{ном\,\max}}{p_{ном\,\min}} = \frac{20}{1} = 20\,.$$

Следовательно, эффективное число ЭП не может быть принято равным фактическому числу приемников, так как $m > 3$.

При $m > 3$ и $K_и = 0{,}4$ по формуле (1.19) имеем:

$$n_{эф} = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}}{p_{ном\,\max}} = \frac{2 \cdot 297}{20} = 30\,.$$

По соотношению (1.17) $n_{эф}$ составит:

$$n_{эф} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}^2} = \frac{(4 \cdot 20 + 5 \cdot 14 + 6 \cdot 10 + 5 \cdot 7 + 4 \cdot 4{,}5 + 5 \cdot 2{,}8 + 20 \cdot 1)^2}{4 \cdot 20^2 + 5 \cdot 14^2 + 6 \cdot 10^2 + 5 \cdot 7^2 + 4 \cdot 4{,}5^2 + 5 \cdot 2{,}8^2 + 20 \cdot 1^2} = \frac{297^2}{3485} = 25\,.$$

Погрешность в определении величины $K_м$ в связи с упрощенным вычислением $n_{эф}$ составляет около 1%.

3. При $m > 3$ и $K_и < 0{,}2$ эффективное число электроприемников определяется с помощью кривых или таблиц [1, 2]. Порядок определения $n_{эф}$ следующий:

- определяется наибольший по номинальной мощности электроприемник рассматриваемой группы;
- определяются наиболее крупные электроприемники, номинальная мощность которых равна или больше половины мощности наибольшего электроприемника группы;
- определяются число n_1 и суммарная номинальная мощность $P_{ном\,1}$ наибольших электроприемников группы;
- определяются число n и суммарная номинальная мощность $P_{ном}$ всех приемников группы;
- находятся значения $n_* = n_1 / n$ и $P_* = P_{ном\,1} / P_{ном}$;
- по кривым или по таблице [1, 2] по найденным значениям n_* и P_* определяется величина $n_{эф*}$, а затем из выражения $n_{эф*} = n_{эф} / n$ находится $n_{эф} = n_{эф*} \cdot n$.

Пример 1.8.

Определить $n_{эф}$ для группы электроприемников длительного режима работы следующих номинальных мощностей: 4 по 10 кВт, 5 по 7 кВт, 4 по 4,5 кВт, 5 по 2,8 кВт и 20 по 1 кВт. Групповой коэффициент использования $K_и = 0{,}1$.

Решение.

Рассмотрим возможность применения каждого из способов упрощенного вычисления $n_{эф}$ для данного примера.

Значение показателя силовой сборки в группе равно:

$$m = \frac{p_{ном\,\max}}{p_{ном\,\min}} = \frac{10}{1} = 10 .$$

При $m = 10$ эффективное число ЭП не может быть принято равным n согласно первому способу. Соотношение (1.19) не применимо, так как $K_и < 0{,}2$. Следовательно, $n_{эф}$ должно быть определено по третьему способу.

Общее количество электроприемников в группе составляет $n = 38$, а их суммарная мощность:

$$P_{ном} = \sum_{i=1}^{38} p_{ном\,i} = 4 \cdot 10 + 5 \cdot 7 + 4 \cdot 4{,}5 + 5 \cdot 2{,}8 + 20 \cdot 1 = 127 \text{ кВт}.$$

Наибольшие ЭП в группе: 4 по 10 кВт и 5 по 7 кВт, то есть $n_1 = 4 + 5 = 9$.

Суммарная мощность наибольших электроприемников:

$$P_{ном\,1} = 4 \cdot 10 + 5 \cdot 7 = 75 \text{ кВт}.$$

Тогда

$$n_* = \frac{n_1}{n} = \frac{9}{38} = 0{,}23; \; P_* = \frac{P_{ном\,1}}{P_{ном}} = \frac{75}{127} = 0{,}59 .$$

По таблице [1, 2] для $n_* = 0{,}23$ и $P_* = 0{,}59$ находим $n_{эф\,*} = 0{,}56$.

Следовательно,

$$n_{эф} = n_{эф*} \cdot n = 0{,}56 \cdot 38 = 21 .$$

По соотношению (1.17) эффективное число электроприемников составит:

$$n_{эф} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}^2} = \frac{\left(4 \cdot 10 + 5 \cdot 7 + 4 \cdot 4{,}5 + 5 \cdot 2{,}8 + 20 \cdot 1\right)^2}{4 \cdot 10^2 + 5 \cdot 7^2 + 4 \cdot 4{,}5^2 + 5 \cdot 2{,}8^2 + 20 \cdot 1^2} = \frac{127^2}{785} = 21 ,$$

то есть оба способа дают один и тот же результат.

Примеры применения метода упорядоченных диаграмм для расчета электрических нагрузок объектов.

Пример 1.9.

По рассчитанным в примере 1.3 параметрам электропотребления и приведенным исходным данным уточнить расчетную нагрузку трехфазной линии, питающей электроприемники. Оценить погрешность расчета нагрузки при определении $K_м$ по таблице и соотношению (1.15).

Решение.

Расчетная нагрузка линии находится по коэффициенту максимума $K_м$ и среднесменной нагрузке, которая составляет 54 кВт (см. решение примера 1.3). Для определения $K_м$ находится:

- коэффициент использования группы электроприемников:

$$K_и = \frac{P_{см}}{P_{ном}} = \frac{54}{370} = 0{,}15 ;$$

- показатель силовой сборки в группе:

$$m = \frac{p_{ном\,\max}}{p_{ном\,\min}} = \frac{3}{1{,}1} < 3$$

- эффективное число электроприемников:

так как $m < 3$, то $n_{эф} = n = 154$ (см. исходные данные к примеру 1.3). При $K_и = 0{,}15$ и $n_{эф} = 154$ коэффициент максимума по таблице [1, 2] равен $K_{м\,1} = 1{,}15$, а расчетная нагрузка составляет:

$$P_{расч\,1} = K_{м\,1} \cdot P_{см} = 1{,}15 \cdot 54 = 62 \text{ кВт}.$$

По соотношению (1.15) коэффициент максимума равен:

$$K_{м\,2} = 1 + \frac{1{,}5}{\sqrt{n_{эф}}} \sqrt{\frac{1 - K_и}{K_и}} = 1 + \frac{1{,}5}{\sqrt{154}} \sqrt{\frac{1 - 0{,}15}{0{,}15}} = 1{,}29 ;$$

а расчетная нагрузка:

$$P_{расч\,2} = K_{м\,2} \cdot P_{см} = 1{,}29 \cdot 54 = 70 \text{ кВт}.$$

Ошибка в определении расчетной нагрузки не превышает:

$$\delta = \frac{P_{расч\,2} - P_{расч\,1}}{P_{расч\,1}} \cdot 100\% = \frac{70 - 62}{62} \cdot 100\% = 13\% .$$

Пример 1.10.

Определить электрическую расчетную нагрузку троллея, от которого питаются два заливочных крана, имеющих следующие механизмы:

а) главный подъем, ПВ = 25% с двумя двигателями по 100 кВт (могут работать только одновременно);

б) вспомогательный подъем, главная и вспомогательная тележки, ПВ = 25% с тремя двигателями: 2 по 15 кВт и один 60 кВт;

в) передвижение моста, ПВ = 25% с двумя двигателями по 80 кВт.

Коэффициент использования для механизмов заливочного крана равен 0,2, а cosφ = 0,6. Напряжение сети 380 В.

Решение.

Всего на одном кране 5 электроприемников (7 электродвигателей), из которых один с двумя электродвигателями, общая паспортная (установленная) мощность – 450 кВт (на двух кранах – 900 кВт).

Все электроприемники приводятся к ПВ = 100%:

а) главный подъем:

$$P_{ном\,1} = \sum_{i=1}^{2} p_{ном\,i} \cdot \sqrt{\text{ПВ}_i} = 2 \cdot 100 \cdot \sqrt{0{,}25} = 2 \cdot 50 = 100 \text{ кВт};$$

б) вспомогательный подъем и тележки:

$$P_{ном\,2} = \sum_{i=1}^{3} p_{ном\,i} \cdot \sqrt{\text{ПВ}_i} = 2 \cdot 15 \cdot \sqrt{0{,}25} + 60 \cdot \sqrt{0{,}25} = 2 \cdot 7{,}5 + 30 = 45 \text{ кВт};$$

в) передвижение моста:

$$P_{ном\,3} = \sum_{i=1}^{2} p_{ном\,i} \cdot \sqrt{\text{ПВ}_i} = 2 \cdot 80 \cdot \sqrt{0{,}25} = 2 \cdot 40 = 80 \text{ кВт}.$$

Суммарная номинальная (установленная) мощность электроприемников одного крана, приведенная к ПВ = 100%:

$$P_{ном} = P_{ном\,1} + P_{ном\,2} + P_{ном\,3} = 100 + 45 + 80 = 225 \text{ кВт},$$

а двух кранов – 450 кВт.

Определяется показатель силовой сборки в группе:

$$m = \frac{p_{ном\,\max}}{p_{ном\,\min}} = \frac{2 \cdot 50}{7{,}5} > 3 .$$

Здесь $p_{ном\,\max}$ – мощность двух электродвигателей главного подъема, которые работают одновременно. Оба эти электродвигателя принимаются как один электроприемник (2·50 = 100 кВт);

$p_{ном\,\min}$ – мощность двигателя тележки (7,5 кВт).

Так как $m > 3$, а $K_и = 0{,}2$, то $n_{эф}$ определяется по соотношению (1.19):

$$n_{эф} = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}}{p_{ном\,\max}} = \frac{2 \cdot 450}{100} = 9 .$$

По справочным данным [1, 2] при $n_{эф} = 9$ и $K_и = 0{,}2$ коэффициент максимума равен 1,9.

Средняя нагрузка за наиболее загруженную смену составит:

$$P_{см} = K_и \cdot P_{ном} = 0{,}2 \cdot 450 = 90 \text{ кВт};$$

$$Q_{см} = P_{см} \cdot \text{tg}\varphi = 90 \cdot 1{,}33 = 120 \text{ кВАр};$$

а максимальная расчетная:

$$P_м = K_м \cdot P_{см} = 1{,}9 \cdot 90 = 171 \text{ кВт};$$

$$Q_м = 1{,}1 \cdot Q_{см} = 1{,}1 \cdot 120 = 132 \text{ кВАр};$$

$$S_м = \sqrt{P_м^2 + Q_м^2} = \sqrt{171^2 + 132^2} = 216 \text{ кВА};$$

$$I_м = \frac{S_м}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{216}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38} = 328 \text{ А}.$$

Пример 1.11.

Определить максимальную расчетную нагрузку линии, от которой запитаны следующие электроприемники длительного режима работы:

а) 2 по 80 кВт, 2 по 50 кВт, cosφ = 0,8, $\kappa_и$ = 0,4;

б) один ЭП мощностью 40 кВт, 6 по 15 кВт, cosφ = 0,8, $\kappa_и$ = 0,55;

в)14 двигателей разной мощности от 7 до 15 кВт общей мощности 170 кВт, $\kappa_и$ = 0,2, cosφ = 0,65.

Решение.

Общая номинальная (установленная) мощность:

$$P_{ном} = \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 50 + 1 \cdot 40 + 6 \cdot 15 + 170 = 560 \text{ кВт}.$$

Средние активная и реактивная нагрузки за смену:

$$P_{см} = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} = 0{,}4 \cdot 2 \cdot 80 + 0{,}4 \cdot 2 \cdot 50 + 0{,}55 \cdot 1 \cdot 40 + 0{,}55 \cdot 6 \cdot 15 + 0{,}2 \cdot 170 = 216 \text{ кВт};$$

$$Q_{см} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} \cdot \text{tg}\varphi_i = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} \cdot \text{tg}\varphi_i = 0{,}4 \cdot 2 \cdot 80 \cdot 0{,}75 + 0{,}4 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 0{,}75 + \ldots = 177 \text{ кВАр}.$$

Эффективное число электроприемников определяется по соотношению (1.19) так как:

- показатель силовой сборки в группе равен:

$$m = \frac{p_{ном\,\max}}{p_{ном\,\min}} = \frac{80}{7} > 3;$$

- средневзвешенный коэффициент использования составляет:

$$K_и = \frac{P_{см}}{P_{ном}} = \frac{216}{560} = 0{,}39 > 0{,}2.$$

Эффективное число электроприемников:

$$n_{эф} = \frac{2\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}}{p_{ном\,\max}} = \frac{2 \cdot 560}{80} = 14.$$

По найденным величинам $n_{эф}$ = 14 и $K_и$ = 0,39, используя, например [1], по таблице находится коэффициент максимума $K_м$ = 1,31. Тогда максимальные активная, реактивная и полная мощности соответственно будут:

$$P_м = K_м \cdot P_{см} = 1{,}31 \cdot 216 = 283 \text{ кВт};$$

$$Q_м = 1{,}0 \cdot Q_{см} = 1{,}0 \cdot 177 = 177 \text{ кВАр};$$

$$S_м = \sqrt{P_м^2 + Q_м^2} = \sqrt{283^2 + 177^2} = 336 \text{ кВА}.$$

По величине полной мощности предварительно может быть выбран трансформатор для питания рассматриваемой группы электроприемников.

Пример 1.12.

Для примера 1.11 определить максимальную расчетную нагрузку и расчетный ток линии, заменив коэффициент использования электроприемников позиции б) на значение $\kappa_и = 0{,}85$. Напряжение сети 380 В.

Решение.

К рассматриваемой линии подключены как электроприемники с переменным графиком нагрузки (позиции а) и в)), так и электроприемники с практически постоянным графиком нагрузки (позиция б)). Для каждой из групп расчет выполняется отдельно.

Электроприемники с переменным графиком нагрузки $\kappa_и < 0{,}6$.

Общая номинальная (установленная) мощность:

$$P_{ном\,1} = \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i} = 2 \cdot 80 + 2 \cdot 50 + 170 = 430 \text{ кВт}.$$

Средние активная и реактивная мощности нагрузки за смену:

$$P_{см\,1} = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} = 0{,}4 \cdot 2 \cdot 80 + 0{,}4 \cdot 2 \cdot 50 + 0{,}2 \cdot 170 = 138 \text{ кВт};$$

$$Q_{см\,1} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} \cdot \operatorname{tg}\varphi_i = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} \cdot \operatorname{tg}\varphi_i =$$

$$= 0{,}4 \cdot 2 \cdot 80 \cdot 0{,}75 + 0{,}4 \cdot 2 \cdot 50 \cdot 0{,}75 + 0{,}2 \cdot 170 \cdot 1{,}2 = 118{,}8 \text{ кВАр}.$$

Показатель силовой сборки в группе:

$$m = \frac{p_{ном\,\max}}{p_{ном\,\min}} = \frac{80}{7} > 3 .$$

Средневзвешенный коэффициент использования по группе электроприемников:

$$K_и = \frac{P_{см\,1}}{P_{ном\,1}} = \frac{138}{430} = 0{,}32 > 0{,}2 .$$

Эффективное число электроприемников (определяется по (1.19)):

$$n_{эф} = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}}{p_{ном\,\max}} = \frac{2 \cdot 430}{80} = 11 .$$

По найденным величинам $K_и = 0{,}32$ и $n_{эф} = 11$ находится коэффициент максимума $K_м = 1{,}48$. Тогда максимальные активная и реактивная мощности соответственно будут:

$$P_{м1} = K_м \cdot P_{см1} = 1{,}48 \cdot 138 = 204{,}2 \text{ кВт};$$

$$Q_{м1} = 1{,}0 \cdot Q_{см1} = 1{,}0 \cdot 118{,}8 = 118{,}8 \text{ кВАр}.$$

Электроприемники с практически постоянным графиком нагрузки $к_и \geq 0,6$.

Общая номинальная (установленная) мощность:

$$P_{ном\,2} = \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i} = 1 \cdot 40 + 6 \cdot 15 = 130 \text{ кВт}.$$

Средние активная и реактивная мощности нагрузки за смену:

$$P_{см\,2} = \sum_{i=1}^{n} к_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} = 0,85 \cdot 130 = 110,5 \text{ кВт};$$

$$Q_{см\,2} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} \cdot \text{tg}\varphi_i = \sum_{i=1}^{n} к_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} \cdot \text{tg}\varphi_i = 0,75 \cdot 110,5 = 82,9 \text{ кВАр}.$$

Максимальные активная и реактивная мощности:

$$P_{м\,2} = P_{см\,2} = 110,5 \text{ кВт};$$

$$Q_{м\,2} = Q_{см\,2} = 82,9 \text{ кВАр}.$$

Максимальные активная, реактивная и полная мощности рассматриваемой линии соответственно будут:

$$P_м = P_{м\,1} + P_{м\,2} = 204,2 + 110,5 = 314,7 \text{ кВт};$$

$$Q_м = Q_{м\,1} + Q_{м\,2} = 118,8 + 82,9 = 201,7 \text{ кВАр};$$

$$S_м = \sqrt{P_м^2 + Q_м^2} = \sqrt{314,7^2 + 201,7^2} = 373,8 \text{ кВА};$$

а расчетный ток составит:

$$I_м = \frac{S_м}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{373,8}{\sqrt{3} \cdot 0,38} = 568 \text{ А}.$$

Пример 1.13.

Определить максимальные нагрузки и ток насосной станции металлургического завода, на которой установлены: пять рабочих насосов водоснабжения с асинхронными двигателями по 250 кВт, десять станков различных типов с электродвигателями 2,5-7 кВт общей мощностью $P_{ном\,ст.}$ =47 кВт. Максимальная осветительная нагрузка станции составляет 25 кВт. Напряжение сети 380 В.

Решение.

По справочнику [1, 2] для насосов $к_и = 0,7$ и $\cos\varphi = 0,8$, а для станков – $к_и = 0,17$ и $\cos\varphi = 0,6$.

Насосы могут быть отнесены к электроприемникам с практически постоянным графиком нагрузки. Их суммарная номинальная (установленная) мощность равна:

$$P_{ном\,1} = \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i} = 5 \cdot 250 = 1250 \text{ кВт},$$

а номинальная мощность всей насосной станции:

$$P_{ном} = P_{ном\,1} + P_{ном\,ст.} = 1250 + 47 = 1297 \text{ кВт}.$$

Нагрузка станков, которые относятся к электроприемникам с переменным графиком нагрузки, составляет менее 25% общей нагрузки. Поэтому $P_м = P_{см}$, а $Q_м = Q_{см}$ (см. табл. 1.3):

$$P_м = P_{см} = \sum_{i=1}^{n} к_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} = 0,7 \cdot 5 \cdot 250 + 0,17 \cdot 47 = 883 \text{ кВт};$$

$$Q_м = Q_{см} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} \cdot \mathrm{tg}\varphi_i = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} \cdot \mathrm{tg}\varphi_i = 0{,}7 \cdot 5 \cdot 250 \cdot 0{,}75 + 0{,}17 \cdot 47 \cdot 1{,}33 = 666\,\text{кВАр}.$$

С учетом освещения максимальные активная и реактивная нагрузки насосной станции составят:

$$P_м = 883 + 25 = 908\ \text{кВт};$$

$$Q_м = 666\ \text{кВАр};$$

а максимальная полная мощность и ток будут:

$$S_м = \sqrt{P_м^2 + Q_м^2} = \sqrt{908^2 + 666^2} = 1130\,\text{кВА};$$

$$I_м = \frac{S_м}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{1130}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38} = 1717\,\text{А}.$$

Пример 1.14.

Определить активную электрическую нагрузку группы из трех электроприемников длительного режима работы со следующими данными:

а) электродвигатель фрезерного станка 15 кВт, $\kappa_и = 0{,}2$;

б) электродвигатель вентилятора 10 кВт, $\kappa_и = 0{,}7$;

в) электродвигатель токарного станка 7,5 кВт, $\kappa_и = 0{,}17$.

Решение.

Общая номинальная (установленная) мощность:

$$P_{ном} = \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i} = 15 + 10 + 7{,}5 = 32{,}5\,\text{кВт}.$$

Средняя активная мощность за наиболее загруженную смену:

$$P_{см} = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} = 0{,}2 \cdot 15 + 0{,}7 \cdot 10 + 0{,}17 \cdot 7{,}5 = 11\,\text{кВт}.$$

Для трех и менее электроприемников в группе максимальная расчетная активная нагрузка равна $P_м = \sum_{i=1}^{n \le 3} p_{ном\,i}$ (см. табл. 1.3), то есть для рассматриваемой группы электроприемников:

$$P_м = P_{ном} = \sum_{i=1}^{3} p_{ном\,i} = 15 + 10 + 7{,}5 = 32{,}5\,\text{кВт}.$$

Пример 1.15.

К магистрали подключены один электродвигатель 160 кВт ($\kappa_и = 0{,}5$ и $\cos\varphi = 0{,}75$) и десять электродвигателей по 3 кВт ($\kappa_и = 0{,}3$ и $\cos\varphi = 0{,}6$). Все электродвигатели длительного режима работа с переменным графиком нагрузки. Графика работы электродвигателя 160 кВт не имеется. Определить средние и максимальные нагрузки.

Решение.

Общая номинальная (установленная) мощность:

$$P_{ном} = \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i} = 160 + 10 \cdot 3 = 190\,\text{кВт}.$$

Средние активная и реактивная мощности за наиболее загруженную смену:

$$P_{см} = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} = 0{,}5 \cdot 160 + 0{,}3 \cdot 10 \cdot 3 = 89 \text{ кВт};$$

$$Q_{см} = \sum_{i=1}^{n} p_{см\,i} \cdot \text{tg}\varphi_i = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{и\,i} \cdot p_{ном\,i} \cdot \text{tg}\varphi_i = 0{,}5 \cdot 160 \cdot 0{,}87 + 0{,}3 \cdot 10 \cdot 3 \cdot 1{,}33 = 69{,}6 + 12 = 81{,}6 \text{ кВАр}.$$

Эффективное число электроприемников определяется по соотношению (1.19), так как:

- показатель силовой сборки в группе равен:

$$m = \frac{p_{ном\,\max}}{p_{ном\,\min}} = \frac{80}{7} > 3$$

- средневзвешенный коэффициент использования составляет:

$$K_{и} = \frac{P_{см}}{P_{ном}} = \frac{89}{190} = 0{,}47 > 0{,}2 .$$

Эффективное число электроприемников:

$$n_{эф} = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i}}{p_{ном\,\max}} = \frac{2 \cdot 190}{160} = 2{,}4 .$$

Так как $n_{эф} < 4$, а число электроприемников в группе больше трех, то максимальная нагрузка находится в соответствии с рекомендациями таблицы 1.3:

$$P_{м} = \sum_{i=1}^{n} \kappa_{загр\,i} \cdot p_{ном\,i} = 0{,}9 \cdot (160 + 10 \cdot 3) = 171 \text{ кВт};$$

$$Q_{м} = 0{,}75 \cdot P_{м} = 0{,}75 \cdot 171 = 128 \text{ кВАр};$$

$$S_{м} = \sqrt{P_{м}^2 + Q_{м}^2} = \sqrt{171^2 + 128^2} = 214 \text{ кВА}$$

или по следующей методике: максимальная расчетная активная нагрузка принимается, как для группы приемников с $n_{эф} = 4$, но не менее суммы номинальных мощностей трех наиболее мощных электроприемников. Сравним эти способы расчета.

При $K_{и} = 0{,}47$ и $n_{эф} = 4$ коэффициент максимума равен 1,72, а активная расчетная нагрузка:

$$P_{м} = K_{м} \cdot P_{см} = 1{,}72 \cdot 89 = 153 \text{ кВт}.$$

Эта величина $P_{м}$ не должна быть меньше суммы мощностей трех наибольших электроприемников в группе:

$$P_{м} = 160 + 2 \cdot 3 = 166 \text{ кВт}.$$

В основу дальнейшего расчета принимается $P_{м}$ = 166 кВт,

$$Q_{м} = P_{м} \cdot \text{tg}\varphi = 166 \cdot 0{,}75 = 124 \text{ кВАр},$$

где tgφ соответствует номинальному значению cosφ, принятому в соответствии с таблицей 1.3 равным 0,8.

Полная максимальная нагрузка составит:

$$S_{м} = \sqrt{P_{м}^2 + Q_{м}^2} = \sqrt{166^2 + 124^2} = 206 \text{ кВА}.$$

Оба способа расчета дают близкие результаты.

При наличии в группе крупных электродвигателей (более 100 кВт) к оценке загрузки этих двигателей рекомендуется подходить индивидуально с учетом графика и режима их работы. При отсутствии графика допускается пользоваться таблицей 1.3 или представленной в примере 1.15 методикой.

Метод коэффициента спроса находит применение для предварительных расчетов общезаводских нагрузок, нагрузок узлов с высокими значениями числа электроприемников и/или их коэффициента использования. Расчет выполняется по соотношениям:

$$P_{расч} = K_c \cdot P_{ном};\ Q_{расч} = P_{расч} \cdot \mathrm{tg}\varphi;\ S_{расч} = \sqrt{P_{расч}^2 + Q_{расч}^2} = P_{расч} \Big/ \cos\varphi. \quad (1.20)$$

Величина K_c принимается постоянной вне зависимости от числа и мощности отдельных электроприемников (справочные данные). Коэффициент спроса может быть определен по коэффициенту использования $K_и$ для данной группы электроприемников при среднем значении коэффициента включения 0,8:

$K_и$	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
K_c	0,50	0,60	0,65–0,70	0,75–0,80	0,85–0,90	0,92–0,95

Расчетная нагрузка узла системы электроснабжения (цеха, корпуса, предприятия) определяется суммированием расчетных нагрузок отдельных групп ЭП, входящих в данный узел, с учетом коэффициента разновременности максимумов нагрузки $K_{р.м}$:

$$S_{расч} = K_{р.м} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} P_{расч\,i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} Q_{расч\,i}\right)^2}, \quad (1.21)$$

где $K_{р.м}$ – коэффициент разновременности максимумов нагрузок отдельных групп электроприемнкиов, принимаемый по таблице 1.2;

$\left(\sum_{i=1}^{n} P_{расч\,i}\right), \left(\sum_{i=1}^{n} Q_{расч\,i}\right)$ – сумма расчетных активных и реактивных нагрузок отдельных групп приемников, определенных по соотношению (1.20).

Пример 1.16.

Методом коэффициента спроса определить нагрузку на линию ввода печи сопротивления СШВ–3.100/9. Исходные данные об электроприемниках потребителя приведены в таблице 1.4. Напряжение сети 380 В.

Решение.

По справочной литературе (например [1]) определяются коэффициенты спроса и мощности, а по соотношениям (1.20) и (1.21) рассчитывается нагрузка линии (табл. 1.4). Коэффициент разновременности максимумов нагрузок принимается равным 1,0, так как электроприемники принадлежат одному потребителю.

Таблица 1.4.

Определение расчетных нагрузок линии ввода печи (к примеру 1.16)

Исходные данные			Суммарная установленная мощность, кВт	K_c	cosφ	Расчетные нагрузи			
наименование электроприемников	кол-во работающих ЭП	номинальная мощность одного ЭП, кВт				P_p, кВт	Q_p, кВАр	S_p, кВА	I_p, А
Электропечь	1	180	180	0,85	1	153	0		
Нагреватели насосов	3	27	81	0,90	1	73	0		
Приводы насосов	6	10	60	0,75	0,8	45	33,75		
Приводы затворов	14	0,1	1,4	0,30	0,5	0,42	0,73		
Тележки и механизмы передвижения садки	2	2,8	5,6	0,20	0,6	1,12	1,49		
Суммарный показатель ($K_{р.м}$ =1)	26	—	328	0,83	0,99	272,5	36	275	418

Расчетная осветительная нагрузка также определяется по методу коэффициента спроса:

$$P_{расч.осв} = K_{с\,осв} \cdot P_{ном\,осв} \cdot K_{п.р.а}, \qquad (1.22)$$

где $K_{с\,осв}$ – коэффициент спроса осветительной нагрузки;

$P_{ном\ \ осв}$ – установленная мощность электроламп, определяется по удельной плотности нагрузки на $1\ м^2$ площади производственных зданий;

$K_{п.р.а}$ – коэффициент, учитывающий потери мощности в пускорегулирующей аппаратуре светильников, для ламп накаливания равен 1,0.

Пример 1.17.

Определить расчетную нагрузку вагоноремонтного завода, установленная мощность и площадь цехов которого приведены в таблице 1.5 (серый фон). Для освещения цехов и территории завода использованы лампы накаливания.

Решение.

По справочной литературе определяются коэффициенты спроса и мощности, удельная плотность осветительной нагрузки в зависимости от характера зрительных работ. Низковольтная и высоковольтная силовая нагрузки рассчитываются по соотношениям (1.20) и (1.21), а осветительная – по соотношению (1.22). Результаты представлены в таблице с учетом коэффициента разновременности максимумов нагрузки цехов (принимается равным 0,9). Расчетная нагрузка всего завода по 0,38 кВ составит:

Таблица 1.5

Расчетная нагрузка вагоноремонтного завода (к примеру 1.17)

№ п/п	Наименование потребителя (цеха)	Силовая нагрузка					Осветительная нагрузка					Силовая и осветительная нагрузка		
		$P_н$, кВт	K_c	$\frac{\cos\varphi}{\mathrm{tg}\varphi}$	$P_{расч}$, кВт	$Q_{расч}$, кВАр	$F_ц$, м^2	$P_{уд.о}$, кВт	$P_{н.о}$, кВт	$K_{с.о}$	$P_{р.о}$, кВт	$P_р+P_{р.о}$, кВт	$Q_р$, кВАр	$S_р$, кВА
Потребители электроэнергии 0,38 кВ														
1	Пилорама	60	0,5	0,7/1,02	30	30,6	3754	16	60,1	0,95	57,1	87,1	30,6	92,3
2	Литейный	1200	0,6	0,75/0,882	720	635,0	5330	14	74,6	0,95	70,9	790,9	635,0	1014,3
3	Кузнечный	700	0,6	0,75/0,882	420	370,4	4203	15	63,0	0,85	53,6	473,6	370,4	601,2
4	Склад	40	0,3	0,6/1,333	12	16	2719	13	35,3	0,6	21,2	33,2	16	36,9
5	Подъемный	100	0,5	0,7/1,02	50	51	4668	15	70,0	0,95	66,5	116,5	51	127,2
6	Колёсный	1500	0,5	0,7/1,02	750	765	6198	15	92,9	0,95	88,3	838,3	765	1134,9
7	Инструментальный	520	0,5	0,7/1,02	260	265,2	1554	15	23,3	0,85	19,8	279,8	265,2	385,5
8	Покрасочный	40	0,5	0,7/1,02	20	20,4	2774	15	41,6	0,95	39,5	59,5	20,4	62,9
9	Деревообрабатывающий	600,5	0,39	0,82/0,698	231,7	161,8	2100	16	33,6	0,85	28,6	260,3	161,8	306,5
10	Котельная	50	0,6	0,75/0,882	30	26,5	1589	16	25,4	0,85	21,6	51,6	26,5	58,0
11	Компрессорный (6 кВ)	—	—	—	—	—	2335	14	32,7	0,85	27,8	27,8	0	27,8
12	Сварочный	48	0,5	0,4/2,291	19,2	44	2808	15	42,0	0,95	39,9	59,1	44	73,7
13	Механический	640	0,5	0,7/1,02	320	326,4	1888	15	28,3	0,85	24,1	344,1	326,4	474,3
14	Заготовительный	175	0,5	0,7/1,02	87,5	89,25	1787	14	25,0	0,85	21,3	108,8	89,25	140,7
	Территория завода	—	—	—	—	—	146381	0,22	32,2	1	32,2	32,2	0	32,2
	Итого по 0,38 кВ	**5673,5**			**2950,4**	**2801,6**			**680**		**612,4**	**3562,8**	**2801,6**	**4532,4**
Потребители электроэнергии 6 кВ														
11	Компрессор 6 кВ	450	0,5	0,7/1,02	225	229,5	—	—	—	—	—	225	229,5	—
	Итого по 6 кВ	**450**	—	—	**225**	**229,5**	—	—	—	—	—	**225**	**229,5**	**321,4**

$$S_{расч} = K_{р.м}\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} P_{расч\,i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} Q_{расч\,i}\right)^2} = 0{,}9\sqrt{(3562{,}8)^2 + (2801{,}6)^2} = 4080\ \text{кВА}.$$

Для определения расчетных активной, реактивной и полной мощности завода, отнесенных к шинам 6 кВ главной понизительной подстанции необходимо учесть потери в цеховых трансформаторах и распределительных линиях.

Метод коэффициента формы рекомендуется для групп электроприемников с резкопеременной нагрузкой, колеблющейся с большой частотой. Расчетная нагрузка таких приемников близка к среднеквадратичной. Кроме этого, может применяться для определения нагрузок на шинах низшего напряжения цеховых трансформаторных подстанций при равномерных графиках нагрузок. Расчет выполняется по соотношениям:

$$P_{расч} = K_{ф} \cdot P_{см};\ Q_{расч} = K'_{ф} \cdot Q_{см} = P_{расч} \cdot \text{tg}\varphi;\ S_{расч} = \sqrt{P^2_{расч} + Q^2_{расч}}\ , \quad (1.23)$$

где $K_{ф}$, $K'_{ф}$ – коэффициент формы соответственно графика активной и реактивной нагрузки, характеризует неравномерность графика во времени, определяется по выражениям таблице 1.2, в случае затруднения расчета – $K_{ф}$ = 1,0÷1,3.

Пример 1.18. По рассчитанным в примере 1.3 параметрам электропотребления и коэффициенту формы графика активной нагрузки уточнить получасовой максимум трехфазной линии, питающей электроприемники. Сравнить с расчетом по коэффициенту максимума, оценить погрешность.

Решение.

Расчетная активная нагрузка линии (получасовой максимум) находится по коэффициенту формы графика нагрузки $K_{ф}$ = 1,08 и среднесменной нагрузке, которая составляет 54 кВт (см. решение примера 1.3):

$$P_{расч} = K_{ф} \cdot P_{см} = 1{,}08 \cdot 54 = 58{,}3\ \text{кВт}.$$

Расчет по коэффициенту максимума и среднесменной нагрузке (метод упорядоченных диаграмм) выполнен в примере 1.9: $P_{расч}$ = 62 кВт.

Оба метода дают близкие результаты, погрешность составляет:

$$\delta = \frac{K_{м} \cdot P_{см} - K_{ф} \cdot P_{см}}{K_{м} \cdot P_{см}} \cdot 100\% = \frac{62 - 58{,}3}{62} \cdot 100\% = 6\%.$$

Определение расчетной нагрузки **по удельной нагрузке** на единицу производственной площади применяется для производств с большой динамичностью технологического процесса и относительно равномерно распределенной по производственной площади нагрузкой. Расчет выполняется по соотношению:

$$P_{расч} = p_0 \cdot F\ , \quad (1.24)$$

где p_0 – удельная расчетная нагрузка на 1 м^2 производственной площади;

F – производственная площадь, м^2.

Пример 1.19.

Определить полную расчетную нагрузку механического цеха машиностроительного завода. Удельная расчетная нагрузка цеха 0,3 кВА/м^2, площадь цеха – 13000 м^2.

Решение.

По соотношению (1.24) расчетная нагрузка составит:

$$S_{расч} = p_0 \cdot F = 0{,}3 \cdot 13000 = 3900 \text{ кВА}.$$

Метод удельного расхода электроэнергии на единицу продукции при заданном объеме выпуска продукции за определенный период времени наиболее эффективен для производств с непрерывным технологическим процессом, может быть использован для предварительных и поверочных расчетов, при технико-экономическом обосновании намеченных вариантов систем электроснабжения. Расчет выполняется по соотношению:

$$P_{расч} = \frac{M_{см} \cdot W_{а\,уд}}{T_{см}}, \qquad (1.25)$$

где $M_{см}$ – выпуск за смену единиц продукции;

$W_{а\,уд}$ – расход электроэнергии на единицу продукции, $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{ед}$;

$T_{см}$ – продолжительность смены.

Если удельный расход $W_{а\,уд}$ известен в годовом объеме M, то

$$P_{расч} = \frac{M \cdot W_{а\,уд}}{T_{м}}, \qquad (1.26)$$

где $T_м$ – число часов использования максимума нагрузки.

Пример 1.20.

Определить расчетную нагрузку алюминиевого завода производительностью 100 000 т алюминия в год. Удельный расход электроэнергии на переменном напряжении на производство алюминия составляет 18000 кВт·ч/т, расход на остальные нужды завода – 5% от годового расхода на электролиз. Число часов использования максимума нагрузки составляет 8300 ч.

Решение.

Годовой расход электроэнергии на электролиз:

$$W_a' = W_{а\,уд} \cdot M = 18000 \cdot 100000 = 1800 \cdot 10^6 \text{ кВт·ч}.$$

Расход на иные нужды завода:

$$W_a'' = 0{,}05 \cdot W_a' = 0{,}05 \cdot 1800 \cdot 10^6 = 90 \cdot 10^6 \text{ кВт·ч}.$$

Общий расход электроэнергии:

$$W_a = W_a' + W_a'' = 1800 \cdot 10^6 + 90 \cdot 10^6 = 1890 \cdot 10^6 \text{ кВт·ч}.$$

Расчетная нагрузка завода:

$$P_{расч} = \frac{W_a}{T_м} = \frac{1890 \cdot 10^6}{8300} = 227711 \text{ кВт} \approx 230 \text{ МВт}.$$

Мощность ГПП будет зависеть от напряжения питания и принятой схемы электроснабжения в соответствии с техническими условиями присоединения к энергосистеме. Последние могут быть разработаны на основании полученных расчетов максимума нагрузки и потребляемой электроэнергии.

1.3.2. Расчет несимметричных электрических нагрузок

Определение мощности наиболее загруженной фазы. При включении однофазных ЭП на фазное напряжение нагрузка каждой фазы определяется суммой всех подключенных нагрузок на эту фазу (рис. 1.11,а).

При включении однофазных ЭП на линейное напряжение нагрузка отдельных фаз определяется как полусумма нагрузок двух плеч, прилегающих к данной фазе (рис. 1.11,б):

$$P_A = \frac{P_{AC} + P_{AB}}{2};\ P_B = \frac{P_{AB} + P_{BC}}{2};\ P_C = \frac{P_{BC} + P_{AC}}{2}. \qquad (1.27)$$

Из полученных результатов выбирается наибольшее.

Степень неравномерности распределения нагрузки по фазам определяется по соотношению:

$$H = \frac{P_{ф.нб} - P_{ф.нм}}{P_{ф.нм}} \cdot 100\%, \qquad (1.28)$$

где $P_{ф.нб}$, $P_{ф.нм}$ – мощность наиболее и наименее загруженной фазы.

Расчет электроприемников ПКР производится после приведения к длительному режиму.

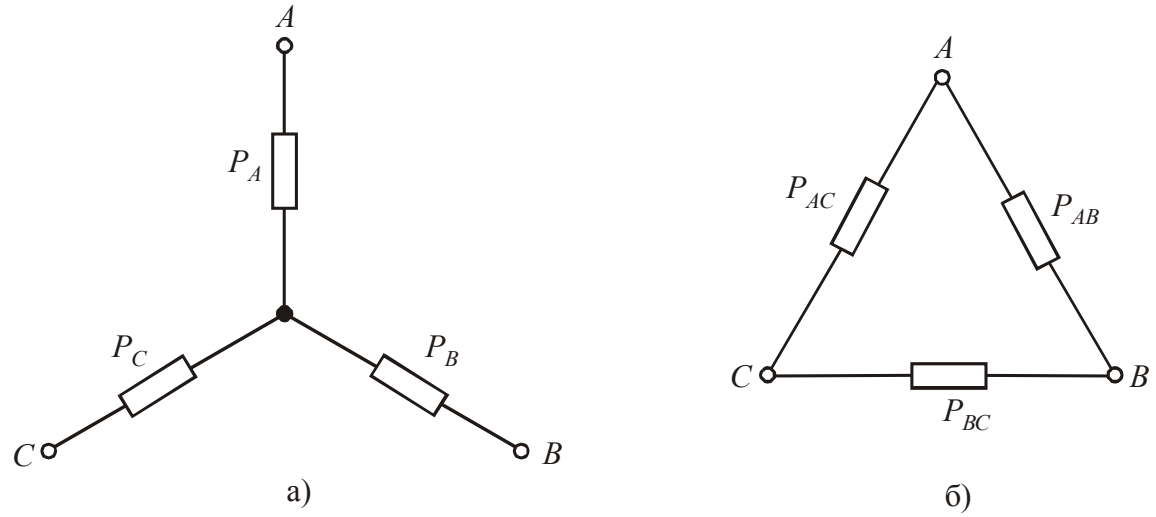


Рис. 1.11. Схема включения однофазных нагрузок на фазное (а) и линейное (б) напряжение

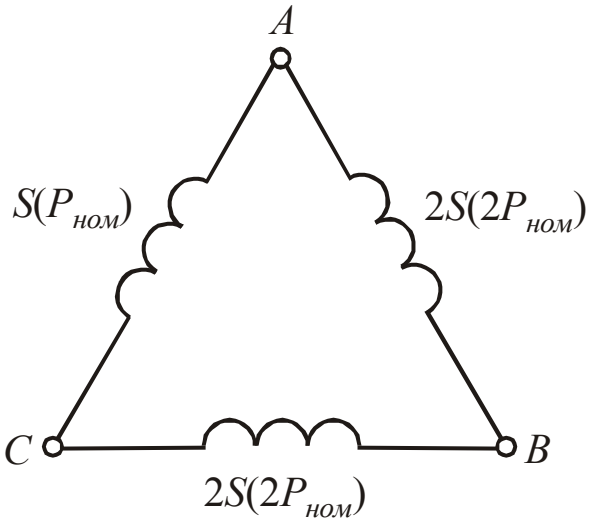


Рис. 1.12. Распределение однофазной нагрузки по фазам (к примеру 1.21)

Пример. 1.21.

Пять сварочных трансформаторов со следующими паспортными данными: $S_{пасп}$ = 28 кВА, ПВ = 40%, cosφ = 0,4 включены на линейное напряжение трехфазной сети 380/220 В. Определить степень неравномерности распределения нагрузки по фазам. Схема включения электроприемников приведена на рис. 1.12.

Решение.

1. Нагрузка однофазного ЭП с повторно-кратковременным режимом работы приводится к продолжительному режиму:

$$P_{ном} = S_{пасп} \cos\varphi_{пасп} \sqrt{\text{ПВ}} = 28 \cdot 0{,}4 \cdot \sqrt{0{,}4} = 7{,}1 \text{ кВт}.$$

2. Определяется нагрузка каждой фазы:

$$P_A = \frac{P_{AC} + P_{AB}}{2} = \frac{P_{ном} + 2P_{ном}}{2} = 1{,}5P_{ном} = 1{,}5 \cdot 7{,}1 = 10{,}7 \text{ кВт};$$

$$P_B = \frac{P_{AB} + P_{BC}}{2} = \frac{2P_{ном} + 2P_{ном}}{2} = 2P_{ном} = 2 \cdot 7{,}1 = 14{,}2 \text{ кВт};$$

$$P_C = \frac{P_{BC} + P_{AC}}{2} = \frac{2P_{ном} + P_{ном}}{2} = 1{,}5P_{ном} = 1{,}5 \cdot 7{,}1 = 10{,}7 \text{ кВт}.$$

Наиболее загруженной является фаза *B*, фазы *A* и *C* загружены равномерно.

3. Степень неравномерности распространения нагрузки по фазам составляет:

$$H = \frac{P_{ф.нб} - P_{ф.нм}}{P_{ф.нм}} \cdot 100\% = \frac{14{,}2 - 10{,}7}{10{,}7} \cdot 100\% = 33\% .$$

Приведение однофазных нагрузок к условной трехфазной мощности. При неравномерности распределения нагрузки по фазам не выше 15% расчет ведется как для трехфазных нагрузок (сумма всех однофазных нагрузок).

Если неравномерность превышает 15%, то расчетная нагрузка определяется по одной из рассмотренных ниже методик.

При числе однофазных приемников *до трех* условная трехфазная номинальная мощность $P_{усл}^{(3)}$ определяется:

- при включении электроприемников на фазное напряжение:

$$P_{усл}^{(3)} = 3P_{ф.нб}^{(1)}, \quad (1.29)$$

где $P_{ф.нб}^{(1)}$ – мощность наиболее загруженной фазы;

- при включении на линейное напряжение:

$$P_{усл}^{(3)} = \sqrt{3}P_{ф.нб}^{(1)} \text{ – для одного электроприемника,} \quad (1.30)$$

$$P_{усл}^{(3)} = 3P_{ф.нб}^{(1)} \text{ – для двух и трех ЭП,} \quad (1.31)$$

условная трехфазная номинальная мощность может быть определена и по мощности двух наиболее загруженных плеч $P_{ном1}$ и $P_{ном2}$:

$$P_{усл}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{P_{ном1}^2 + P_{ном2}^2 + P_{ном1} \cdot P_{ном2}}\ . \quad (1.32)$$

Пример 1.22.

Сварочный трансформатор включен на фазное напряжение: $S_{пасп} = 25$ кВА; $ПВ_{пасп} = 0{,}25$; $\cos\varphi_{пасп} = 0{,}5$; $U_ф = 220$ В. Определить условную трехфазную номинальную мощность сети.

Решение.

Мощность наиболее загруженной фазы составит:

$$P_{ф.нб}^{(1)} = S_{пасп} \cdot \cos\varphi_{пасп} \cdot \sqrt{ПВ_{пасп}} = 25 \cdot 0{,}5 \cdot \sqrt{0{,}25} = 6{,}25 \text{ кВт},$$

а условная трехфазная номинальная мощность:

$$P_{усл}^{(3)} = 3P_{ф.нб}^{(1)} = 3 \cdot 6{,}25 = 18{,}75 \text{ кВт}.$$

Пример 1.23.

Определить $P_{усл}^{(3)}$ сети, если три однофазные печи сопротивления мощностью 30, 60 и 90 кВт при $\cos\varphi = 1$ включены соответственно в фазы *A*, *B* и *C*.

Решение.

Наиболее загруженной фазой является фаза *C*. Для нее $P_{ф.нб}^{(1)} = 90$ кВт, следовательно, $P_{усл}^{(3)} = 3P_{ф.нб}^{(1)} = 3 \cdot 90 = 270$ кВт.

Пример 1.24.

Сварочный трансформатор паспортной мощностью 80 кВА; $U_{ном} = 380$ В; ПВ = 0,25; $\cos\varphi = 0{,}5$ включен в одно плечо трехфазной сети 380/220 В. Определить значение $P_{усл}^{(3)}$.

Решение.

Мощность наиболее загруженной фазы равна:

$$P_{ф.нб}^{(1)} = S_{пасп} \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{ПВ} = 80 \cdot 0{,}5 \cdot \sqrt{0{,}25} = 20 \text{ кВт},$$

следовательно, $P_{усл}^{(3)} = \sqrt{3}P_{ф.нб}^{(1)} = \sqrt{3} \cdot 20 = 34{,}6$ кВт.

Пример 1.25.

Два сварочных трансформатора паспортной мощностью соответственно:

$$S_{пасп\,1} = 80 \text{ кВА},\ ПВ_1 = 0{,}5,\ \cos\varphi_1 = 0{,}5;$$

$$S_{пасп\,2} = 30 \text{ кВА},\ ПВ_2 = 0{,}65,\ \cos\varphi_2 = 0{,}53;$$

включены в фазы АВ и ВС. Определить условную трехфазную номинальную мощность сети.

Решение.

1. Определяются номинальные мощности трансформаторов, приведенные к ПВ = 100%:

$$P_{ном\,1} = S_{пасп\,1}\cos\varphi_1\sqrt{ПВ_1} = 80\cdot 0{,}5\cdot\sqrt{0{,}5} = 28 \text{ кВт};$$

$$P_{ном\,2} = S_{пасп\,2}\cos\varphi_2\sqrt{ПВ_2} = 30\cdot 0{,}53\cdot\sqrt{0{,}65} = 13 \text{ кВт}.$$

2. Определяются нагрузки каждой фазы, выявляется наиболее загруженная фаза:

$$P_A = \frac{P_{AB}+P_{AC}}{2} = \frac{P_{ном\,1}+0}{2} = \frac{28}{2} = 14 \text{ кВт};$$

$$P_B = \frac{P_{AB}+P_{BC}}{2} = \frac{P_{ном\,1}+P_{ном\,2}}{2} = \frac{28+13}{2} = 20{,}5 \text{ кВт};$$

$$P_C = \frac{P_{BC}+P_{AC}}{2} = \frac{P_{ном\,2}+0}{2} = \frac{13}{2} = 6{,}5 \text{ кВт};$$

наибольшая нагрузка включена в фазу В, следовательно, $P^{(1)}_{ф.нб} = 20{,}5$ кВт.

3. Условная трехфазная номинальная мощность сети составляет:

$$P^{(3)}_{усл} = 3P^{(1)}_{ф.нб} = 3\cdot 20{,}5 = 61{,}5 \text{ кВт}.$$

Пример 1.26.

В ту же сеть, что и в примере 1.25, но в третье плечо между фазами АС включен дополнительно третий трансформатор с паспортной мощностью $S_{пасп\,3} = 32$ кВА, $ПВ_3 = 0{,}65$ и $\cos\varphi = 0{,}54$. Определить полную расчетную нагрузку и ток по узлу при $\cos\varphi = 0{,}5$.

Решение.

1. Определяются номинальные приведенные мощности трансформаторов:

$P_{ном\,1} = 28$ кВт; $P_{ном\,2} = 13$ кВт (см. пример 1.25);

$$P_{ном\,3} = S_{пасп\,3}\cos\varphi_3\sqrt{ПВ_3} = 32\cdot 0{,}54\cdot\sqrt{0{,}65} = 14 \text{ кВт}.$$

2. Определяется мощность наиболее загруженной фазы:

$$P_A = \frac{P_{AB}+P_{AC}}{2} = \frac{P_{ном\,1}+P_{ном3}}{2} = \frac{28+14}{2} = 21 \text{ кВт};$$

$$P_B = \frac{P_{AB}+P_{BC}}{2} = \frac{P_{ном\,1}+P_{ном\,2}}{2} = \frac{28+13}{2} = 20{,}5 \text{ кВт};$$

$$P_C = \frac{P_{BC}+P_{AC}}{2} = \frac{P_{ном\,2}+P_{ном3}}{2} = \frac{13+14}{2} = 13{,}5 \text{ кВт};$$

следовательно, наиболее загруженная фаза $P_A = P^{(1)}_{ф.нб} = 21$ кВт.

3. Условная трехфазная номинальная мощность узла составляет:

$$P_{усл}^{(3)} = 3P_{ф.нб}^{(1)} = 3 \cdot 21 = 63 \text{ кВт}$$

или по соотношению (1.32), если нет необходимости определять степень неравномерности нагрузки фаз:

$$P_{усл}^{(3)} = \sqrt{3}\sqrt{P_{ном1}^2 + P_{ном3}^2 + P_{ном1} \cdot P_{ном3}} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{28^2 + 14^2 + 28 \cdot 14} = 64 \text{ кВт}.$$

4. Полная расчетная нагрузка и ток по узлу:

$$S_{расч} = \frac{P_{усл}^{(3)}}{\cos\varphi} = \frac{63}{0{,}5} = 126 \text{ кВА},$$

$$I_{расч} = \frac{S_{расч}}{\sqrt{3}U_{ном}} = \frac{126}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38} = 192 \text{ А}.$$

Расчетная нагрузка однофазных ЭП, включенных на фазное или линейное напряжение при числе их более трех при одинаковом коэффициенте использования и cosφ, определяется по соотношениям:

$$P_{расч} = 3K_м \cdot K_и \cdot P_{ф.нб}^{(1)}, \quad (1.33)$$

$$Q_{расч} = 3K_и \cdot Q_{ф.нб}^{(1)}. \quad (1.34)$$

Величина $n_{эф}$ при определении $K_м$ для однофазных электроприемников вычисляется по выражению:

$$n_{эф} = \frac{2}{3}\frac{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i.o}}{p_{ном\,o.\max}}, \quad (1.35)$$

где $\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i.o}$ – сумма номинальных мощностей однофазных электроприемников данного расчетного узла; $p_{ном\,o.\max}$ – номинальная мощность наибольшего однофазного электроприемника.

Пример 1.27.

Определить расчетный ток линии, питающей группу однофазных электроприемников, имеющих одинаковый коэффициент использования $k_и = 0{,}3$ и cosφ = 0,5 и включенных на линейное напряжение. Между фазами АВ включены ЭП с номинальными мощностями 25 кВт, два по 15 кВт и два по 10 кВт; между фазами ВС – с мощностями 20, 15, 10 кВт и два по 7,5 кВт; между фазами АС – с мощностями 25, 15, 10 кВт и два по 20 кВт.

Решение.

1. Определяется общая установленная мощность между фазами:

$$P_{AB} = \sum_{i=1}^{5} p_{ном\,i} = 25 + 2 \cdot 15 + 2 \cdot 10 = 75 \text{ кВт};$$

$$P_{BC} = \sum_{i=1}^{5} p_{ном\,i} = 20 + 15 + 10 + 2 \cdot 7{,}5 = 60 \text{ кВт};$$

$$P_{AC} = \sum_{i=1}^{5} p_{ном\,i} = 25 + 15 + 10 + 2 \cdot 20 = 90\ \text{кВт}.$$

2. Определяются нагрузки каждой фазы:

$$P_A = \frac{P_{AC} + P_{AB}}{2} = \frac{90 + 75}{2} = 82{,}5\ \text{кВт};$$

$$P_B = \frac{P_{AB} + P_{BC}}{2} = \frac{75 + 60}{2} = 67{,}5\ \text{кВт};$$

$$P_C = \frac{P_{BC} + P_{AC}}{2} = \frac{60 + 90}{2} = 75\ \text{кВт};$$

и степень неравномерности распределения нагрузки по фазам:

$$H = \frac{P_{ф.нб} - P_{ф.нм}}{P_{ф.нм}} \cdot 100\% = \frac{82{,}5 - 67{,}5}{67{,}5} \cdot 100\% = 22\% > 15\%,$$

так как $H > 15\%$, то расчетная нагрузка определяется по (1.33), что требует расчета $n_{эф}$ и определения коэффициента максимума.

3. По соотношению (1.35) рассчитывается $n_{эф}$, а по таблице (см. например [1]) определяется $K_м$ как функция $n_{эф}$ и $K_и$:

$$n_{эф} = \frac{2}{3} \frac{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,i.o}}{p_{ном\,o.\max}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{225}{25} = 6;\ K_м = 1{,}88.$$

4. Определяются активная и полная расчетные нагрузки узла при $K_и$ = 0,3 и cosφ = 0,5 (см. условия задачи):

$$P_{расч} = 3K_м \cdot K_и \cdot P^{(1)}_{ф.нб} = 3 \cdot 1{,}88 \cdot 0{,}3 \cdot 82{,}5 = 139{,}6\ \text{кВт};$$

$$S_{расч} = \frac{P_{расч}}{\cos\varphi} = \frac{139{,}6}{0{,}5} = 279{,}2\ \text{кВА},$$

5. Расчетный ток линии, питающей группу однофазных электроприемников, составит:

$$I_{расч} = \frac{S_{расч}}{\sqrt{3} U_{ном}} = \frac{279{,}2}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38} = 423\ \text{А}.$$

Если число однофазных электроприемников с различными коэффициентами использования и cosφ более трех и при включении их на фазные и линейные напряжения они распределены по фазам по возможности равномерно, то расчет ведется через средние нагрузки за наиболее загруженную смену по каждой фазе.

Общая средняя нагрузка отдельных фаз определяется суммированием средних однофазных нагрузок данной фазы (фаза – нуль) и однофазных нагрузок, включенных на линейное напряжение, с соответствующим приведением последних к нагрузкам одной фазы и фазному напряжению с использованием коэффициентов приведения (табл. 1.6). Например, для фазы А:

$$\begin{cases} P_{см(A)} = k_и P_{AB} p_{(AB)A} + k'_и P_{CA} p_{(AC)A} + k''_и P_{AO} \\ Q_{см(A)} = k_и P_{AB} q_{(AB)A} + k'_и P_{CA} q_{(AC)A} + k''_и Q_{AO} \end{cases}, \quad (1.36)$$

где P_{AB}, P_{AC} – нагрузки, присоединенные на линейное напряжение соответственно между фазами АВ и АС; P_{AO}, Q_{AO} – нагрузки, присоединенные между фазой А и нулевым проводом; $p_{(AB)A}$, $p_{(AC)A}$, $q_{(AB)A}$, $q_{(AC)A}$ – коэффициенты приведения нагрузок, включенных на линейное напряжение АВ и АС к фазе А (табл. 1.6); $k_и, k'_и, k''_и$ – коэффициенты использования по активной мощности однофазных приемников различного режима работы.

Таблица 1.6.

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

Коэффициенты приведения	Коэффициенты мощности нагрузки								
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,65	0,7	0,8	0,9	1
$p_{(AB)A}$, $p_{(BC)B}$, $p_{(AC)C}$	1,4	1,17	1,0	0,89	0,84	0,8	0,72	0,64	0,5
$p_{(AB)B}$, $p_{(BC)C}$, $p_{(AC)A}$	–0,4	–0,17	0	0,11	0,16	0,2	0,28	0,36	0,5
$q_{(AB)A}$, $q_{(BC)B}$, $q_{(AC)C}$	1,26	0,86	0,58	0,38	0,3	0,22	0,09	–0,05	–0,29
$q_{(AB)B}$, $q_{(BC)C}$, $q_{(AC)A}$	2,45	1,44	1,16	0,96	0,88	0,8	0,67	0,53	0,29

Аналогично определяются средние однофазные нагрузки для фазы В и С. Находится наиболее загруженная фаза по активной мощности, например, фаза С, и эквивалентная трехфазная нагрузка сети от однофазных электроприемников:

$$P_{см} = 3P_{см(C)}; \quad Q_{см} = 3Q_{см(C)}. \quad (1.37)$$

Средневзвешенное значение коэффициента использования определяется для этой же наиболее загруженной фазы:

$$K_и = \frac{P_{см(C)}}{(P_{BC} + P_{AC}) : 2 + P_{C0}}, \quad (1.38)$$

а эффективное число электроприемников $n_{эф}$ – по (1.35).

Расчетная нагрузка от однофазных электроприемников составляет:

$$P_{расч} = K_м \cdot 3P_{см(C)}; \; Q_{расч} = K'_м \cdot 3Q_{см(C)}; \; S_{расч} = \sqrt{P^2_{расч} + Q^2_{расч}}. \quad (1.39)$$

Пример 1.28.

Определить расчетную нагрузку, создаваемую однофазными электроприемниками, включенными на фазное и линейное напряжение сети 380/220 В.

На *фазное напряжение* присоединены две регулируемые нагревательные печи мощностью по 20 кВт, cosφ = 1, $k_и$ = 0,5, $P_{ном}$ = 2·20=40 кВт.

На *линейное напряжение* включены:

Группа 1: сварочная машина типа МРМ11 с тремя однофазными сварочными трансформаторами: $S_{пасп}$ = 500 кВА, ПВ = 1,5%, cosφ = 0,4, $k_{и1}$ = 0,35. Приведенная мощность $p_{ном} = S_{пасп} \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{\text{ПВ}} = 500 \cdot 0{,}4 \cdot \sqrt{0{,}015} = 24{,}5$ кВт.

Группа 2: сварочный аппарат МТП-75: $S_{пасп}$ = 75 кВА, ПВ = 40%, cosφ = 0,5, $k_{и2}$ = 0,25. Приведенная мощность $p_{ном} = S_{пасп} \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{\text{ПВ}} = 75 \cdot 0{,}5 \cdot \sqrt{0{,}4} = 23{,}7$ кВт. Количество аппаратов – 2.

Группа 3: сварочный аппарат МТП-100: $S_{пасп}$ = 100 кВА, ПВ = 40%, cosφ = 0,4, $k_{и3}$ = 0,4. Приведенная мощность $p_{ном} = S_{пасп} \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{\text{ПВ}} = 100 \cdot 0{,}4 \cdot \sqrt{0{,}4} = 25{,}3$ кВт. Количество аппаратов – 2.

Решение.

Общая мощность однофазных электроприемников составляет:

$$P_{ном} = \sum_{i=1}^{9} p_{ном\,i} = 2 \cdot 20 + 3 \cdot 24{,}5 + 2 \cdot 23{,}7 + 2 \cdot 25{,}3 = 211{,}5 \text{ кВт}.$$

Для создания по возможности равномерной нагрузки по фазам (рис. 1.13) электроприменики с $U_{ном}$ = 220 В присоединены:

на фазу В: P_{B0} = 1·20 = 20 кВт;

на фазу С: P_{C0} = 1·20 = 20 кВт.

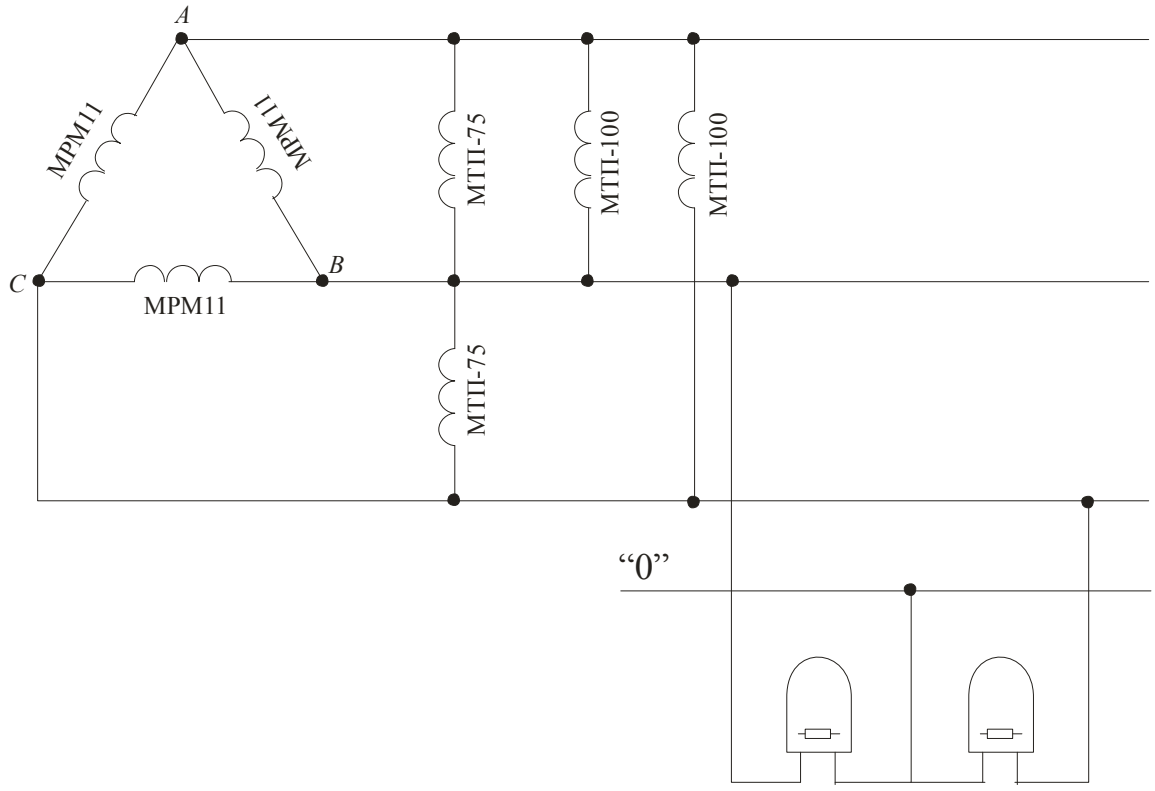


Рис. 1.13. Распределение однофазной нагрузки по фазам (к примеру 1.28)

На напряжение 380 В присоединены:

между фазами АВ: 1МРМ11 + 1МТП-75 + 1МТП-100,

$$P_{AB} = 1 \cdot 24{,}5 + 1 \cdot 23{,}7 + 1 \cdot 25{,}3 = 73{,}5 \text{ кВт};$$

между фазами ВС: 1МРМ11 + 1МТП-75,

$$P_{BC} = 1 \cdot 24{,}5 + 1 \cdot 23{,}7 = 48{,}2 \text{ кВт};$$

между фазами СА: 1МРМ11 + 1МТП-100,

$$P_{CA} = 1 \cdot 24{,}5 + 1 \cdot 25{,}3 = 49{,}8 \text{ кВт}.$$

Определяются средние нагрузки за наиболее загруженную смену электроприемников, включенных на фазное напряжение:

$$P_{см(B0)} = \kappa_и \cdot P_{B0} = 0{,}5 \cdot 20 = 10 \text{ кВт};$$

$$P_{см(C0)} = \kappa_и \cdot P_{C0} = 0{,}5 \cdot 20 = 10 \text{ кВт}.$$

Реактивные нагрузки этих электроприемников равные нулю.

Номинальные мощности электроприемников, включенных на линейное напряжение, приводятся к нагрузкам одной фазы и фазному напряжению. Коэффициент приведения p и q находятся по таблице 1.6. Для ЭП, присоединенных между фазами АВ, ВС и СА при коэффициенте мощности 0,4:

$$p_{(AB)\,A}, p_{(BC)\,B}, p_{(AC)\,C} = 1{,}17; \quad p_{(AB)\,B}, p_{(BC)\,C}, p_{(AC)\,A} = -0{,}17;$$

$$q_{(AB)\,A}, q_{(BC)\,B}, q_{(AC)\,C} = 0{,}86; \quad q_{(AB)\,B}, q_{(BC)\,C}, q_{(AC)\,A} = 1{,}44.$$

Для электроприемников, присоединенных между теми же фазами, но при cosφ = 0,5:

$$p_{(AB)\,A}, p_{(BC)\,B}, p_{(AC)\,C} = 1; \qquad p_{(AB)\,B}, p_{(BC)\,C}, p_{(AC)\,A} = 0;$$

$$q_{(AB)\,A}, q_{(BC)\,B}, q_{(AC)\,C} = 0{,}58; \quad q_{(AB)\,B}, q_{(BC)\,C}, q_{(AC)\,A} = 1{,}16.$$

Номинальные мощности ЭП, приведенная к соответствующим фазам, будут:

- для электроприемников *группы 1*, присоединенных между фазами АВ (cosφ = 0,4):

$$P'_{1A} = p_{ном1\,AB} \cdot p_{(AB)A} = 24{,}5 \cdot 1{,}17 = 28{,}7 \text{ кВт};$$

$$Q'_{1A} = p_{ном1\,AB} \cdot q_{(AB)A} = 24{,}5 \cdot 0{,}86 = 21{,}1 \text{ кВАр};$$

$$P'_{1B} = p_{ном1\,AB} \cdot p_{(AB)B} = 24{,}5 \cdot (-0{,}17) = -4{,}2 \text{ кВт};$$

$$Q'_{1B} = p_{ном1\,AB} \cdot q_{(AB)B} = 24{,}5 \cdot 1{,}44 = 35{,}3 \text{ кВАр};$$

- аналогично для электроприемников *этой же группы*, но включенных между фазами ВС (cosφ = 0,4):

$$P''_{1B} = p_{ном1\,BC} \cdot p_{(BC)B} = 24{,}5 \cdot 1{,}17 = 28{,}7 \text{ кВт};$$

$$Q''_{1B} = p_{ном1\,BC} \cdot q_{(BC)B} = 24{,}5 \cdot 0{,}86 = 21{,}1 \text{ кВАр};$$

$$P'_{1C} = p_{ном1\,BC} \cdot p_{(BC)C} = 24{,}5 \cdot (-0{,}17) = -4{,}2 \text{ кВт};$$

$$Q'_{1C} = p_{ном1\,BC} \cdot q_{(BC)C} = 24{,}5 \cdot 1{,}44 = 35{,}3 \text{ кВАр};$$

- аналогично для электроприемников *этой же группы*, но включенных между фазами СА (cosφ = 0,4):

$$P'''_{1C} = p_{ном1\,AC} \cdot p_{(AC)C} = 24{,}5 \cdot 1{,}17 = 28{,}7 \text{ кВт};$$

$$Q'''_{1C} = p_{ном1\,AC} \cdot q_{(AC)C} = 24{,}5 \cdot 0{,}86 = 21{,}1 \text{ кВАр};$$

$$P'''_{1A} = p_{ном1\,AC} \cdot p_{(AC)A} = 24{,}5 \cdot (-0{,}17) = -4{,}2 \text{ кВт};$$

$$Q'''_{1A} = p_{ном1\,AC} \cdot q_{(AC)A} = 24{,}5 \cdot 1{,}44 = 35{,}3 \text{ кВАр};$$

•• для электроприемников *группы 2*, присоединенных между фазами АВ ($\cos\varphi = 0{,}5$):

$$P'_{2\text{A}} = p_{ном2\,\text{AB}} \cdot p_{(\text{AB})\text{A}} = 23{,}7 \cdot 1 = 23{,}7\ \text{кВт};$$
$$Q'_{2\text{A}} = p_{ном2\,\text{AB}} \cdot q_{(\text{AB})\text{A}} = 23{,}7 \cdot 0{,}58 = 13{,}7\ \text{кВАр};$$
$$P'_{2\text{B}} = p_{ном2\,\text{AB}} \cdot p_{(\text{AB})\text{B}} = 23{,}7 \cdot 0 = 0;$$
$$Q'_{2\text{B}} = p_{ном2\,\text{AB}} \cdot q_{(\text{AB})\text{B}} = 23{,}7 \cdot 1{,}16 = 27{,}5\ \text{кВАр};$$

и между фазами ВС ($\cos\varphi = 0{,}5$):

$$P''_{2\text{B}} = p_{ном2\,\text{BC}} \cdot p_{(\text{BC})\text{B}} = 23{,}7 \cdot 1 = 23{,}7\ \text{кВт};$$
$$Q''_{2\text{B}} = p_{ном2\,\text{BC}} \cdot q_{(\text{BC})\text{B}} = 23{,}7 \cdot 0{,}58 = 13{,}7\ \text{кВАр};$$
$$P''_{2\text{C}} = p_{ном2\,\text{BC}} \cdot p_{(\text{BC})\text{C}} = 23{,}7 \cdot 0 = 0;$$
$$Q''_{2\text{C}} = p_{ном2\,\text{BC}} \cdot q_{(\text{BC})\text{C}} = 23{,}7 \cdot 1{,}16 = 27{,}5\ \text{кВАр};$$

••• для электроприемников *группы 3*, присоединенных между фазами АВ ($\cos\varphi = 0{,}4$):

$$P'_{3\text{A}} = p_{ном3\,\text{AB}} \cdot p_{(\text{AB})\text{A}} = 25{,}3 \cdot 1{,}17 = 29{,}6\ \text{кВт};$$
$$Q'_{3\text{A}} = p_{ном3\,\text{AB}} \cdot q_{(\text{AB})\text{A}} = 25{,}3 \cdot 0{,}86 = 21{,}8\ \text{кВАр};$$
$$P'_{3\text{B}} = p_{ном3\,\text{AB}} \cdot p_{(\text{AB})\text{B}} = 25{,}3 \cdot (-0{,}17) = -4{,}3\ \text{кВт};$$
$$Q'_{3\text{B}} = p_{ном3\,\text{AB}} \cdot q_{(\text{AB})\text{B}} = 25{,}3 \cdot 1{,}44 = 36{,}4\ \text{кВАр};$$

и между фазами СА ($\cos\varphi = 0{,}4$):

$$P'_{3\text{C}} = p_{ном3\,\text{AC}} \cdot p_{(\text{AC})\text{C}} = 25{,}3 \cdot 1{,}17 = 29{,}6\ \text{кВт};$$
$$Q'_{3\text{C}} = p_{ном3\,\text{AC}} \cdot q_{(\text{AC})\text{C}} = 25{,}3 \cdot 0{,}86 = 21{,}8\ \text{кВАр};$$
$$P''_{3\text{A}} = p_{ном3\,\text{AC}} \cdot p_{(\text{AC})\text{A}} = 25{,}3 \cdot (-0{,}17) = -4{,}3\ \text{кВт};$$
$$Q''_{3\text{A}} = p_{ном3\,\text{AC}} \cdot q_{(\text{AC})\text{A}} = 25{,}3 \cdot 1{,}44 = 36{,}4\ \text{кВАр}.$$

Средняя активная нагрузка за наиболее загруженную смену однофазных электроприемников, включенных на линейное напряжение, отнесенная к соответствующим фазам, составит:

$$P'_{см(\text{A})} = \kappa_{и1}\left(P'_{1\text{A}} + P'''_{1\text{A}}\right) + \kappa_{и2}P'_{2\text{A}} + \kappa_{и3}\left(P'_{3\text{A}} + P''_{3\text{A}}\right) =$$
$$= 0{,}35\left(28{,}7 + (-4{,}2)\right) + 0{,}25 \cdot 23{,}7 + 0{,}4\left(29{,}6 + (-4{,}3)\right) = 24{,}6\ \text{кВт};$$
$$P'_{см(\text{B})} = \kappa_{и1}\left(P'_{1\text{B}} + P''_{1\text{B}}\right) + \kappa_{и2}\left(P'_{2\text{B}} + P''_{2\text{B}}\right) + \kappa_{и3}P'_{3\text{B}} =$$
$$= 0{,}35\left(-4{,}2 + 28{,}7\right) + 0{,}25(0 + 23{,}7) + 0{,}4 \cdot (-4{,}3) = 12{,}8\ \text{кВт};$$
$$P'_{см(\text{C})} = \kappa_{и1}\left(P'_{1\text{C}} + P'''_{1\text{C}}\right) + \kappa_{и2}P''_{2\text{C}} + \kappa_{и3}P'_{3\text{C}} =$$
$$= 0{,}35\left(-4{,}2 + 28{,}7\right) + 0{,}25 \cdot 0 + 0{,}4 \cdot 29{,}6 = 20{,}4\ \text{кВт}.$$

Средняя реактивная нагрузка:

$$Q'_{см(\text{A})} = \kappa_{и1}\left(Q'_{1\text{A}} + Q'''_{1\text{A}}\right) + \kappa_{и2}Q'_{2\text{A}} + \kappa_{и3}\left(Q'_{3\text{A}} + Q''_{3\text{A}}\right) =$$
$$= 0{,}35\left(21{,}1 + 35{,}3\right) + 0{,}25 \cdot 13{,}7 + 0{,}4\left(21{,}8 + 36{,}4\right) = 46{,}4\ \text{кВАр};$$
$$Q'_{см(\text{B})} = \kappa_{и1}\left(Q'_{1\text{B}} + Q''_{1\text{B}}\right) + \kappa_{и2}\left(Q'_{2\text{B}} + Q''_{2\text{B}}\right) + \kappa_{и3}Q'_{3\text{B}} =$$
$$= 0{,}35\left(35{,}3 + 21{,}1\right) + 0{,}25(27{,}5 + 13{,}7) + 0{,}4 \cdot 36{,}4 = 44{,}6\ \text{кВАр};$$
$$Q'_{см(\text{C})} = \kappa_{и1}\left(Q'_{1\text{C}} + Q'''_{1\text{C}}\right) + \kappa_{и2}Q''_{2\text{C}} + \kappa_{и3}Q'_{3\text{C}} =$$
$$= 0{,}35\left(35{,}3 + 21{,}1\right) + 0{,}25 \cdot 27{,}5 + 0{,}4 \cdot 21{,}8 = 35{,}3\ \text{кВАр}.$$

Суммарные средние нагрузки однофазных электроприемников, включенных на фазное и линейное напряжения:

$$P_{см(\text{А})} = P_{см(\text{А}0)} + P'_{см(\text{А})} = 0 + 24{,}6 = 24{,}6 \text{ кВт};$$

$$P_{см(\text{В})} = P_{см(\text{В}0)} + P'_{см(\text{В})} = 10 + 12{,}8 = 22{,}8 \text{ кВт};$$

$$P_{см(\text{С})} = P_{см(\text{С}0)} + P'_{см(\text{С})} = 10 + 20{,}4 = 30{,}4 \text{ кВт};$$

$$Q_{см(\text{А})} = Q_{см(\text{А}0)} + Q'_{см(\text{А})} = 0 + 46{,}4 = 46{,}4 \text{ кВАр};$$

$$Q_{см(\text{В})} = Q_{см(\text{В}0)} + Q'_{см(\text{В})} = 0 + 44{,}6 = 44{,}6 \text{ кВАр};$$

$$Q_{см(\text{С})} = Q_{см(\text{С}0)} + Q'_{см(\text{С})} = 0 + 35{,}3 = 35{,}3 \text{ кВАр}.$$

Наиболее загруженной является фаза С:

$$P_{см(\text{С})} = 30{,}4 \text{ кВт}; \; Q_{см(\text{С})} = 35{,}3 \text{ кВАр}.$$

По соотношению (1.38) находится средневзвешенный коэффициент использования $K_и$, соответствующий наиболее загруженной фазе:

$$K_и = \frac{P_{см(\text{С})}}{(P_{\text{ВС}} + P_{\text{АС}}) : 2 + P_{\text{С}0}} = \frac{30{,}4}{(48{,}2 + 49{,}8) : 2 + 20} = 0{,}44 .$$

Величина $n_{эф}$ при определении $K_м$ для однофазных электроприемников определяется по (1.35) и составляет:

$$n_{эф} = \frac{2\sum_{i=1}^{n} p_{ном\,о\,i}}{3 p_{ном\,о\,\max}} = \frac{2 \cdot 211{,}5}{3 \cdot 25{,}3} = 6 .$$

Коэффициент максимума для активной нагрузки равен 1,6, а для реактивной при $n_{эф} = 6$ принимается равным 1,1.

Расчетная нагрузка трехфазного тока от однофазных электроприемников:

$$P_м = K_м \cdot 3P_{см(\text{С})} = 1{,}6 \cdot 3 \cdot 30{,}4 = 146 \text{ кВт};$$

$$Q_м = K'_м \cdot 3Q_{см(\text{С})} = 1{,}1 \cdot 3 \cdot 35{,}3 = 116{,}5 \text{ кВАр};$$

$$S_м = \sqrt{P_м^2 + Q_м^2} = \sqrt{146^2 + 116{,}5^2} = 186{,}8 \text{ кВА}.$$

Для определения наиболее загруженной фазы удобнее пользоваться расчетной таблицей (для данного примера см. табл. 1.7).

1.3.3. Пиковые нагрузки

Пиковая нагрузка – это максимальная нагрузка длительностью 1-2 сек. По ней проверяют колебания напряжения, выбирают уставки защиты, плавкие вставки предохранителей.

Пиковый ток $I_{пик}$ группы электроприемников, работающих при отстающем токе, определяется:

$$I_{пик} = I_{пуск\,\max} + \left(I_{расч} - \kappa_и I_{ном\,\max}\right), \qquad (1.40)$$

где $I_{пуск\,\max}$ – наибольший из пусковых токов электроприемника в группе по паспортным данным;

$I_{расч}$ – расчетный ток нагрузки группы электроприемников;

Таблица 1.7.

Определение наиболее загруженной фазы (к примеру 1.28)

№	Наименование узлов питания, групп электроприемников, номинальное напряжение и ПВ%	Установленная мощность (приведенная к ПВ=100%) $P_{ном}$, кВт	Число приемников	Установленная мощность однофазных приемников, включенных на линейное напряжение, кВт			Коэффициент приведения (по табл. 1.6)			Установленная мощность однофазных приемников, включенных на фазное напряжение, кВт			Коэффициент использования, $K_и$	Коэффициент мощности, cosφ	Средние нагрузки					
															активные $P_{см}$, кВт			реактивные $Q_{см}$, кВАр		
				AB	BC	AC	к фазе	p	q	A	B	C			A	B	C	A	B	C
1	Сварочная машина МРМ-11: 380 В, ПВ=1,5%, с тремя однофазными трансформаторами общей мощностью 500 кВ·А, cosφ=0,4; машин – 3	73,5	3	24,5	24,5	24,5	A B B C C A	1,17 –0,17 1,17 –0,17 1,17 –0,17	0,86 1,44 0,86 1,44 0,86 1,44				0,35	0,4	10,05 –1,47	–1,47 10,05 	 –1,47 10,05	7,39 12,36	12,36 7,39 	 12,36 7,39
2	Сварочный аппарат МТП-75: 380 В, ПВ=40%, мощностью 75 кВ·А, cosφ=0,5; аппаратов – 2	47,4	2	23,7	23,7		A B B C	1,0 0 1,0 0	0,58 1,16 0,58 1,16				0,25	0,5	5,93	0 5,93	 0	3,43	6,88 3,43	 6,88
3	Сварочный аппарат МТП-100: 380 В, ПВ=40%, мощностью 100 кВ·А, cosφ=0,4; аппаратов – 2	50,6	2	25,3		25,3	A B C A	1,17 –0,17 1,17 –0,17	0,86 1,44 0,86 1,44				0,4	0,4	11,84 –1,72	–1,72 	 11,84	8,72 14,56	14,56 	 8,72
4	Регулируемые нагревательные печи	40	2								20	20	0,5	1		10	10			
	ИТОГО:	**211,5**	**9**	**73,5**	**48,2**	**49,8**					**20**	**20**			**24,6**	**22,8**	**30,4**	**46,4**	**44,6**	**35,3**

$I_{ном\,\max}$ – номинальный (приведенный к ПВ=100%) ток электроприемника с наибольшим пусковым током;

$\kappa_и$ – коэффициент использования электроприемника, имеющего наибольший пусковой ток.

При подключении к электрической сети группы из двух-пяти электроприемников за пиковый ток принимается:

$$I_{пик} = I_{пуск\,\max} + \sum_{i=1}^{n-1} I_{ном\,i}\ . \qquad (1.41)$$

Здесь $\sum_{i=1}^{n-1} I_{ном\,i}$ – суммарный номинальный ток группы электроприемников без учета номинального тока электроприемника, имеющего наибольший пусковой ток.

В качестве наибольшего пикового тока одного ЭП принимается: для электродвигателей – пусковой ток, для печных и сварочных трансформаторов – пиковый ток по паспортным данным. При отсутствии последних:

- пусковой ток асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей может быть принят равным 5-7 кратному номинальному;
- пусковой ток двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей с фазным ротором – не ниже 2,5-кратного номинального;

пиковый ток печных и сварочных трансформаторов – не менее 3-кратного номинального (без приведения к ПВ=100%). Для группы электродвигателей, которые могут включаться одновременно, пиковый ток принимается равным сумме их пусковых токов.

Пиковые нагрузки таких групп приемников, как электрические печи сопротивления и осветительные установки с лампами накаливания, совпадают с расчетными:

$$I_{пик} = I_{расч}, \qquad (1.42)$$

так как толчки тока при включении таких электроприемников кратковременны и не создают недопустимых отклонений напряжения в сети.

Расчетный ток в соотношении (1.40) определяется по выражению:

$$I_{расч} = \frac{S_{расч}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}, \qquad (1.43)$$

после расчета полной нагрузки $S_{расч}$ в целом по группе (узлу) электроприемников (с переменным и/или практически постоянным графиком нагрузок).

Номинальный ток электроприемника $I_{ном}$ рассчитывается по паспортным (каталожным) данным по одной из приведенных ниже формул:

- для трехфазных электродвигателей:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos\varphi_{ном} \cdot \eta_{ном}}, \quad (1.44)$$

где $P_{ном}$ – номинальная активная мощность электродвигателя;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение сети;

$\cos\varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности нагрузки;

$\eta_{ном}$ – номинальный к.п.д.;

- для многодвигательного электропривода:

$$I_{ном} = \frac{\sum_{i=1}^{n} P_{ном\,i}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos\varphi_{ном} \cdot \eta_{ном}}, \quad (1.45)$$

где $\sum_{i=1}^{n} P_{ном\,i}$ – сумма номинальных мощностей ЭП многодвигательного привода;

$\cos\varphi_{ном}$ – номинальный коэффициент мощности *наиболее мощного* ЭП привода;

$\eta_{ном}$ – номинальный к.п.д. *наиболее мощного* ЭП привода;

- для трехфазной электропечи:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot \cos\varphi}; \quad (1.46)$$

- для трехфазной выпрямительной установки или трансформатора:

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}; \quad (1.47)$$

- для однофазных ЭП силовой сети, включенных на фазное напряжение:

$$I_{ном} = \frac{P_{ф}}{U_{ном,\,ф} \cdot \cos\varphi_{ном}}; \quad (1.48)$$

где $P_{ф}$ – активная мощность однофазного электроприемника;

$U_{ном,\,ф}$ – номинальное фазное напряжение сети;

- для сетей постоянного тока и однофазного тока с активной нагрузкой ($\cos\varphi_{ном} = 1$):

$$I_{ном} = \frac{P_{ф}}{U_{ном,\,ф}}; \quad (1.49)$$

- для трехфазной осветительной сети с лампами накаливания:

$$I_{ном} = \frac{P_o}{\sqrt{3} \cdot U_{ном,\,ф}}, \qquad (1.50)$$

где P_o – суммарная активная трехфазная мощность нагрузки осветительной сети, все электроприемники которой присоединяются на фазное напряжение.

Пример 1.29.

Определить пиковый ток линии, питающей группу электродвигателей крана грузоподъемностью 10 т с паспортными данными, приведенными в таблице 1.8.

Таблица 1.8.

Паспортные данные электродвигателей подъемного крана (к примеру 1.29)

Электродвигатель	$p_{пасп}$, кВт	$ПВ_{пасп}$, %	cosφ	$I_{ном}$, А	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$
Подъем груза	12,0	15	0,76	27,5	5,5
Передвижение тележки	4,0	15	0,72	8,9	5
Передвижение моста	8,0	15	0,75	17,5	5

Напряжение сети 380 В, коэффициент использования $к_и = 0{,}1$.

Решение.

Расчетный ток группы электродвигателей определяется по соотношению (1.43):

$$I_{ном} = \frac{S_{расч}}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}} = \frac{12{,}4}{\sqrt{3} \cdot 0{,}38} = 18{,}8\ \text{А},$$

где, согласно рекомендациям таблицы 1.3, $P_{расч}$, $Q_{расч}$ и $S_{расч}$ принимают следующие значения:

$$P_{расч} = \sum_{i=1}^{3} p_{пасп\,i} \sqrt{ПВ_{пасп\,i}} = (12 + 4 + 8) \cdot \sqrt{0{,}15} = 9{,}3\ \text{кВт};$$

$$Q_{расч} = \sum_{i=1}^{3} p_{пасп\,i} \cdot \text{tg}\varphi_i \sqrt{ПВ_{пасп\,i}} = (12 \cdot 0{,}85 + 4 \cdot 1{,}0 + 8 \cdot 0{,}88) \cdot \sqrt{0{,}15} = 8{,}2\ \text{кВАр};$$

$$S_{расч} = \sqrt{P_{расч}^2 + Q_{расч}^2} = \sqrt{9{,}3^2 + 8{,}2^2} = 12{,}4\ \text{кВА}.$$

Наибольшим пусковым током обладает электродвигатель для подъема груза, его величина составляет (см. табл. 1.8):

$$I_{пуск\,\max} = 5{,}5 \cdot I_{ном\,\max} = 5{,}5 \cdot 27{,}5 = 151\ \text{А}.$$

Номинальный ток этого двигателя, приведенный к ПВ = 100%:

$$I_{ном\,\max} = I_{ном} \cdot \sqrt{ПВ_{пасп}} = 27{,}5 \cdot \sqrt{0{,}15} = 10{,}6\ \text{А}.$$

Пиковый ток линии рассчитывается по соотношению (1.40):

$$I_{пик} = I_{пуск\,\max} + \left(I_{расч} - к_и I_{ном\,\max}\right) = 151 + (18{,}8 - 0{,}1 \cdot 10{,}6) = 168{,}7\ \text{А}.$$

Пример 1.30.

Определить пиковый ток троллея, от которого запитаны два заливочных крана (пример 1.10), имеющие механизмы со следующими электродвигателями: 2·100 кВт с фазным ротором (работают одновременно), $I_{пасп} = 215$ А; 2·15 + 1·60 кВт и 2·80 кВт; продолжительность включения кранов ПВ = 0,25, а коэффициент использования $K_и = 0,2$.

Решение.

Наибольшими электроприемниками этих кранов являются два двигателя главного подъема с фазным ротором по 100 кВт при ПВ = 0,25. Паспортный ток $I_{пасп} = 215$ А, а пусковой ток:

$$I_{пуск} = 2,5 \cdot I_{пасп} = 2,5 \cdot 215 = 536 \text{ А}.$$

Одновременно пускаются два двигателя. Максимальный расчетный ток составляет 328 А (см. решение примера 1.10).

Пиковый ток троллея:

$$I_{пик} = 2 \cdot I_{пуск} + \left(I_{расч} - \kappa_и I_{ном}\right) = 2 \cdot 536 + \left(328 - 0,2 \cdot 215\right) = 1360 \text{ А},$$

здесь 215 А – ток наибольшего электроприемника, приведенный к ПВ = 100%.

1.4. Определение расчетной электрической нагрузки цеха

Расчетная нагрузка цеха (получасовой максимум) определяется методом упорядоченных диаграмм. Исходными данными для расчета являются: план цеха с расположением электроприемников, электрическая схема цеха, количество электроприемников, их установленные мощности, коэффициенты мощности и использования каждого электропиремника.

Выбор принципиальной схемы внутрицеховой сети производится с учетом характера среды помещения, категории надежности электроснабжения, равномерности размещения технологического оборудования в цехе. Внутрицеховые сети выполняются по радиальной, магистральной или смешенной схемам.

Распределительные шкафы (пункты) обычно записываются от цеховой подстанции кабелями, марка и способ прокладки которых определяются характером среды в помещении [1]. В цехе они размещаются таким образом, чтобы обеспечить удобство монтажа и эксплуатации, чтобы не было обратных перетоков электроэнергии, обеспечивался оптимальный расход проводников и труб. В целях экономии проводникового материала и коммутационной аппаратуры на подстанции несколько шкафов могут запитываться в шлейф (цепочкой).

Мощные ЭП с большими номинальными и пусковыми токами обычно присоединяются непосредственно к подстанции или магистральному шинопроводу.

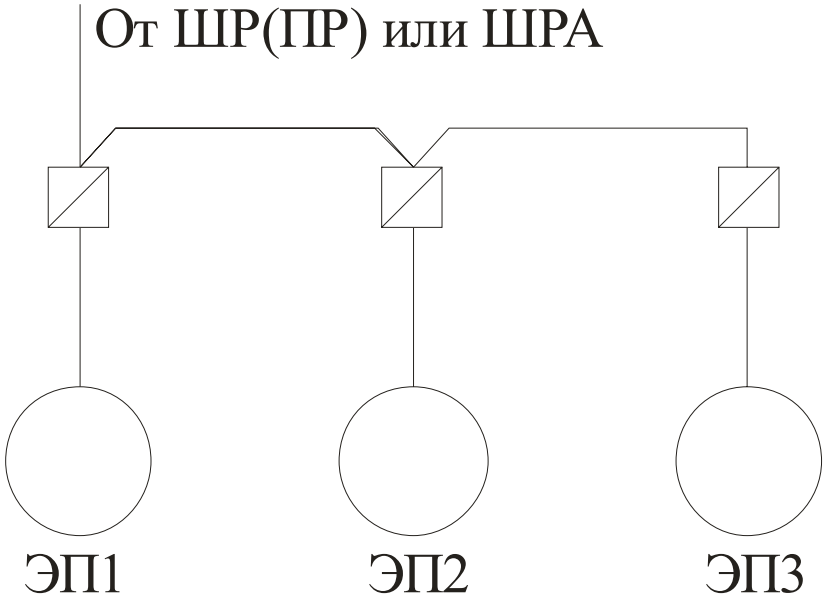


Рис. 1.14. Схема соединения трех электроприемников небольшой мощности цепочкой

Три-четыре электроприемника мощностью до 3 кВт допускается запитывать от одного ответвления цепочкой (рис. 1.14). Рекомендуется в цепочку соединять одинаковые или близкие по установленной мощности электроприемники. Нагрузка такого ответвления определяется суммой номинальных мощностей.

При расчете электрических нагрузок используются специальные таблицы (см., например, пример 1.31). Рекомендации по последовательности расчетов электрических нагрузок в сетях напряжением до 1000 В (силовые шкафы, магистрали, шинопроводы, цеха) изложены в [2, 3], а порядок заполнения типовой таблицы – в [4, 5].

Пример 1.31.

Составить смеху электроснабжения, рассчитать электрическую нагрузку и выбрать трансформаторную подстанцию для одного из цехов машиностроительного завода. Перечень оборудования и технические данные электроприемников приведены в таблице 1.9. Площадь цеха 350 м^2, освещение выполнено газоразрядными лампами.

Решение.

1. Так как в цехе присутствуют потребители I и II категории, то ТП – двухтрансформаторная, а между секциями низкого напряжения устанавливается устройство АВР (автоматическое включение резерва). Трансформаторы выбираются однотипными и равной мощности. С целью равномерного распределения нагрузки по секциям трансформаторов:

- нагрузка трехфазных ЭП повторно-кратковременного режима приводится к длительному режиму (см. раздел 1.1):

Таблица 1.9.

Технические данные электроприемников (к примеру 1.31)

Наименование электроприемников	$p_{ном}$, кВт	n	$\kappa_и$	cosφ	tgφ	Категория надежности электроснабжения
Трехфазные электроприемники длительного режима работы						
Компрессорная установка	28	5	0,65	0,8	0,75	I
Станок карусельный	40	2	0,14	0,5	1,73	II
Печь сопротивления	35	6	0,8	0,95	0,33	II
Транспортер роликовый	10	3	0,55	0,75	0,88	II
Трехфазные электроприемники повторно-кратковременного режима работы						
Тельфер транспортный, ПВ = 60%	5	8	0,3	0,5	1,73	II
Однофазные электроприемники повторно-кратковременного режима работы						
Трансформатор сварочный, ПВ = 40%, $U_{ном}$ = 380 В	28 кВА	5	0,2	0,4	2,29	II
Осветительная установка						
Газоразрядные лампы (ГРЛ)	9÷11 Вт/м^2		κ_c = =0,85	0,95	0,33	I

$$p_{ном} = p_{пасп}\sqrt{\text{ПВ}} = 5\cdot\sqrt{0,6} = 3,9 \text{ кВт};$$

- нагрузка однофазных ЭП повторно-кратковременного режима, включенная на линейное напряжение (рис. 1.15), приводится к длительному режиму и к условной трехфазной мощности (см. раздел 1.3.2):

$$p_{ном} = S_{пасп}\cdot\cos\varphi\cdot\sqrt{\text{ПВ}} = 28\cdot 0,4\cdot\sqrt{0,4} = 7,1 \text{ кВт};$$

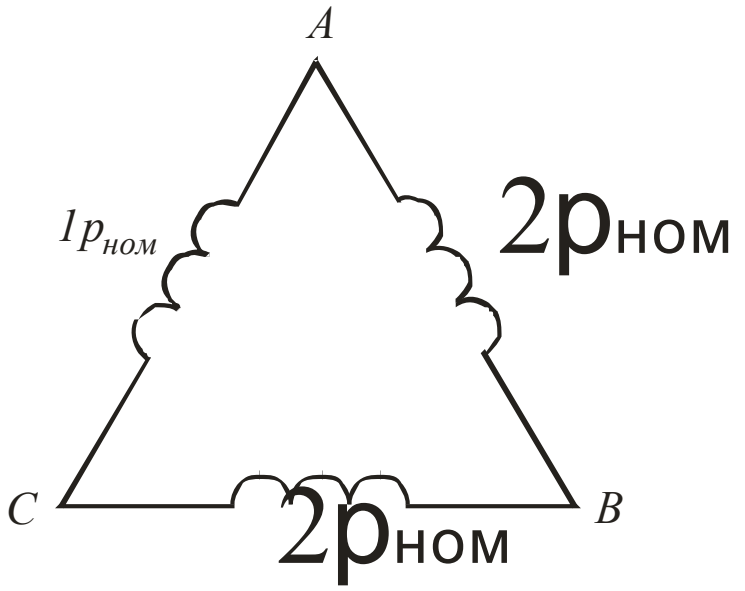


Рис. 1.15. Распределение однофазной нагрузки по фазам (к примеру 1.31)

$$P_{\text{A}} = \frac{P_{\text{AC}} + P_{\text{AB}}}{2} = \frac{1 \cdot p_{ном} + 2 \cdot p_{ном}}{2} = 1{,}5 \cdot p_{ном} = 1{,}5 \cdot 7{,}1 = 10{,}7 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{B}} = \frac{P_{\text{AB}} + P_{\text{BC}}}{2} = \frac{2 \cdot p_{ном} + 2 \cdot p_{ном}}{2} = 2 \cdot p_{ном} = 2 \cdot 7{,}1 = 14{,}2 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{C}} = \frac{P_{\text{BC}} + P_{\text{AC}}}{2} = \frac{2 \cdot p_{ном} + 1 \cdot p_{ном}}{2} = 1{,}5 \cdot p_{ном} = 1{,}5 \cdot 7{,}1 = 10{,}7 \text{ кВт};$$

наиболее загруженной фазой является фаза В ($P_{\text{B}} = P_{ф.\,нб} = 14{,}2$ кВт), наименее – А, С ($P_{\text{A}} = P_{\text{C}} = P_{ф.\,нм} = 10{,}7$ кВт), неравномерность составляет:

$$H = \frac{P_{ф.\,нб} - P_{ф.\,нм}}{P_{ф.\,нм}} \cdot 100\% = \frac{14{,}2 - 10{,}7}{10{,}7} \cdot 100\% = 33\% > 15\%,$$

тогда условная трехфазная мощность составит:

$$P_{усл}^{(3)} = 3 \cdot P_{ф.\,нб} = 3 \cdot 14{,}2 = 42{,}6 \text{ кВт};$$

- методом удельной мощности определяется нагрузка осветительной установки:

$$P_{о} = p_{уд} \cdot F = 10 \cdot 10^{-3} \cdot 350 = 3{,}5 \text{ кВт};$$

- предполагается применение следующих распредустройств:
  для трехфазных ЭП повторно-кратковременного режима работы – РП1,
  для однофазных ЭП повторно-кратковременного режима работы – РП2,
  для трехфазных ЭП длительного режима – ШМА1 и ШМА2,
  для освещения – ЩО,

такой набор позволит равномерно распределить нагрузку по секциям и сформировать смеху электроснабжения.

2. Нагрузка распределяется по секциям, по возможности равномерно (табл. 1.10).

Таблица 1.10.

Распределение нагрузки по секциям (к примеру 1.31)

Секция 1		*Секция 2*	
Распредустройство и электроприемники	Нагрузка приведенная, кВт	Нагрузка приведенная, кВт	Распредустройство и электроприемники
РП1			РП2
Тельфер: 8×3,9 кВт	31,2	42,6	Трансформатор сварочный: $P_{усл}^{(3)} = 42{,}6$ кВт
		3,5	ЩО
ШМА1			ШМА2
Компрессорная установка:			Компрессорная установка:
3×28 кВт	84	56	2×28 кВт
Станок карусельный:			Станок карусельный:
1×40 кВт	40	40	1×40 кВт
Печь сопротивления:			Печь сопротивления:
3×35 кВт	105	105	3×35 кВт
Транспортер: 1×10 кВт	10	20	Транспортер: 2×10 кВт
ИТОГО	270,20	267,1	ИТОГО

Примечание. Резервные электроприемники в расчете электрических нагрузок не учитываются.

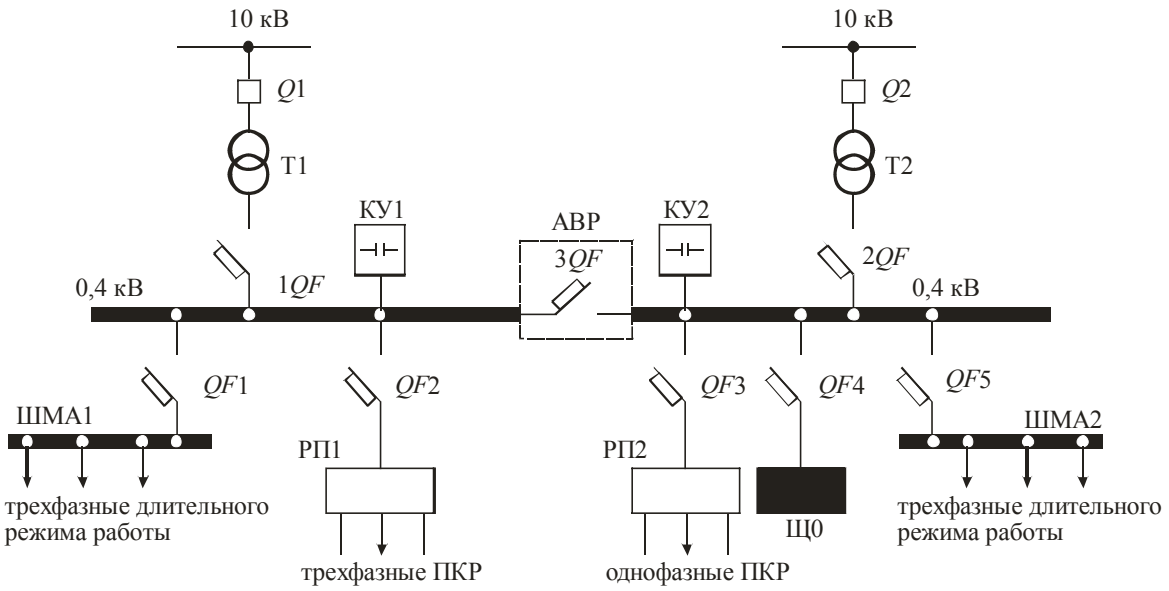


Рис. 1.16. Схема электроснабжения цеха (к примеру 1.31)

3. Составляется схема электроснабжения цеха (рис. 1.16).

4. Согласно распределению нагрузки по узлам питания заполняется свободная ведомость электрических нагрузок цеха (табл. 1.11). Расчет выполняется методом упорядоченных диаграмм (раздел 1.3.1).

5. Так как количество и мощность трансформаторов цеховых подстанций не выбраны, то потер мощности в них ориентировочно определяются из соотношений:

$$\Delta P_{тр} = 0{,}02 \cdot S_{м}^{нн} = 0{,}02 \cdot 524{,}7 = 10{,}5 \text{ кВт};$$

$$\Delta Q_{тр} = 0{,}1 \cdot S_{м}^{нн} = 0{,}1 \cdot 524{,}7 = 52{,}5 \text{ кВАр};$$

$$\Delta S_{тр} = \sqrt{\Delta P_{тр}^2 + \Delta Q_{тр}^2} = \sqrt{10{,}5^2 + 52{,}5^2} = 53{,}5 \text{ кВА},$$

где $S_{м}^{нн}$ – полная расчетная нагрузка цеха на шинах низкого напряжения цеховой подстанции.

6. Определяется расчетная мощность трансформатора с учетом потерь, но без компенсации реактивной мощности:

$$S_{тр} \geq S_{расч} = 0{,}7 \cdot S_{м}^{нн} = 0{,}7 \cdot 578{,}2 = 405 \text{ кВА}.$$

7. По [1] выбирается КТП2×400-10/0,4 с двумя трансформаторами ТМ400-10/0,4. Коэффициент загрузки составит:

$$\beta_{тр} = \frac{S_{м}^{нн}}{n \cdot S_{ном\,тр}} = \frac{524{,}7}{2 \cdot 400} = 0{,}66 .$$

Пример 1.32.

Для составления сводной ведомости электрических нагрузок завода электротехнической промышленности рассчитать максимальную нагрузку ремонтно-механического цеха, план которого приведен на рис. 1.17, а сведения об электроприемниках – в таблице 1.12. Освещение цеха выполнено лампами накаливания.

Таблица 1.11.

Сводная ведомость электрических нагрузок цеха (к примеру 1.31)

№	Наименование узлов питания и групп электроприемников	Количество ЭП (n)	Установленная мощность, приведенная к ПВ=100%		$m = p_{н.\max} / p_{н.\min}$	Коэффициент использования $\kappa_и$, $K_и$	cosφ / tgφ	Средняя нагрузка за наиболее загруженную смену		Эффективное число электроприемников $n_{эф}$	Коэффициент максимума $K_м$	Максимальная нагрузка			Расчетный ток $I_м$, А
			одного ЭП (наименьшего – наибольшего) $p_{ном}$, кВт	общая $P_{ном}$, кВт				$p_{см} = \kappa_и p_{ном}$, кВт	$q_{см} = p_{см}$·tgφ, кВАр			$P_м = K_м P_{см}$, кВт	$Q_м = Q_{см}$ при $n_{эф} > 10$ $Q_м = 1{,}1 Q_{см}$ при $n_{эф} \le 10$, кВАр	$S_м$, кВА	
Распределительный пункт РП1															
1	Тельфер, ПВ=60%	8	3,9	31,2		0,30	0,5/1,73	9,4	16,3	8	1,72	16,2	17,9	24,1	36,7
Распределительный пункт РП2															
2	Трансформатор сварочный, однофазный, ПВ=40%	5	7,1	42,6		0,20	0,4/2,29	8,5	19,5	5	2,42	20,6	21,5	29,7	45,2
Шинопровод магистральный ШМА1															
	ЭП с перем. гр. нагрузки:														
3	Станок карусельный	1	40	40		0,14	0,5/1,73	5,6	9,7						
4	Транспортер роликовый	1	10	10		0,55	0,75/0,88	5,5	4,8						
	ИТОГО по группе	2	10-40	50	>3	0,22	0,61/1,31	11,1	14,5	—	—	50,0	78,0		
	ЭП с практически постоянным гр. нагрузки:														
5	Компрессорная установка	3	28	84		0,65	0,8/0,75	54,6	41,0						
6	Печь сопротивления	3	35	105		0,80	0,95/0,33	84,0	27,7						
	ИТОГО по группе	6	28-35	189		0,73	0,90/0,50	138,6	68,7		1	138,6	68,7		
	ИТОГО по ШМА1	8	10-40	239		0,63	0,87/0,56	149,7	83,2			188,6	146,7	238,9	363,5

Окончание таблицы 1.11.

Сводная ведомость электрических нагрузок цеха (к примеру 1.31)

№	Наименование узлов питания и групп электроприемников	Количество ЭП (n)	Установленная мощность, приведенная к ПВ=100%		$m = p_{н.\max} / p_{н.\min}$	Коэффициент использования $\kappa_и$, $K_и$	cosφ / tgφ	Средняя нагрузка за наиболее загруженную смену		Эффективное число электроприемников $n_{эф}$	Коэффициент максимума $K_м$	Максимальная нагрузка			Расчетный ток $I_м$, А
			одного ЭП (наименьшего – наибольшего) $p_{ном}$, кВт	общая $P_{ном}$, кВт				$p_{см} = \kappa_и p_{ном}$, кВт	$q_{см} = p_{см}$·tgφ, кВАр			$P_м = K_м P_{см}$, кВт	$Q_м = Q_{см}$ при $n_{эф} > 10$ $Q_м = 1{,}1 Q_{см}$ при $n_{эф} \le 10$, кВАр	$S_м$, кВА	
Шинопровод магистральный ШМА2															
	ЭП с перем. гр. нагрузки:														
7	Станок карусельный	1	40	40		0,14	0,5/1,73	5,6	9,7						
8	Транспортер роликовый	2	10	20		0,55	0,75/0,88	11,0	9,7						
	ИТОГО по группе	3	10-40	60	>3	0,28	0,65/1,17	16,6	19,4			60,0	86,8		
	ЭП с практически постоянным гр. нагрузки:														
9	Компрессорная установка	2	28	56		0,65	0,8/0,75	36,4	27,3						
10	Печь сопротивления	3	35	105		0,80	0,95/0,33	84,0	27,7						
	ИТОГО по группе	5	28-35	161		0,75	0,91/0,46	120,4	55,0		1	120,4	55,0		
	ИТОГО по ШМА2	8	10-40	221		0,62	0,88/0,54	137,0	74,4			180,4	141,8	229,5	349,0
	Силовая нагрузка цеха	29	3,9-40	533,8		0,57	0,84/0,63	304,6	193,4			405,8	327,9	521,5	
	Освещение ГРЛ			3,5		0,85	0,95/0,33	3	1			3	1	3,2	
	ИТОГО по цеху (НН)	29	3,9-40	537,3		0,57	0,85/0,63	307,6	194,4			408,8	328,9	524,7	798,1
	Потери											10,5	52,5	53,5	
	ИТОГО на шинах 10 кВ											419,3	381,4	578,2	

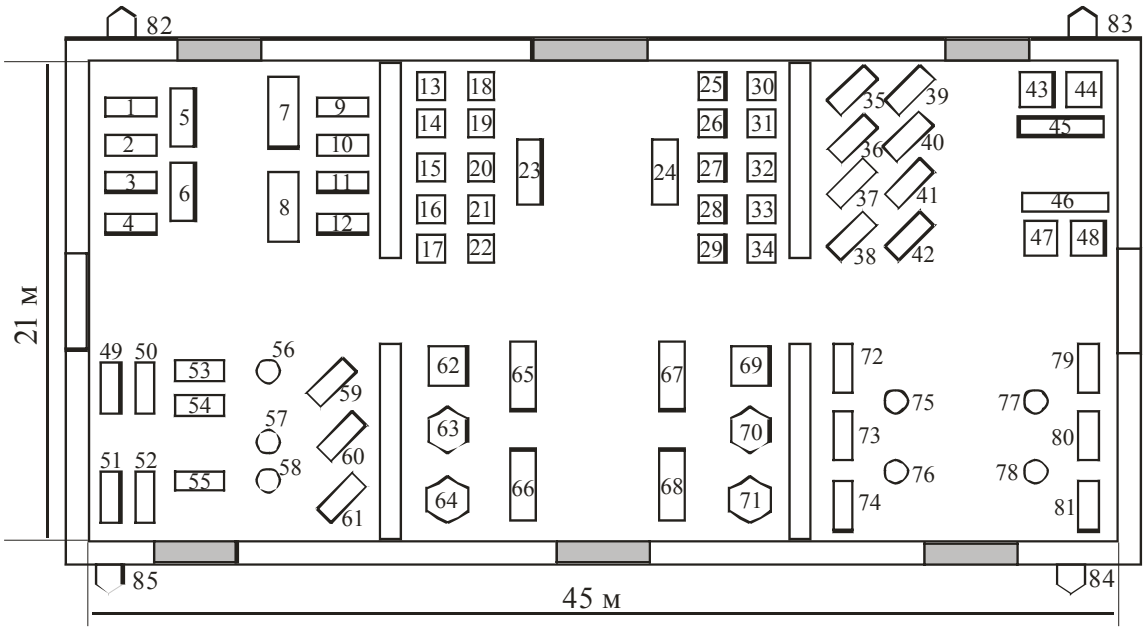


Рис. 1.17. План ремонтно-механического цеха завода электротехнической промышленности (к примеру 1.32)

Таблица 1.12.

Сведения об ЭП ремонтно-механического цеха (к примеру 1.32)

Номер на плане	Наименование электроприемника	$\kappa_и$	cosφ	$p_{ном}$, кВт
1-4, 9-13	Токарно-винторезный станок	0,15	0,5	4,0
5-8	Настольно-сверлильный станок	0,15	0,5	0,9
14-22, 25-34	Токарно-винторезный станок	0,15	0,5	3,0
23, 24	Универсально-фрезерный станок	0,14	0,6	5,4
35-42	Металлорежущий станок	0,25	0,5	3,5
43,44, 47, 48	Поперечно-строгальный станок	0,17	0,65	4,1
45, 46	Долбежный станок	0,24	0,65	3,0
49-52	Трансформатор сварочный, ПВ=40%	0,3	0,35	4,7
53-55	Намоточный станок	0,15	0,5	2,4
56-58	Вертикально-сверлильный станок	0,15	0,5	2,4
59-61	Сушильный электрический шкаф	0,75	0,95	6,3
62, 69	Станок отрезной с дисковой пилой	0,15	0,5	2,8
63, 64, 70,71	Пресс гидравлический	0,65	0,8	5,1
65-68	Пресс фрикционный	0,65	0,8	9,0
72-74, 79-81	Трансформатор сварочный, ПВ=40%	0,3	0,35	39
75-78	Преобразователь сварочный	0,3	0,5	16
82-85	Вентиляторы	0,65	0,8	22

Решение.

Силовая нагрузка цеха рассчитывается методом упорядоченных диаграмм (раздел 1.3.1), а осветительная – по удельной мощности осветительной нагрузки на единицу производственной площади и коэффициенту спроса (соотношение (1.22)). Результаты расчета представлены в таблице 1.13.

Пример 1.33.

Для приведенной на рис. 1.18 схемы электроснабжения методом упорядоченных диаграмм рассчитать электрические нагрузки. Сведения об электроприемниках представлены в таблице 1.14. График нагрузки компрессора (асинхронный двигатель $p_{ном} = 200$ кВт, $\cos\varphi = 0{,}8$), подключенного к распредустройству низкого напряжения, приведен на рис. 1.19. Наиболее загруженная смена с 8^{00} до 16^{00}.

Таблица 1.13.

Расчетные нагрузки ремонтно-механического цеха (к примеру 1.32)

№	Наименование узлов питания и групп электроприемников	Количество ЭП (n)	Установленная мощность, приведенная к ПВ=100%		$m = p_{н.\max} / p_{н.\min}$	Коэффициент использования $к_и$, $K_и$	cosφ / tgφ	Средняя нагрузка за наиболее загруженную смену		Эффективное число электроприемников $n_{эф}$	Коэффициент максимума $K_м$	Максимальная нагрузка		
			одного ЭП (наименьшего – наибольшего) $p_{ном}$, кВт	общая $P_{ном}$, кВт				$p_{см} = к_и p_{ном}$, кВт	$q_{см} = p_{см}$·tgφ, кВАр			$P_м = K_м P_{см}$, кВт	$Q_м = Q_{см}$ при $n_{эф}>10$ $Q_м = 1{,}1 \cdot Q_{см}$ при $n_{эф}\leq 10$, кВАр	$S_м$, кВА
	Приемники группы А:													
1	Станки разные	40	0,9-4	116,6		0,15	0,5/1,73	17,49	30,26					
2	Универсально-фрезерный ст.	2	5,4	10,8		0,14	0,6/1,33	1,51	2,01					
3	Металлорежущий станок	8	3,5	28		0,25	0,5/1,73	7,0	12,11					
4	Поперечно-строгальный ст.	4	4,1	16,4		0,17	0,65/1,17	2,79	3,26					
5	Долбежный станок	2	3,0	6		0,24	0,65/1,17	1,44	1,68					
6	Трансформатор св., ПВ=40%	10	3-24,7	160,2		0,3	0,35/2,68	48,06	128,8					
7	Преобразователь сварочный	4	16	64		0,3	0,55/1,52	19,2	29,18					
	Итого по группе А	**70**	**0,9-24,7**	**402**	**>3**	**0,24**		**97,49**	**207,3**	**30**	**1,38**	**134,54**	**207,3**	
	Приемники группы Б:													
8	Вентилятор	4	22	88		0,65	0,8/0,75	57,2	42,9					
9	Сушильный электр. шкаф	3	6,3	18,9		0,75	0,95/0,33	14,18	4,68					
10	Прессы	8	5,1-9,0	56,4		0,65	0,8/0,75	36,66	27,5					
	Итого по группе Б	**15**	**5,1-22**	**163,3**				**108,04**	**75,08**		**1**	**108,04**	**75,08**	
Итого силовая нагрузка (гр. А и Б)		**85**	**0,9-24,7**	**565,3**				**205,53**	**282,38**			**242,58**	**282,38**	
	Электрическое освещение			14,13		K_c=0,85		12,01				12,01		
Итого силовая и осветительная нагрузки по цеху		**85**	**0,9-24,7**	**579,43**				**217,54**	**282,38**			**254,59**	**282,38**	**308,2**

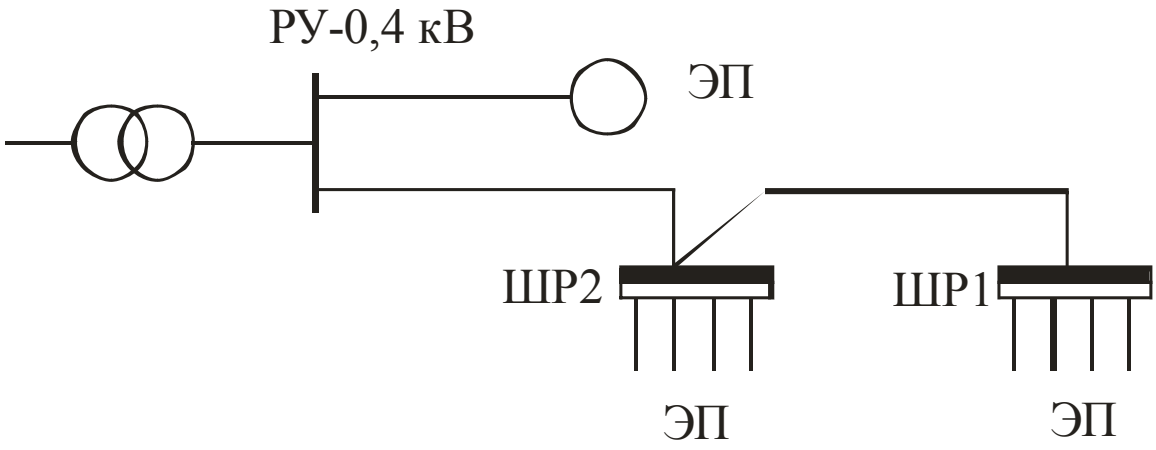


Рис. 1.18. Схема электроснабжения группы ЭП (к примеру 1.33)

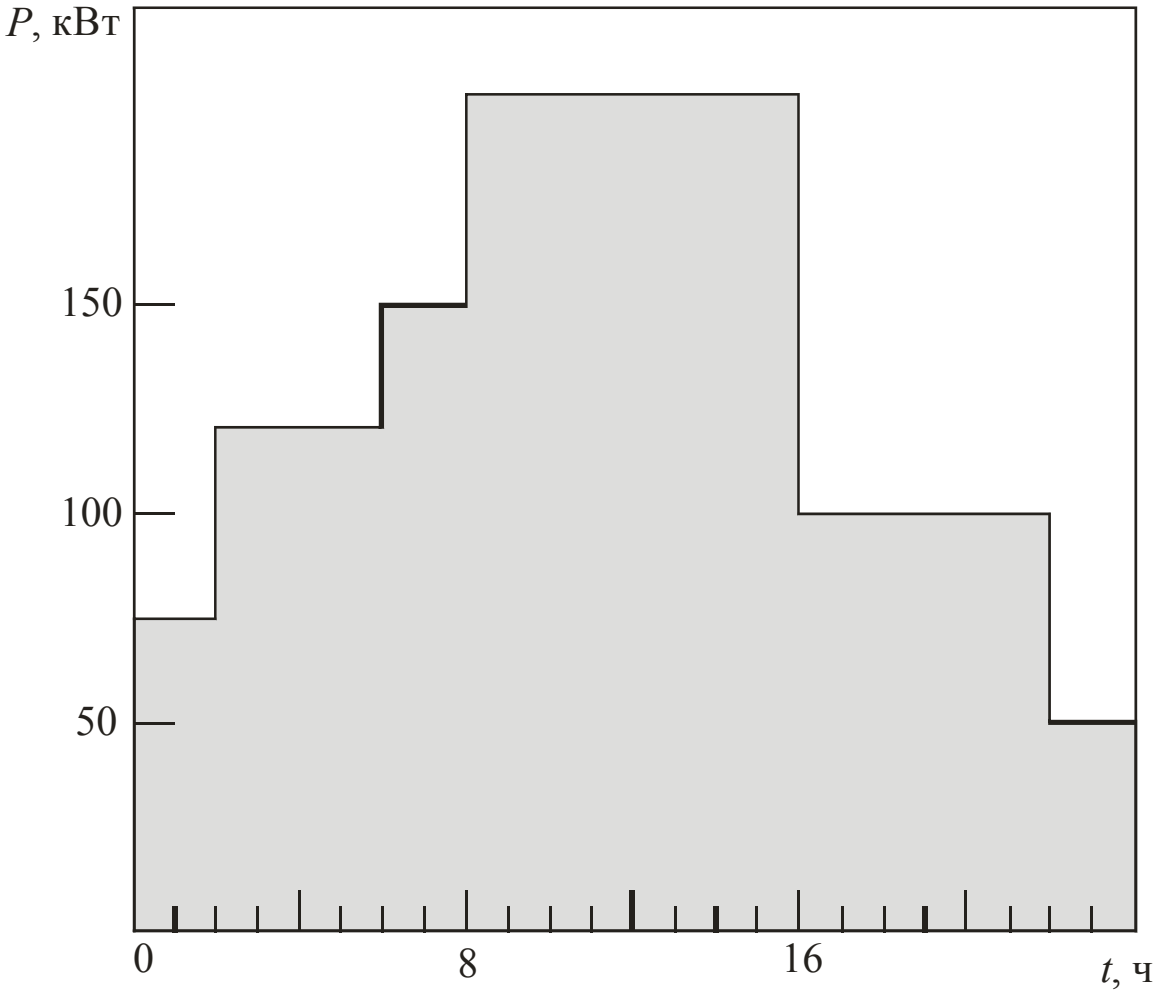


Рис. 1.19. График нагрузки компрессора (к примеру 1.33)

Таблица 1.14.

Сведения об электропиремниках (к примеру 1.33)

ШР1				ШР2			
Наименование электрооборудования	Число и номинальная мощность, кВт	$\kappa_и$	cosφ	Наименование электрооборудования	Число и номинальная мощность, кВт	$\kappa_и$	cosφ
1. Кран трехфазный, ПВ = 25%	1×38	0,06	0,45	1. Компрессор	2×22	0,65	0,80
2. Станок шлифовальный	1×10	0,14	0,60	2. Насос	2×17	0,60	0,70
3. Гидропресс	2×13,5	0,25	0,65	3. Вентилятор	1×4	0,70	0,70
4. Вентилятор	2×5	0,65	0,80	4. Полуавтомат токарный	1×10	0,22	0,65
5. Станок зубодолбежный	1×10	0,14	0,60	5. Ножницы гильотиновые	1×5	0,14	0,60
6. Станок зубофрезерный	1×5	0,14	0,60	6. Печь сопротивления	1×15	0,55	0,95

Решение.

Расчет силовой нагрузки ШР1 и ШР2 приведен в таблице 1.15. При расчет использованы рекомендации таблицы 1.3.

Расчетная активная нагрузка отдельно подключенного к распределительному устройству низкого напряжения электроприемника, для которого известен суточный график, может быть определена через коэффициент загрузки по активной мощности:

$$P_м = \kappa_{загр} \cdot p_{ном}.$$

Для графика, приведенного на рис. 1.19, $\kappa_{загр}$ определяется по выражению:

$$\kappa_{загр} = \frac{p_1 t_1 + p_2 t_2 + ... + p_n t_n}{p_{ном}(t_1 + t_2 + ... + t_n)} = \frac{80 \cdot 2 + 120 \cdot 4 + 150 \cdot 2 + 200 \cdot 8 + 100 \cdot 6 + 50 \cdot 2}{200 \cdot 24} = \frac{3240}{4800} = 0{,}68$$

и показывает степень использования мощности электроприемника за рабочее время, то есть за время включения. В этом соотношении $p_1, p_2, \ldots, p_n$ – мощность каждой из ступеней графика, а $t_1, t_2, \ldots, t_n$ – их продолжительность.

Расчетная активная нагрузка составляет:

$$P_м = \kappa_{загр} \cdot p_{ном} = 0{,}68 \cdot 200 = 136 \text{ кВт}.$$

Расчетная реактивная нагрузка определяется по соотношению:

$$Q_м = P_м \cdot \text{tg}\varphi = 136 \cdot 0{,}75 = 102 \text{ кВАр}.$$

Электрические нагрузки всей схемы даны в таблице 1.15.

Таблица 1.15.

Расчет электрических нагрузок (к примеру 1.33)

№	Наименование узлов питания и групп электроприемников	Количество ЭП (n)	Установленная мощность, приведенная к ПВ=100%		$m = p_{н.\max} / p_{н.\min}$	Коэффициент использования $K_и$, $K_и$	cosφ / tgφ	Средняя нагрузка за наиболее загруженную смену		Эффективное число электроприемников $n_{эф}$	Коэффициент максимума $K_м$	Максимальная нагрузка			Расчетный ток $I_м$, А
			одного ЭП (наименьшего – наибольшего) $p_{ном}$, кВт	общая $P_{ном}$, кВт				$p_{см} = K_и p_{ном}$, кВт	$q_{см} = p_{см}$·tgφ, кВАр			$P_м = K_м P_{см}$, кВт	$Q_м = Q_{см}$ при $n_{эф}>10$ $Q_м = 1{,}1 \cdot Q_{см}$ при $n_{эф} \le 10$, кВАр	$S_м$, кВА	
Распределительный шкаф ШР1															
	ЭП группы А:														
1	Станки разные	3	5-10	25		0,14	0,60/1,33	3,5	4,7						
2	Гидропресс	2	13,5	27		0,25	0,65/1,17	6,8	7,9						
3	Кран трехфазный, ПВ=25%	1	19	19		0,06	0,45/1,98	1,1	2,3						
	ИТОГО по группе А	6	5-19	71	>3	0,16	0,61/1,31	11,4	14,9	5	2,88	32,8	16,4		
	ЭП группы Б:														
4	Вентилятор	2	5	10		0,65	0,80/0,75	6,5	4,9						
	ИТОГО по группе Б	2	5	10		0,65	0,80/0,75	6,5	4,9			10	7,5		
	ИТОГО по ШР1	8	5-19	81		0,22	0,67/1,11	17,9	19,8			42,8	23,9	49	74,5
Распределительный шкаф ШР2															
	ЭП группы А:														
5	Полуавтомат токарный	1	10	10		0,22	0,65/1,17	2,2	2,6						
6	Ножницы гильотиновые	1	5	5		0,14	0,60/1,33	0,7	0,9						

Окончание таблицы 1.15.

Расчет электрических нагрузок (к примеру 1.33)

№	Наименование узлов питания и групп электроприемников	Количество ЭП (n)	Установленная мощность, приведенная к ПВ=100%		$m = p_{н.\,max} / p_{н.\,min}$	Коэффициент использования $к_и$, $K_и$	cosφ / tgφ	Средняя нагрузка за наиболее загруженную смену		Эффективное число электроприемников $n_{эф}$	Коэффициент максимума $K_м$	Максимальная нагрузка			Расчетный ток $I_м$, А
			одного ЭП (наименьшего – наибольшего) $p_{ном}$, кВт	общая $P_{ном}$, кВт				$p_{см} = к_и p_{ном}$, кВт	$q_{см} = p_{см}$·tgφ, кВАр			$P_м = K_м P_{см}$, кВт	$Q_м = Q_{см}$ при $n_{эф}>10$ $Q_м = 1{,}1 \cdot Q_{см}$ при $n_{эф} \le 10$, кВАр	$S_м$, кВА	
7	Печь сопротивления	1	15	15		0,55	0,95/0,33	8,3	2,7						
	ИТОГО по группе А	3	5-15	30	3	0,37	0,87/0,55	11,2	6,2			30	23,3		
	ЭП группы Б:														
8	Компрессор	2	22	44		0,65	0,80/0,75	28,6	21,5						
9	Насос	2	17	34		0,60	0,70/1,0	20,4	20,4						
10	Вентилятор	1	4	4		0,70	0,70/1,0	2,8	2,8						
	ИТОГО по группе Б	5	4-22	82		0,63	0,76/0,86	51,8	44,7		1	51,8	44,7		
	ИТОГО по ШР2	8	4-22	112		0,56	0,78/0,81	63,0	50,9			81,8	68,0	106,4	161,2
	Отдельный электроприемник														
11	Компрессор	1	200	200		$к_{загр}$= 0,68	0,80/0,75	200	150			136	102	170	258,2
	ИТОГО по схеме	17	4-200	393		0,70	0,79/0,79	280,9	220,7			260,6	193,9	324,8	493,5

1.5. Тестовые и расчетные задания по определению электрических нагрузок

1.5.1. Тестовые задания

Инструкция: в заданиях 1-30 вставьте пропущенное.

1. Электроприемником называется устройство, предназначенное для ……

2. Электроприемник или ……, объединенные технологическим процессом и размещающиеся на определенной территории, называются ……

3. Под номинальной активной мощностью двигателя понимается мощность, развиваемая …… при ……

4. Постоянная времени нагрева – это время, в течение которого температура ЭП и проводника питающей сети достигла бы ……, если бы отсутствовала отдача тепла в окружающую среду.

5. Периодический повторно-кратковременный режим с влиянием пусковых процессов – это последовательность идентичных циклов работы, каждый из которых включает время ……, время …….. и время ……, за которое электроприемник не охлаждается до температуры окружающей среды.

6. …… работы – это режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки установки чередуются с периодами холостого хода, при этом превышения температуры частей электрооборудования не достигают установившихся значений.

7. Электрическая нагрузка – это ……. при равномерном потреблении …… в течение времени *t*.

8. Графиком нагрузки называется кривая, показывающая ……

9. По продолжительности графики нагрузки строятся ……. и ……

10. Графики нагрузок строятся и анализируются за базисное время, кратное длительности ……

11. Максимальная нагрузка заданной продолжительности – это наибольшая из всех …… за заданный промежуток времени.

12. Коэффициент формы графика нагрузки характеризует ……

13. Коэффициент использования индивидуального электроприемника характеризует степень использования его активной мощности по сравнению с …… за ……

14. Коэффициент разновременности максимумов нагрузки характеризует смещение …… различных цехов.

15. Коэффициент загрузки – это отношение …… приемником активной мощности за время включения в течение цикла к его ……. мощности.

16. Коэффициент заполнения графика нагрузок по активной мощности – это отношение …… активной мощности к …… за исследуемый период времени.

17. Коэффициентом …… называется отношение продолжительности включения приемника в цикле ко всей продолжительности цикла.

18. Коэффициент ……. по активной мощности – отношение расчетной (в условиях проектирования) или потребляемой (в условиях эксплуатации) активной мощности к номинальной активной мощности группы электроприемников.

19. Коэффициент …… характеризует неравномерность графика во времени.

20. Коэффициент ……. характеризует смещение во времени максимумов нагрузки различных цехов.

21. Под эффективным числом электроприемников понимается такое число …… электроприемников ……., которое обуславливает тот же расчетный максимум, что и группа …… и …… электроприемников.

22. Расчет электрических нагрузок выполняется с целью правильного выбора …… и ……., ……. и …… аппаратов, …… и …… трансформаторов на разных уровнях системы электроснабжения.

23. Коэффициент использования отдельного электроприемника или группы однотипных механизмов определяется ……., а электроприемников группы А рассчитывается по соотношению ……

24. Расчет электрических нагрузок по методу коэффициента формы рекомендуется для групп ЭП с …… нагрузкой, а также может применяться для определения нагрузок на шинах низшего напряжения цеховых трансформаторных подстанций при …… графиках нагрузок.

25. Расчет электрических нагрузок методом удельного расхода электроэнергии на единицу продукции при заданном объеме выпуска продукции за определенный период времени наиболее эффективен для производств с ……

26. Нагрузка отдельных фаз при включении однофазных ЭП на линейное напряжение определяется как …… нагрузок двух плеч, прилегающих к данной фазе. Для определения наиболее загруженной фазы из полученных результатов выбирается ……

27. При неравномерности распределения однофазной нагрузки по фазам …… расчет электрических нагрузок ведется как для трехфазных нагрузок (сумма всех однофазных нагрузок).

28. Пиковая нагрузка – это максимальная нагрузка длительностью …….. По ней проверяют …… напряжения, выбирают …….. защиты, …… предохранителей.

29. Пусковой ток асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей при отсутствии паспортных данных принимается равным …….

30. Для группы электродвигателей, которые могут включаться одновременно, пиковый ток принимается равным ……

Инструкция: в заданиях 31-85 с выбором одного правильного ответа из предложенных обведите кружком номер правильного ответа.

31. Под номинальной активной мощностью электроприемника (кроме двигателя) понимается мощность, потребляемая из сети:
    1) при номинальном напряжении;
    2) при напряжении на 5% выше номинального;
    3) при напряжении на 5% ниже номинального;
    4) за указанный в паспорте интервал времени.

32. Потребителем электроэнергии называется электроприемник или группа электроприемников:
    1) предназначенных для передачи электрической энергии;
    2) объединенных технологическим процессом;
    3) вырабатывающих электрическую энергию;
    4) служащих для трансформации электрической энергии;

    и размещающихся:
    1) непосредственно в помещении цеховой трансформаторной подстанции;
    2) на определенной территории;
    3) вдоль распределительного шинопровода.

33. Номинальные напряжения до 1000 В трехфазных электроприемников переменного тока:
    1) 48, 60, 110, 220, 440 В;
    2) 27, 40, 60, 110, 220 В;
    3) 40, 60, 220, 380, 660 В.

34. Номинальные напряжения до 1000 В однофазных электроприемников переменного тока:
    1) 48, 60, 110, 220, 440 В;
    2) 27, 40, 60, 110, 220 В;
    3) 40, 60, 220, 380, 660 В.

35. Температура частей оборудования при кратковременном режиме работы:
    1) достигает средней установившейся величины;
    2) достигает максимального значения;
    3) достигает установившихся значений;
    4) не достигает установившихся значений,

    а при отключении происходит охлаждение до температуры:

1) указанной в паспорте на электроприемник;
2) задаваемой технологическим процессом;
3) определяемой массой оборудования;
4) превышающей температуру окружающей среды не более чем на 2^{o} С.

36. Продолжительность цикла для электроприемников повторно-кратковременного режима:
1) не превышает 10 мин.;
2) больше 10 мин.;
3) зависит от назначения механизма;
4) определяется номинальной мощностью привода.

37. Практически установившиеся значения температуры частей электроприемников продолжительного режима работы достигаются за:
1) время пуска;
2) время работы на холостом ходу;
3) 2τ;
4) 3τ;

где τ – постоянная времени нагрева.

38. Практически установившейся температурой частей оборудования считается температура, изменение которой при практически неизменной нагрузке сети и температуре окружающей среды в течение одного часа:
1) не превышает 10^{o} С;
2) не превышает 1^{o} С;
3) зависит от номинальной мощности ЭП;
4) определяется постоянной времени нагрева.

39. Период холостого хода характерен для:
1) продолжительного;
2) кратковременного;
3) повторно-кратковременного;
4) перемежающегося

режима работы ЭП.

40. При времени цикла $t_{цикл} > 10$ мин режим работы ЭП считается:
1) продолжительным;
2) кратковременным;
3) повторно-кратковременным;
4) ждущим;
5) перемежающимся.

41. Потери мощности при пуске в повторно-кратковременном режиме работы:
    1) оказывают;
    2) в значительной степени оказывают;
    3) практически не оказывают

влияния на температуру частей ЭП.

42. Стандартный ряд значений продолжительности включения для ЭП с повторно-кратковременным режимом работы:
    1) 15, 25, 35, 45 и 60%;
    2) 15, 25, 40 и 60%;
    3) 15, 25, 60 и 75%;
    4) 15, 25, 50 и 75%.

43. Средняя установившаяся температура частей оборудования за многократное число циклов характерна для:
    1) продолжительного;
    2) кратковременного;
    3) повторно-кратковременного;
    4) перемежающегося

режима работы ЭП.

44. Электроприемниками, работающими в продолжительном режиме, считаются такие, температура частей которых при неизменной нагрузке:
    1) достигает установившихся значений;
    2) не достигает установившихся значений;
    3) не достигает установившихся значений, а при отключении электроприемника уменьшается до температуры окружающей среды;
    4) не достигает установившихся значений, а при отключении уменьшается, но не до температуры окружающей среды.

45. Цикл для электроприемников с повторно-кратковременным режимом работы состоит из:
    1) времени работы и времени отключения;
    2) времени работы, времени торможения и времени отключения;
    3) времени торможения, времени отключения и времени повторного пуска.

46. Рабочий цикл включает время торможения для электроприемников с режимом работы:
    1) продолжительным;
    2) кратковременным;
    3) повторно-кратковременным;
    4) перемежающимся;
    5) перемежающимся с периодически изменяющейся частотой вращения.

47. Относительная продолжительность нагрузки ПН = $t_р/(t_р + t_{хх})$, где $t_р$ – рабочее время механизма, а $t_{хх}$ – время его холостого хода, характерна для:
    1) кратковременного;
    2) повторно-кратковременного;
    3) перемежающегося;
    4) продолжительного

режима работы ЭП.

48. Паспортная мощность $P_{пасп}$ электроприемников повторно-кратковременного режима работы приводится к номинальной мощности продолжительного режима $P_{ном}$ по соотношению:
    1) $P_{ном} = P_{пасп}\sqrt{ПВ\,(\%)}$;
    2) $P_{ном} = P_{пасп}\sqrt{ПВ\,(отн.ед)}$;
    3) $P_{ном} = P_{пасп}/\sqrt{ПВ\,(\%)}$;
    4) $P_{ном} = P_{пасп}/\sqrt{ПВ\,(отн.ед)}$,

где ПВ – паспортная продолжительность включения.

49. Потребление электроэнергии за смену для электроприемника с нерегулярным графиком нагрузки является:
    1) переменной величиной;
    2) постоянной величиной;
    3) постоянной величиной только за время холостого хода;
    4) постоянной величиной только за базисное время.

50. У индивидуальных периодических графиков нагрузок время цикла:
    1) строго постоянно;
    2) постоянно только время работы;
    3) различно время остановок;
    4) постоянно только время остановок.

51. Число часов использования максимума активной нагрузки за год определяется по:
    1) суточному графику реактивной нагрузки;
    2) суточному графику полной нагрузки;
    3) годовому графику активной нагрузки по продолжительности;
    4) годовому графику полной нагрузки по продолжительности;
    5) годовому графику потерь активной мощности.

52. Потребление электроэнергии за смену для электроприемников, имеющих периодический, циклический и нециклический график нагрузок, является:
    1) переменной величиной;
    2) постоянной величиной только за базисное время;
    3) постоянной величиной только за время холостого хода;
    4) постоянной величиной.

53. Коэффициент максимума характеризует превышение максимальной нагрузки $P_м$ над:
    1) среднеквадратичной $P_{срк}$;
    2) средней $P_{ср}$;
    3) установленной $P_{уст}$;
    4) номинальной, приведенной к ПВ = 100%, $P_{ном}$

    за:
    1) календарный месяц;
    2) рабочую неделю;
    3) сутки;
    4) наиболее загруженную смену.

54. Коэффициент использования характеризует степень использования активной мощности приемника (группы приемников) по сравнению с его (их):
    1) средней;
    2) среднеквадратичной;
    3) номинальной;
    4) максимальной

    мощность за:
    1) наиболее загруженную смену;
    2) сутки;
    3) рабочую неделю;
    4) календарный месяц.

55. Коэффициент формы графика нагрузок характеризует:
    1) степень использования мощности приемников по сравнению с их номинальной мощностью;
    2) смещение во время максимумов нагрузки различных цехов;
    3) неравномерность графика во времени;
    4) превышение максимальной нагрузки над средней за наиболее загруженную смену.

56. Коэффициент разновременности максимумов нагрузки характеризует:
    1) превышение максимальной нагрузки над средней за наиболее загруженную смену;
    2) смещение во время максимумов нагрузки различных цехов;
    3) неравномерность графика во времени;
    4) степень использования мощности приемников по сравнению с их номинальной мощностью за максимально загруженную смену.

57. Указать вспомогательные методы определения расчетных нагрузок:
    1) метод упорядоченных диаграмм показателей графиков нагрузок (по средней мощности и коэффициенту максимума);
    2) по установленной мощности и коэффициенту спроса;
    3) по средней мощности и отклонению расчетной нагрузки от средней (статистический метод);
    4) по удельной нагрузке на единицу производственной площади и удельному расходу электроэнергии на единицу продукции при заданном объеме выпуска продукции за определенный период.

58. Группу электроприемников с переменным графиком нагрузки составляют электроприемники, у которых коэффициент использования $к_{исп}$:
    1) $к_{исп} > 0{,}6$;
    2) $к_{исп} < 0{,}6$;
    3) $к_{исп} \geq 0{,}6$;
    4) $к_{исп} = 1$.

59. Эффективное число электроприемников определяется для группы электроприемников с:
    1) длительным режимом работы;
    2) практически постоянным графиком нагрузки;
    3) кратковременным режимом работы;
    4) повторно-кратковременным режимом работы;
    5) переменным графиком нагрузки.

60. При определении электрических нагрузок электроприемники, у которых отсутствуют данные о коэффициенте использования, коэффициенте включения и коэффициенте заполнения суточного графика за наиболее загруженную смену, считаются электроприемниками:
    1) с практически постоянным графиком нагрузки;
    2) с переменным графиком нагрузки;
    3) с повторно-кратковременным режимом работы;
    4) эпизодически работающими;
    5) резервными.

61. Эффективное число электроприемников при расчете электрических нагрузок в сетях до 1000 В вычисляется с целью определения:
    1) коэффициента участия в максимуме;
    2) группового коэффициента использования;
    3) коэффициента загрузки группы электроприемников;
    4) коэффициента максимума.

62. Электроприемники расчетного узла подразделяются на группу А и группу Б с целью:
    1) составления схемы электроснабжения;
    2) снятия графика нагрузки;
    3) определения расчетной нагрузки;
    4) определения числа часов использования максимума нагрузки.

63. Отношение номинальной мощности наибольшего электроприемника в группе к номинальной мощности наименьшего называется:
    1) коэффициентом максимума;
    2) коэффициентом перегрузки группы;
    3) показателем пиковой нагрузки;
    4) показателем силовой сборки в группе.

64. При числе электроприемников в группе четыре и более допускается эффективное число электроприемников $n_{эф}$ принимать равным фактическому, если:
    1) $m = \frac{p_{ном\ min}}{p_{ном\ max}} \le 3,\ K_u \ge 0.2$;
    2) $m = \frac{p_{ном\ max}}{p_{ном\ min}} \le 3$;

3) $m = \dfrac{p_{\text{ном max}}}{p_{\text{ном min}}} > 3$;

4) $m = \dfrac{p_{\text{ном max}}}{p_{\text{ном min}}} > 3,\ K_u \geq 0.2$,

где $p_{\text{ном max}}$, $p_{\text{ном min}}$ – номинальная мощность наибольшего и наименьшего электроприемника в группе;

K_u – групповой коэффициент использования.

65. Максимальная реактивная нагрузка $Q_{\text{м}}$ электроприемников с практически постоянным графиком нагрузки при числе электроприемников в группе четыре и более определяется:

1) $Q_{\text{м}} = Q_{\text{ном}}$;
2) $Q_{\text{м}} = 1{,}1\ Q_{\text{ном}}$;
3) $Q_{\text{м}} = 1{,}1 Q_{\text{см}}$;
4) $Q_{\text{м}} = Q_{\text{см}}$;
5) $Q_{\text{м}} = Q_{\text{см}} + 1{,}1\ Q_{\text{ном}}$,

где $Q_{\text{ном}}$ – номинальная реактивная мощность группы ЭП;

$Q_{\text{см}}$ – средняя реактивная нагрузка группы ЭП за наиболее загруженную смену.

66. При определении эффективного числа электроприемников из рассмотрения исключаются те наименьшие электроприемники группы, суммарная номинальная мощность которых не превышает 5% суммарной номинальной мощности всей группы. Подход справедлив для случая, когда:

1) $m = \dfrac{p_{\text{ном max}}}{p_{\text{ном min}}} \leq 3$;
2) $m = \dfrac{p_{\text{ном min}}}{p_{\text{ном max}}} \leq 3$;
3) $m = \dfrac{p_{\text{ном max}}}{p_{\text{ном min}}} > 3$;
4) $m = \dfrac{p_{\text{ном min}}}{p_{\text{ном max}}} > 3$;

где $p_{\text{ном max}}$, $p_{\text{ном min}}$ – номинальная мощность наибольшего и наименьшего электроприемника в группе.

67. Коэффициент максимума для группы электроприемников с переменным графиком нагрузки определяется по таблице или графикам с учетом:

1) коэффициента спроса и показателя силовой сборки в группе;
2) коэффициента спроса и числа электроприемников длительного режима работы;
3) коэффициента использования группы электроприемников и показателя силовой сборки в группе;

4) коэффициента использования группы электроприемников и фактического числа электроприемников;
5) коэффициента использования группы электроприемников и эффективного числа электроприемников.

68. Точное значение эффективного числа электроприемников для группы трехфазных электроприемников определяется по выражению:

1) $n_{эф} = \frac{2}{3} \frac{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\ i}}{p_{ном\ max}}$;

2) $n_{эф} = \frac{2\sum_{i=1}^{n} p_{ном\ i}}{p_{ном\ max}}$;

3) $n_{эф} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{ном\ i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} p^2_{ном\ i}}$;

4) $n_{эф} = \frac{\sum_{i=1}^{n} p_{ном\ i}}{\sum_{i=1}^{n} p^2_{ном\ i}}$;

5) $n_{эф} = \frac{\sum_{i=1}^{n} p^2_{ном\ i}}{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{ном\ i}\right)^2}$;

69. К электроприемникам с практически постоянным графиком нагрузки относятся такие, у которых:
1) коэффициент использования $к_и \geq 0.6$, коэффициент включения $к_{вкл} = 1$, коэффициент заполнения суточного графика за наиболее загруженную смену $к_{запол} \geq 0.9$;
2) $к_и < 0.6$, $к_{вкл} = 1$, $к_{запол} \geq 0.9$;
3) $к_и \geq 0.6$, $к_{вкл} < 1$, $к_{запол} \geq 0.9$;
4) $к_и \geq 0.6$, $к_{вкл} = 1$, $к_{запол} < 0.9$.

70. Определение эффективного числа электроприемников упрощенным способом допускается выполнять по соотношению

$n_{эф} = \frac{2\sum_{i=1}^{n} p_{ном\ i}}{p_{ном\ max}}$, если:

1) $m \leq 3$, $K_и \geq 0.2$;
2) $m \leq 3$, $K_и < 0.2$;
3) $m > 3$, $K_и \geq 0.2$;
4) $m > 3$, $K_и < 0.2$,

где $p_{\text{ном i}}$ – номинальная мощность *i*-го электроприемника;

$p_{\text{ном max}}$ – номинальная мощность наибольшего электроприемника в группе;

m – отношение номинальной мощности наибольшего электроприемника в группе к номинальной мощности наименьшего;

$К_{и}$ – групповой коэффициент использования.

71. Максимальная реактивная нагрузка $Q_{\text{м}}$ электроприемников с переменным графиком нагрузки при $n_{\text{эф}} > 10$ определяется:

1) $Q_{\text{м}} = Q_{\text{ном}}$;
2) $Q_{\text{м}} = Q_{\text{см}}$;
3) $Q_{\text{м}} = 1{,}1 \cdot Q_{\text{ном}}$;
4) $Q_{\text{м}} = 1{,}1 \cdot Q_{\text{см}}$;
5) $Q_{\text{м}} = Q_{\text{см}} + Q_{\text{ном}}$,

где $Q_{\text{ном}}$ – номинальная реактивная мощность группы ЭП;

$Q_{\text{см}}$ – средняя реактивная нагрузка группы ЭП за наиболее загруженную смену.

72. Реактивные нагрузки ЭП с опережающим током принимаются:

1) со знаком «минус»;
2) со знаком «плюс»;
3) с учетом режима работы.

73. Коэффициент максимума активной нагрузки может быть определен по соотношению:

1) $K_{м} = 1 - \dfrac{1{,}5}{\sqrt{n_{эф}}} \sqrt{\dfrac{1 - K_{и}}{K_{и}}}$;

2) $K_{м} = 1 + \dfrac{1{,}5}{\sqrt{n_{эф}}} \sqrt{\dfrac{K_{и}}{1\text{-}K_{и}}}$;

3) $K_{м} = 1 + \dfrac{\sqrt{n_{эф}}}{1{,}5} \sqrt{\dfrac{1 - K_{и}}{K_{и}}}$

4) $K_{м} = 1 + \dfrac{1{,}5}{\sqrt{n_{эф}}} \sqrt{\dfrac{1 - K_{и}}{K_{и}}}$,

где $n_{\text{эф}}$– эффективное число электроприемников;

$K_{и}$ – коэффициент использования группы электроприемников.

74. Эффективное число электроприемников при $m = \frac{p_{\text{ном max}}}{p_{\text{ном min}}} > 3$ ($p_{\text{ном max}}$, $p_{\text{ном min}}$ – номинальная мощность наибольшего и наименьшего электроприемника в группе) и групповом коэффициенте использования $K_u < 0.2$ определяется:

1) по соотношению $n_{\text{эф}} = \frac{2\sum_{i=1}^{n} p_{\text{ном } i}}{p_{\text{ном max}}}$;

2) по соотношению $n_{\text{эф}} = \frac{2}{3}\frac{\sum_{i=1}^{n} p_{\text{ном } i}}{p_{\text{ном max}}}$;

3) по соотношению $n_{\text{эф}} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{\text{ном } i}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} p_{\text{ном } i}}$;

4) по соотношению $n_{\text{эф}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} p^2_{\text{ном } i}}{\left(\sum_{i=1}^{n} p_{\text{ном } i}\right)^2}$;

5) с помощью кривых или таблицы.

В приведенных соотношениях: $p_{\text{ном i}}$ – номинальная мощность i-го электроприемника; $p_{\text{ном max}}$ – номинальная мощность наибольшего электроприемника в группе.

75. Максимальная реактивная нагрузка $Q_{\text{м}}$ электроприемников с переменным графиком нагрузки при $n_{\text{эф}} \le 10$ определяется:

1) $Q_{\text{м}} = Q_{\text{ном}}$;
2) $Q_{\text{м}} = Q_{\text{см}}$;
3) $Q_{\text{м}} = 1{,}1 \cdot Q_{\text{ном}}$;
4) $Q_{\text{м}} = 1{,}1 \cdot Q_{\text{см}}$;
5) $Q_{\text{м}} = Q_{\text{см}} + Q_{\text{ном}}$,

где $Q_{\text{ном}}$ – номинальная реактивная мощность группы ЭП;
$Q_{\text{см}}$ – средняя реактивная нагрузка группы ЭП за наиболее загруженную смену.

76. Максимальная активная нагрузка $P_{\text{м}}$ электроприемников с практически постоянным графиком нагрузки при числе электроприемников в группе четыре и более определяется:

1) $P_{\text{м}} = P_{\text{ном}}$;

2) $P_м = P_{см}$;
3) $P_м = P_{ном} + P_{см}$;
4) $P_м = 0{,}75P_{см}$;
5) $P_м = 1{,}1, P_{см}$,

где $P_{ном}$ – номинальная активная мощность группы ЭП;
$P_{см}$ – средняя активная нагрузка группы ЭП за наиболее загруженную смену.

77. Максимальная активная нагрузка $P_м$ электроприемников с переменным графиком нагрузки при их числе в группе более трех, а $n_{эф} < 4$ рассчитывается с помощью коэффициента:
1) спроса по активной мощности;
2) использования группы ЭП;
3) максимума активной нагрузки;
4) заполнения суточного графика;
5) загрузки.

78. Максимальная активная нагрузка $P_м$ при числе электроприемников в группе три и менее определяется:
1) $P_м = \sum_{i=1}^{\leq 3} p_{ном\,i} \cdot \operatorname{tg} \varphi_i$;
2) $P_м = \sum_{i=1}^{\leq 3} p_{ном\,i}$;
3) $P_м = \sum_{i=1}^{\leq 3} p_{ном\,i} / \cos \varphi_i$;
4) $P_м = p_{ном\,max}$,

где $p_{ном\,i}$ – номинальная активная мощность i-го ЭП;
$p_{ном\,max}$ – номинальная активная мощность наибольшего электроприемника в группе;
$\cos \varphi_i$, $\operatorname{tg} \varphi_i$ – коэффициент мощности i-го электроприемника, тангенс угла φ_i.

79. Максимальная реактивная нагрузка $Q_м$ при числе электроприемников в группе три и менее рассчитывается по соотношению:
1) $Q_м = \sum_{i=1}^{\leq 3} p_{ном\,i} \cdot \operatorname{tg} \varphi_i$;
2) $Q_м = \sum_{i=1}^{\leq 3} p_{ном\,i}$;
3) $Q_м = \sum_{i=1}^{\leq 3} p_{ном\,i} / \cos \varphi_i$;
4) $Q_м = p_{ном\,max}$,

где $p_{ном\,i}$ – номинальная активная мощность i-го ЭП;
$p_{ном\,max}$ – номинальная активная мощность наибольшего электроприемника в группе;
$\cos \varphi_i$, $\operatorname{tg} \varphi_i$ – коэффициент мощности i-го электроприемника, тангенс угла φ_i.

80. Расчетная осветительная нагрузка определяется по методу:
    1) упорядоченных диаграмм;
    2) коэффициента формы;
    3) коэффициента спроса.

81. Нагрузка каждой фазы при включении однофазных ЭП на фазное напряжение определяется:
    1) суммой всех подключенных на эту фазу нагрузок;
    2) средним значением всех подключенных на эту фазу нагрузок;
    3) мощностью наибольшего электроприемника;
    4) средним значением между мощностью наибольшего и наименьшего электроприемников.

82. Эффективное число группы электроприемников однофазного тока определяется по формуле:

1) $n_{эф} = \dfrac{2\sum\limits_{i=1}^{n} p_{ном\ i.о}}{p_{ном\ о.\ max}}$;

2) $n_{эф} = \dfrac{3}{2}\ \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n} p_{ном\ i.о}}{p_{ном\ о.\ max}}$;

3) $n_{эф} = \dfrac{1}{3}\ \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n} p_{ном\ i.о}}{p_{ном\ о.\ max}}$;

4) $n_{эф} = \dfrac{3\sum\limits_{i=1}^{n} p_{ном\ i.о}}{p_{ном\ о.\ max}}$;

5) $n_{эф} = \dfrac{2}{3}\ \dfrac{\sum\limits_{i=1}^{n} p_{ном\ i.о}}{p_{ном\ о.\ max}}$,

где $\sum\limits_{i=1}^{n} p_{ном\ i.о}$ – сумма номинальных мощностей однофазных ЭП расчетного узла;

$p_{ном\ о.\ max}$ – номинальная мощность наибольшего однофазного ЭП.

83. Расчетный максимальный ток узла, для которого выполнен расчет электрических нагрузок, определяется по формуле:

1) $I_м = \dfrac{P_м}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}$;

2) $I_м = \dfrac{Q_м}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}$;

3) $I_м = \dfrac{S_м}{\sqrt{3} \cdot U_{ном}}$,

где $P_м$, $Q_м$, $S_м$ – максимальная активная, реактивная и полная нагрузка от трехфазных силовых электроприемников;
$U_{ном}$ – номинальное напряжение.

84. Пиковый ток группы электроприемников, работающих при отстающем токе, определяется по выражению:

1) $I_{пик} = (5\text{-}7) \cdot I_{ном\ max}$;
2) $I_{пик} = I_{пуск\ max} + (I_м - к_и \cdot I_{ном\ max})$;
3) $I_{пик} = I_{пуск\ max} + (I_м + к_и \cdot I_{ном\ max})$;
4) $I_{пик} = I_{пуск\ max} + (I_м + I_{ном\ max})$,

где $I_{пуск\ max}$ – наибольший из пусковых токов двигателей в группе по паспортным данным; $I_{ном\ max}$ – номинальный (приведенный к продолжительности включения ПВ = 100%) ток двигателя с наибольшим пусковым током; $к_и$ – коэффициент использования электроприемника, двигатель которого имеет наибольший пусковой ток; $I_м$ – расчетный ток нагрузки всей группы электроприемников.

85. За пиковый ток группы из двух-пяти электроприемников принимается:

1) $I_{пик} = I_{пуск\ max} + \sum_{i=1}^{n-1} I_{ном\ i}$;
2) $I_{пик} = I_{пуск\ max} - \sum_{i=1}^{n-1} I_{ном\ i}$;
3) $I_{пик} = 2 \cdot I_{пуск\ max} - \sum_{i=1}^{n-1} I_{ном\ i}$;
4) $I_{пик} = I_{пуск\ max} + 2\sum_{i=1}^{n-1} I_{ном\ i}$.

В приведенных соотношениях: $\sum_{i=1}^{n-1} I_{ном\ i}$ – суммарный номинальный ток группы электроприемников без учета номинального тока электроприемника, имеющего наибольший пусковой ток ($I_{пуск\ max}$).

Инструкция: в заданиях 86-96 выберите все верные варианты ответов **да** или **нет** и впишите в графу **ответ**.

86. Основными параметрами приемников электроэнергии являются:

	ответ
1) вид нейтрали	да/нет

2) номинальная мощность, напряжение, род тока и его частота — да/нет
3) режим работы — да/нет
4) характер среды помещения — да/нет
5) необходимая степень бесперебойности электроснабжения — да/нет
6) конструктивное выполнение электрических сетей — да/нет

87. По режиму работы ЭП подразделяются на:

ответ

1) однофазные и трехфазные — да/нет
2) постоянного и переменного тока — да/нет
3) ЭП с продолжительным режимом — да/нет
4) ЭП с кратковременным режимом — да/нет
5) резервного режима — да/нет
6) циклического режима — да/нет
7) эпизодически работающие — да/нет
8) ЭП с повторно-кратковременным режимом — да/нет

88. Цикл работы электроприемников с периодическим повторно-кратковременным режимом с влиянием пусковых процессов состоит из времени:

ответ

1) холостого хода — да/нет
2) пуска — да/нет
3) торможения — да/нет
4) ускорения — да/нет
5) работы при постоянной нагрузке — да/нет
6) паузы — да/нет

89. Паспортная мощность ($P_{\text{пасп}}$ или $S_{\text{пасп}}$) электроприемников повторно-кратковременного режима работы приводится к номинальной мощности продолжительного режима $P_{\text{ном}}$ по соотношению:

ответ

1) $P_{\text{ном}} = P_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}\,(\text{отн.ед.})}$ — да/нет
2) $P_{\text{ном}} = P_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}\,(\%)}$ — да/нет
3) $P_{\text{ном}} = S_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}\,(\text{отн.ед.})} / \cos\varphi$ — да/нет

4) $P_{\text{ном}} = S_{\text{пасп}} \sqrt{\text{ПВ}\,(\%)} / \cos\varphi$ да/нет

5) $P_{\text{ном}} = S_{\text{пасп}} \cdot \cos\varphi \sqrt{\text{ПВ}\,(\%)}$ да/нет

6) $P_{\text{ном}} = S_{\text{пасп}} \cdot \cos\varphi \sqrt{\text{ПВ}\,(\text{отн.ед.})}$, да/нет

где cos φ и ПВ – паспортные значения коэффициента мощности и продолжительности включения.

90. С точки зрения регулярности нагрузок их индивидуальные графики подразделяются на:

ответ

1) периодические да/нет
2) почти периодические да/нет
3) циклические да/нет
4) нециклические да/нет
5) регулярные да/нет
6) нерегулярные да/нет
7) почти регулярные да/нет

91. По степени регулярности групповые графики нагрузок подразделяются на:

ответ

1) периодические да/нет
2) почти периодические да/нет
3) циклические да/нет
4) нециклические да/нет
5) регулярные да/нет
6) нерегулярные да/нет
7) почти регулярные да/нет

92. К основным относятся методы определения расчетных нагрузок по:

ответ

1) удельному расходу электроэнергии на единицу продукции при заданном объеме выпуска продукции за определенный период да/нет
2) средней мощности и коэффициенту формы графика нагрузок да/нет
3) средней мощности и коэффициенту максимума да/нет
4) удельной нагрузке на единицу производственной площади да/нет

5) установленной мощности и коэффициенту спроса да/нет
6) средней мощности и отклонению расчетной нагрузки от средней (статистический метод) да/нет

93. Исходными данными для расчета электрических нагрузок методом упорядоченных диаграмм являются:

ответ

1) план цеха с расположением электроприемников да/нет
2) электрическая схема цеха (производства) да/нет
3) количество электроприемников и их установленные мощности да/нет
4) коэффициент включения каждого электроприемника да/нет
5) коэффициенты мощности и использования каждого электроприемника да/нет
6) годовое число часов работы каждого электроприемника да/нет
7) категория электроприемников по условиям надежности электроснабжения да/нет
8) характер окружающей среды цеха (производства) да/нет

94. Электрические нагрузки методом упорядоченных диаграмм рассчитываются с помощью коэффициента:

ответ

1) использования отдельных электроприемников да/нет
2) мощности отдельных электроприемников да/нет
3) спроса по активной мощности да/нет
4) использования группы электроприемников да/нет
5) максимума активной нагрузки да/нет
6) разновременности максимумов нагрузки да/нет
7) формы графика нагрузки да/нет

95. Эффективное число электроприемников $n_{эф}$ принимается равным фактическому $n_{факт}$, если:

ответ

1) показатель силовой сборки в группе $m < 3$ да/нет

2) $m > 3$ да/нет
3) $m = 3$ да/нет
4) при определении $n_{эф}$ любым способом окажется $n_{эф} > n_{факт}$ да/нет
5) $n_{эф} < n_{факт}$ да/нет
6) $n_{эф} = n_{факт}$ да/нет

96. Определение расчетной нагрузки по удельной нагрузке на единицу производственной площади применяется для производств с:

ответ

1) большой динамичностью технологического процесса да/нет
2) резкопеременной нагрузкой да/нет
3) непрерывным технологическим процессом да/нет
4) циклическим графиком нагрузок да/нет
5) относительно равномерно распределенной по производственной площади нагрузкой да/нет

Инструкция: в заданиях 97–103 в строке **ответ** запишите букву из второго списка, которая соответствует цифре из первого списка.

97. Установите соответствие между названием коэффициентов, характеризующих графики нагрузок, и приведенными соотношениями:

1) коэффициент максимума;
2) коэффициент использования;
3) коэффициент загрузки,

А : $P_{ср}/P_{ном}$
Б : $P/P_{ном}$
В : $P_{расч}/P_{ср}$
Г : $P_{ном}/P_{ср}$
Д : $P_{ср}/ P_{расч}$

где P, $P_{ср}$, $P_{ном}$, $P_{расч}$ – фактически потребленная, средняя, номинальная и расчетная активные мощности.

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

98. Установите соответствие между названием коэффициентов, характеризующих графики электрических нагрузок, и приведенными соотношениями:

1) коэффициент спроса по активной мощности;
2) коэффициент формы графика нагрузок;
3) коэффициент включения,

А : $p_{ср}/p_{ном}$
Б : $P_{расч}/P_{ном}$
В : $i_{срк}/i_{ср}$
Г : $T_{ц}/t_{вкл}$
Д : $t_{вкл}/T_{ц}$
Е : $i_{ср}/i_{срк}$

где $p_{ср}$, $p_{ном}$ – средняя и номинальная активная мощность электроприемника;

$P_{расч}$, $P_{ном}$ – расчетная и номинальная активная мощность группы электроприемников;

$i_{ср}$, $i_{срк}$ – средний и среднеквадратичный ток электроприемника (или группы) за определенный период времени;

$t_{вкл}$, $T_{ц}$ – продолжительность включения приемника в цикле и длительность цикла.

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

99. Максимальные расчетные нагрузки группы электроприемников с переменным графиком нагрузки методом упорядоченных диаграмм определяются из выражений:

1) активная;
2) реактивная;
3) полная,

А : $\sqrt{P_{м}^2 + Q_{м}^2}$

Б : $\sqrt{P_{м}^2 + P_{м} \cdot Q_{м} + Q_{м}^2}$

В : $(1{,}0 - 1{,}1) \cdot Q_{см}$

Г : $K_{м} \cdot P_{ном}$

Д : $K_{м} \cdot P_{см}$

Е : $(1{,}0 - 1{,}1) \cdot Q_{ном}$

где $P_{м}$, $Q_{м}$ – максимальные активная и реактивная нагрузки;

$P_{см}$, $Q_{см}$ – средние активная и реактивная нагрузки за наиболее загруженную смену;

$P_{ном}$, $Q_{ном}$ – номинальные активная и реактивная мощности группы ЭП;

$K_{м}$ – коэффициент максимума активной нагрузки.

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

100. Максимальные нагрузки при наличии в расчетном узле электроприемников с переменным и практически постоянным графиком нагрузки методом упорядоченных диаграмм определяются:

1) активная;
2) реактивная;
3) полная,

А : $1{,}1 \cdot (P_{см1} + P_{см2})$

Б : $K_{м} \cdot P_{см1} + P_{см2}$

В : $Q_{м1} + Q_{см2}$

Г : $Q_{м1} + 1{,}1 Q_{см2}$

Д : $\sqrt{P_{м}^2 + P_{м} \cdot Q_{м} + Q_{м}^2}$

Е : $\sqrt{P_{м}^2 + Q_{м}^2}$

где $P_м$, $Q_м$ – максимальные активная и реактивная нагрузки узла;

$P_{см1}$, $P_{см2}$ – средняя активная нагрузка электроприемников с переменным и практически постоянным графиком нагрузки соответственно;

$Q_{м1}$ – максимальная реактивная нагрузка электроприемников с переменным графиком нагрузки;

$Q_{см2}$ – средняя реактивная нагрузка электроприемников с практически постоянным графиком нагрузки;

$K_м$ – коэффициент максимума активной нагрузки электроприемников с переменным графиком нагрузки.

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

101. Общезаводская нагрузка методом коэффициента спроса определяется по соотношениям:

1) активная;

2) реактивная;

3) полная,

А: $\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} P_{\text{расч}\,i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} Q_{\text{расч}\,i}\right)^2}$

Б: $К_{\text{р.м}} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} P_{\text{расч}\,i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} Q_{\text{расч}\,i}\right)^2}$

В: $\sum_{i=1}^{n} K_{\text{с i}} \cdot P_{\text{ном}\,i}$

Г: $\sum_{i=1}^{n} K_{\text{с i}} \cdot P_{\text{см}\,i}$

Д: $\sum_{i=1}^{n} P_{\text{расч}\,i} \cdot \text{tg}\,\varphi_i$

Е: $\sum_{i=1}^{n} K_{\text{с i}} \cdot P_{\text{см}\,i} \cdot \text{tg}\,\varphi_i$

где $P_{\text{ном}\,i}$, $P_{\text{см}\,i}$ – номинальная и средняя нагрузка i-го цеха;

$\sum_{i=1}^{n} P_{\text{расч}\,i}$, $\sum_{i=1}^{n} Q_{\text{расч}\,i}$ – сумма расчетных активных и реактивных нагрузок отдельных цехов;

$K_{\text{с}\,i}$, $K_{\text{р.м}}$ – коэффициент спроса по активной мощности i-го цеха и коэффициент разновременности максимумов нагрузки отдельных цехов.

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 – .

102. Условная трехфазная номинальная мощность $P_{\text{усл}}^{(3)}$ однофазных электроприемников при их числе до трех и неравномерности распределения по фазам выше 15% определяется:

1) при включении ЭП на фазное напряжение;
2) при включении одного ЭП на линейное напряжение;
3) при включении двух ЭП на линейное напряжение;
4) при включении трех ЭП на линейное напряжение;

А: $3 \cdot P_{\text{ф.нб}}^{(1)}$
Б: $\sqrt{3} \cdot P_{\text{ф.нб}}^{(1)}$
В: $P_{\text{ф.нб}}^{(1)}$
Г: $2 \cdot P_{\text{ф.нб}}^{(1)}$
Д: $P_{\text{ф.нб}}^{(1)} + 3 \cdot P_{\text{ф.нм}}^{(1)}$
Е: $\sqrt{2} \cdot P_{\text{ф.нб}}^{(1)}$

где $P_{\text{ф.нб}}^{(1)}$, $P_{\text{ф.нм}}^{(1)}$ – мощность наиболее и наименее загруженной фазы.

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 ; 4 – .

103. В качестве наибольшего пикового тока принимается для:

1) одного двигателя;
2) одного печного или сварочного трансформатора;
3) группы электрических печей сопротивления;
4) группы одновременно включающихся двигателей.

А: расчетный ток $I_{\text{расч}}$
Б: пиковый ток по паспортным данным, а при их отсутствии – не менее трехкратного номинального (без приведение к ПВ = 100%)
В: пусковой ток $I_{\text{пуск}}$
Г: сумма пусковых токов
Д: (5-7) $I_{\text{расч}}$
Е: номинальный ток

Ответ: 1 – ; 2 – ; 3 ; 4 – .

Инструкция: в заданиях 104–105 в строке **правильная последовательность** запишите цифры, соответствующие очередности выполнения расчета.

104. Установите правильную последовательность определения эффективного числа электроприемников при $m = p_{\max}/p_{\min} > 3$ и $K_u < 0{,}2$ ($p_{\max}$, $p_{\min}$ – наибольшая и наименьшая номинальная мощность электроприемников в группе, K_u – коэффициент использования группы электроприемников):

1) выбираются наиболее крупные электроприемники, номинальная мощность которых равна или больше половины мощности наибольшего электроприемника группы;
2) находятся значения $n_* = n_1 / n$ и $P_* = P_{ном1} / P_{ном}$;
3) выбирается наибольший по номинальной мощности электроприемник рассматриваемой группы;
4) определяется число n_1 и суммарная номинальная мощность $P_{ном1}$ наибольших электроприемников группы, число электроприемников в группе n и их суммарная номинальная мощность $P_{ном}$;
5) по полученным значениям n_* и P_* по кривым или таблице (справочник) определяется величина $n_{эф*}$, а затем из выражения $n_{эф*} = n_{эф} / n$ находится $n_{эф} = n_{эф*} \cdot n$.

Правильная последовательность:

105. Определить правильную последовательность расчета пикового тока линии, запитывающей узел с большим количеством электроприемников с переменным графиком нагрузки:
1) рассчитываются групповой коэффициент использования и эффективное число электроприемников;
2) определяются установленная мощность и средняя нагрузка расчетного узла;
3) определяется коэффициент максимума;
4) определяются максимальный расчетный ток линии, номинальный и пусковой ток наибольшего электроприемника группы;
5) вычисляются активная, реактивная и полная максимальные нагрузки узла;
6) рассчитывается пиковый ток линии.

Правильная последовательность:

1.5.2. Расчетные задания

При выполнении заданий, кроме изложенного материала, следует руководствоваться соответствующими параграфами учебников [6-9], пособием к курсовому проекту [4, 5] и монографий [10], где приведены примеры расчета нагрузок разными методами. Значения коэффициентов спроса, использования и мощности можно определить по [1, 3-5].

1. По графикам нагрева электроприемников (θ), постоянно отдаваемой мощности (P) и мощности потерь (ΔP) в единицу времени (рис. 1.20) определить их режимы работы.

2. Определить относительную продолжительность нагрузки электроприемника, график потерь мощности которого приведен на рис. 1.20 г.

3. Для электроприемника с повторно-кратковременным режимом работы, график которого имеется на рис. 1.20, определить его продолжительность включения.

4. Доказать, что для электроприемника, график работы которого приведен на рис. 1.21, средняя продолжительность цикла за базисное время может быть определена по соотношению:

$$t_{ц\,ср} = t_p + \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{oi}}{n},$$

где n – число циклов за базисное время;

t_{oi} – время остановки внутри цикла;

t_p – время работы.

5. Установить тип графика на рис. 1.21 с точки зрения регулярности нагрузок.

6. Определить взаимосвязь между временем включения и временем остановки для ЭП повторно-кратковременного режима работы с паспортными значениями продолжительности включения 40 и 60%.

7. Построить график нагрузки для электроприемника повторно-кратковременного режима работы, паспортная мощность которого 100 кВт, ПВ = 25%, а время цикла 8 мин.

8. Асинхронный двигатель номинальной мощностью 100 кВт работает в кратковременном режиме. При этом за 5 минут работы потребляется 10 кВт. Определить постоянную нагрева, если двигатель будет переведен в продолжительный режим работы.

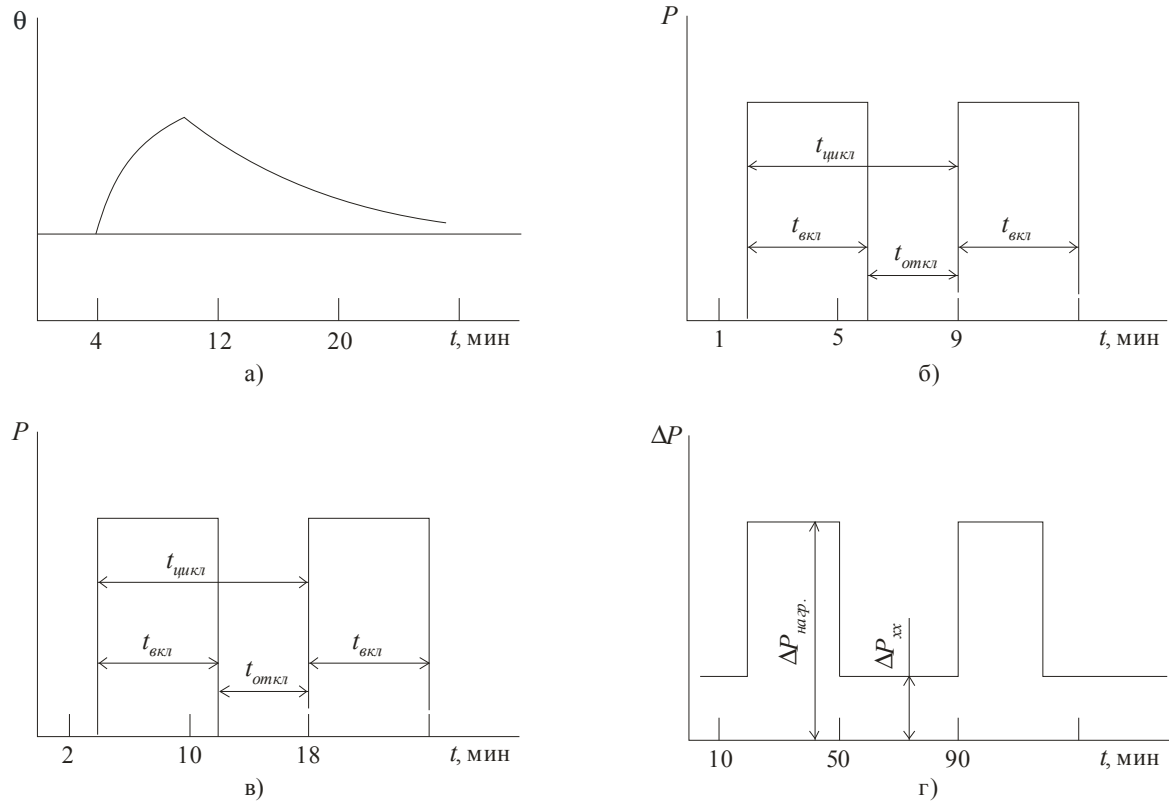


Рис. 1.20. Графики работы электроприемников (к заданиям 1-3)

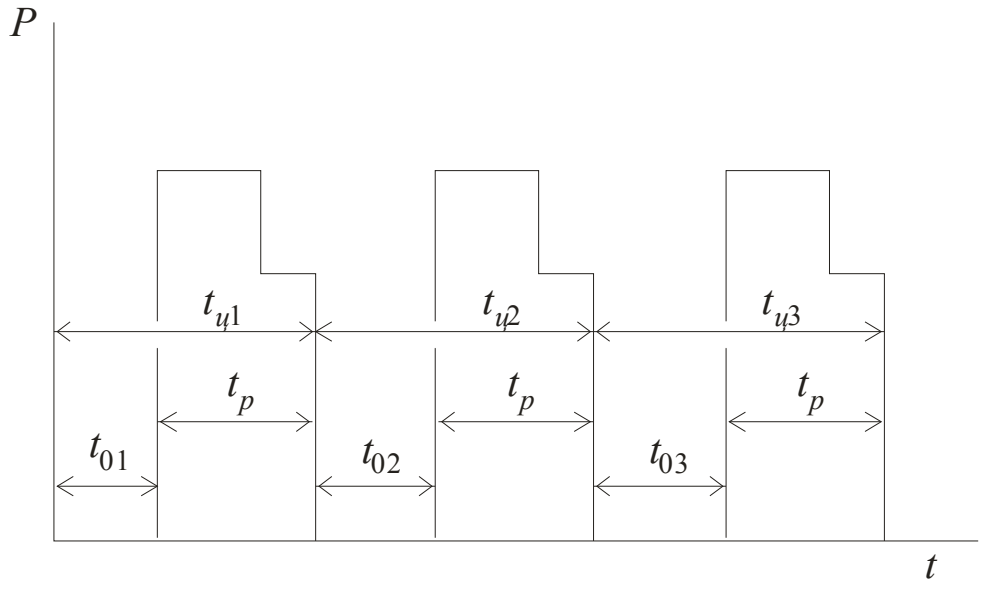


Рис. 1.21. Индивидуальный график работы электроприемника

9. На рис. 1.22 даны графики работы асинхронного двигателя в продолжительном режиме при $к_{загр.} = 1$. Определить потребленную им мощность за 5 мин работы, если этот двигатель будет использован в кратковременном режиме.

10. На рис. 1.23 дан график потребления активной мощности электроприемником, работающим в разные смены. Охарактеризовать тип графика с точки зрения регулярности нагрузки.

11. Число часов использования максимальной нагрузки $T_{\max}$ – отношение расхода электроэнергии за соответствующее время к величине максимума нагрузки. Показать, что для любого периода времени T:

$$T_{\max} = K_{зап} \cdot T \text{ или } T_{\max} = \frac{T}{K_м},$$

где $K_{зап}$ – коэффициент заполнения графика нагрузки;

$K_м$ – коэффициент максимума.

12. Доказать, что по показаниям счетчиков активной электроэнергии W_a коэффициент формы графика нагрузки может быть определен по формуле:

$$K_ф = \sqrt{m}\,\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}(\Delta W_{ai})^2}}{W_a},$$

где m – число интервалов времени t, на которое разбит весь график нагрузки;

ΔW_{ai} – потребление электроэнергии за i-й интервал.

13. Показать, что при постоянном (неизмененном) технологическом процессе производства и постоянном объеме выпускаемой продукции величина коэффициента формы $K_ф$ практически постоянна и не меняется в зависимости от изменения графика нагрузок за рассматриваемый период времени (рис. 1.24) при условии стабильности потребления электроэнергии, то есть $W_{a1} = W_{a2} = \text{const}$.

14. Показать, что коэффициент спроса по активной мощности $K_{с,\,а}$ определяется через коэффициент использования $K_{и,\,а}$ и коэффициент максимума $K_{м,\,а}$ по соотношению:

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

а коэффициент заполнения графика активной нагрузки связан с коэффициентом максимума соотношением:

$$K_{зап} = K_{м,\,а}^{-1}.$$

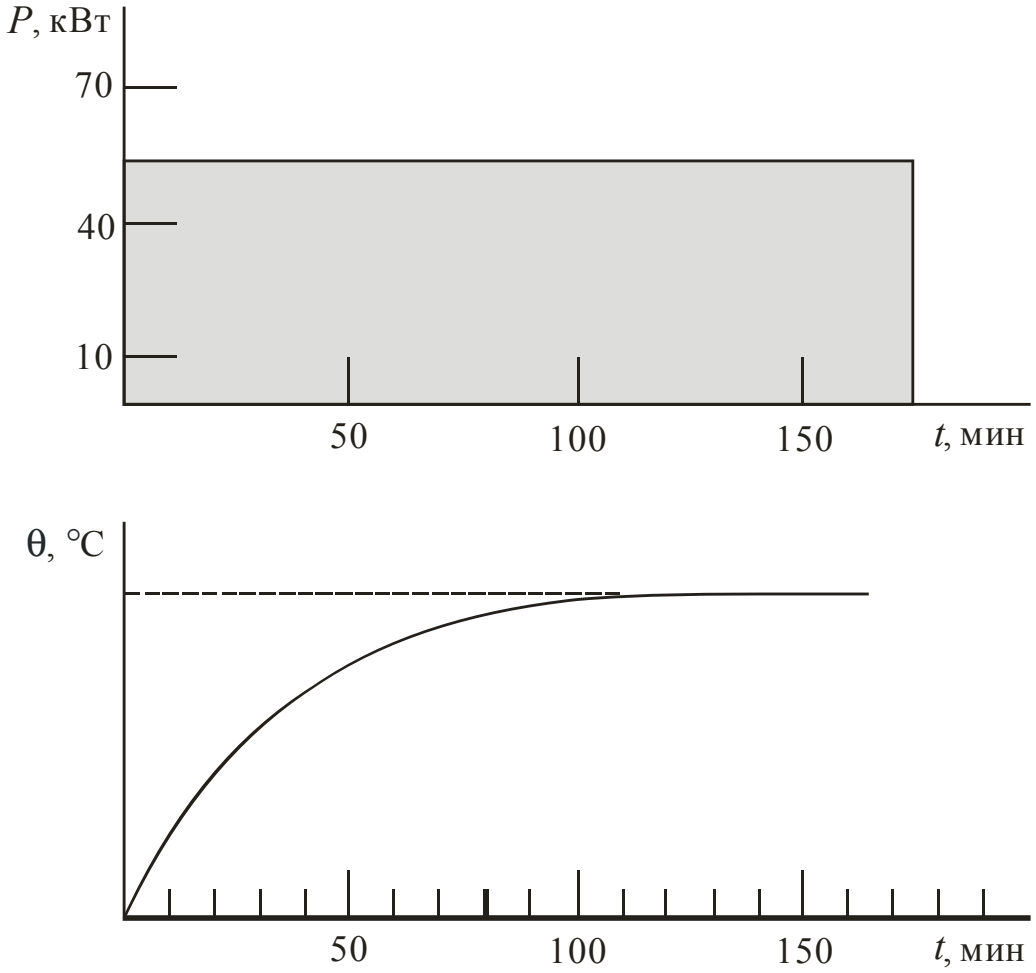


Рис. 1.22. Графики работы асинхронного двигателя в продолжительном режиме (к заданию 9)

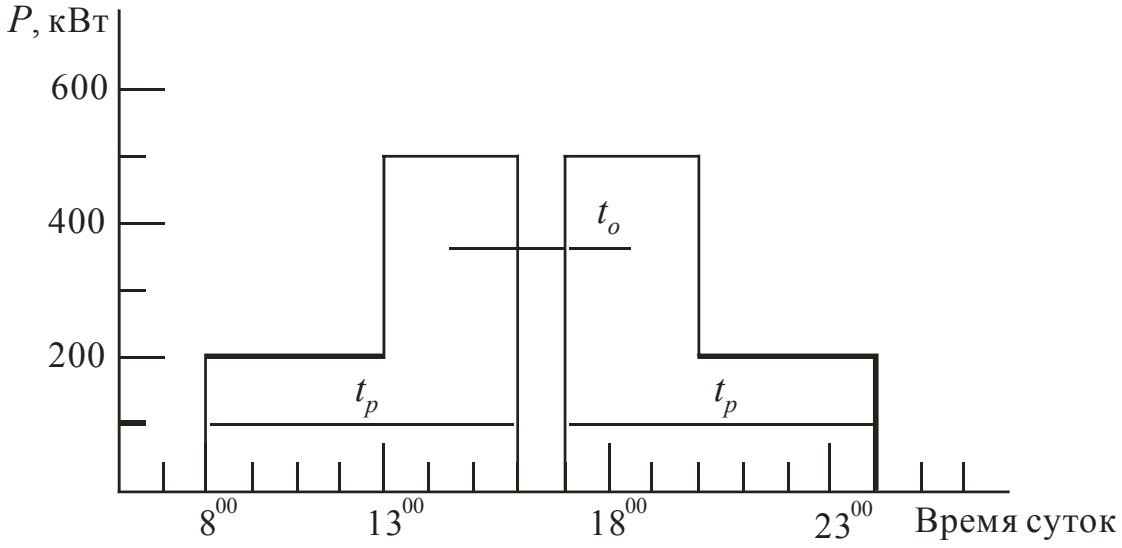
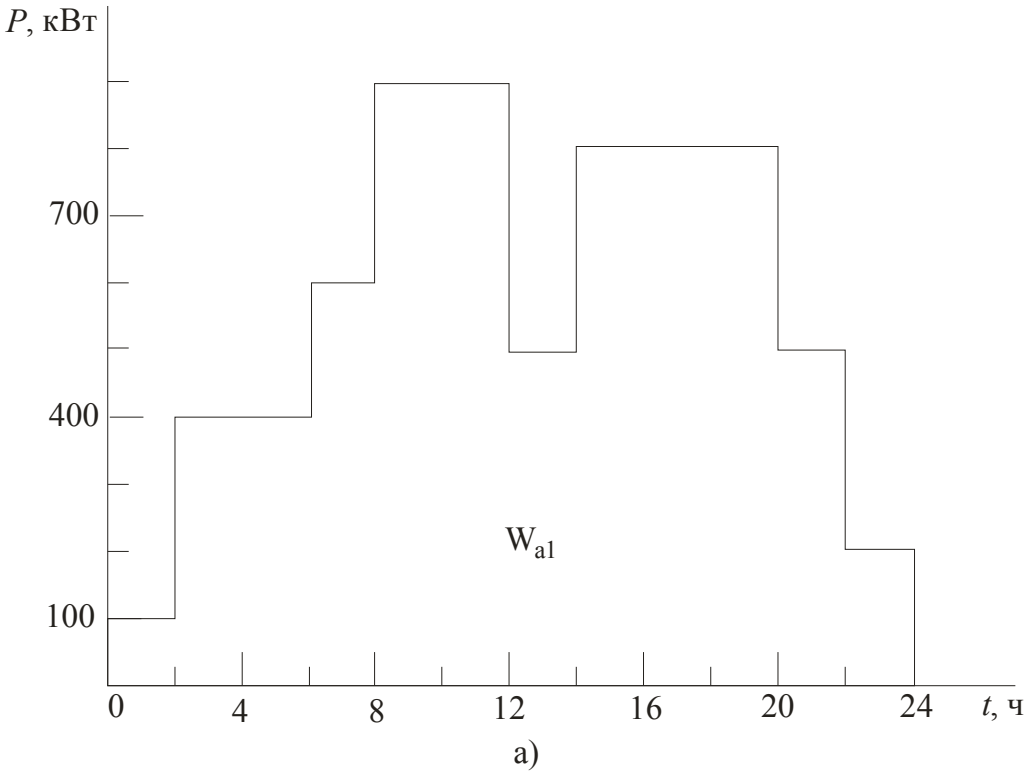
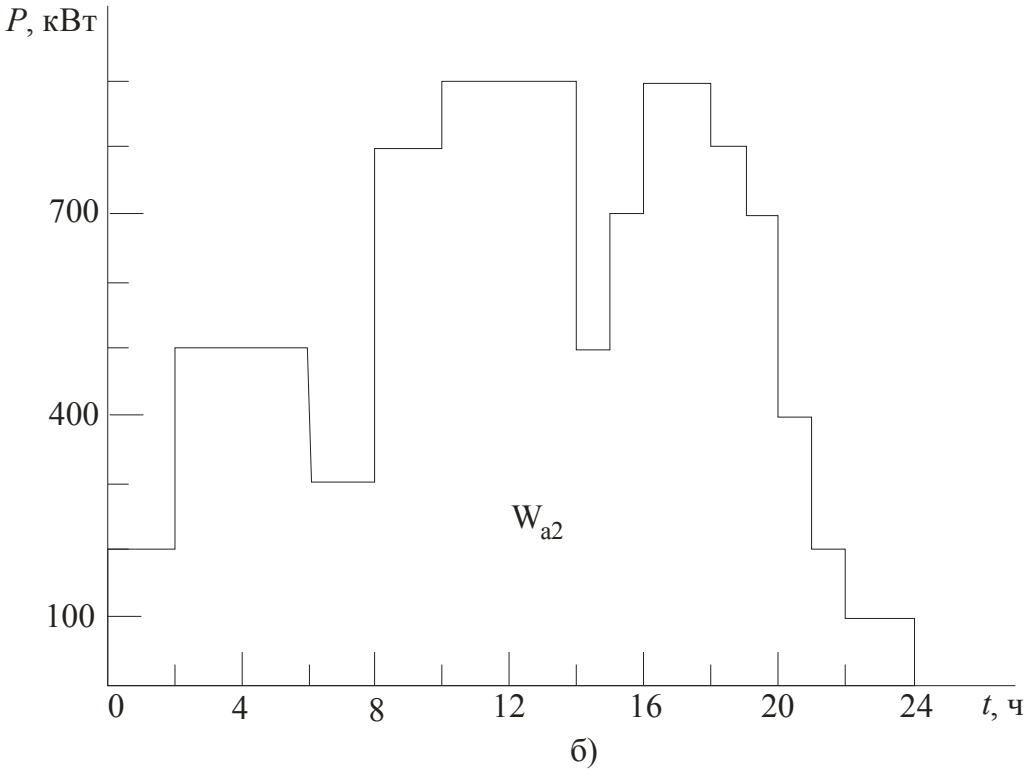


Рис. 1.23. График работы индивидуального электроприемника в течение суток (к заданию 10)



а)



б)

Рис. 1.24. График нагрузок потребителя при различном потреблении мощности (во времени), но при W_a = const за рассматриваемый промежуток времени (в данном случаи сутки)

15. Доказать, что по суточному графику активной нагрузки число часов использования максимальной нагрузки в год $T_{\max}$ может быть определено по одному из соотношений:

$$T_{\max} = \frac{P_{ср}}{P_{\max}} \cdot 8760;$$

$$T_{\max} = K_{зап} \cdot 8760;$$

$$T_{\max} = \frac{8760}{K_{м}};$$

где $P_{ср}$ – среднесуточная нагрузка;

$P_{\max}$ – максимальная нагрузка;

$K_{зап}$ – коэффициент заполнения суточного графика;

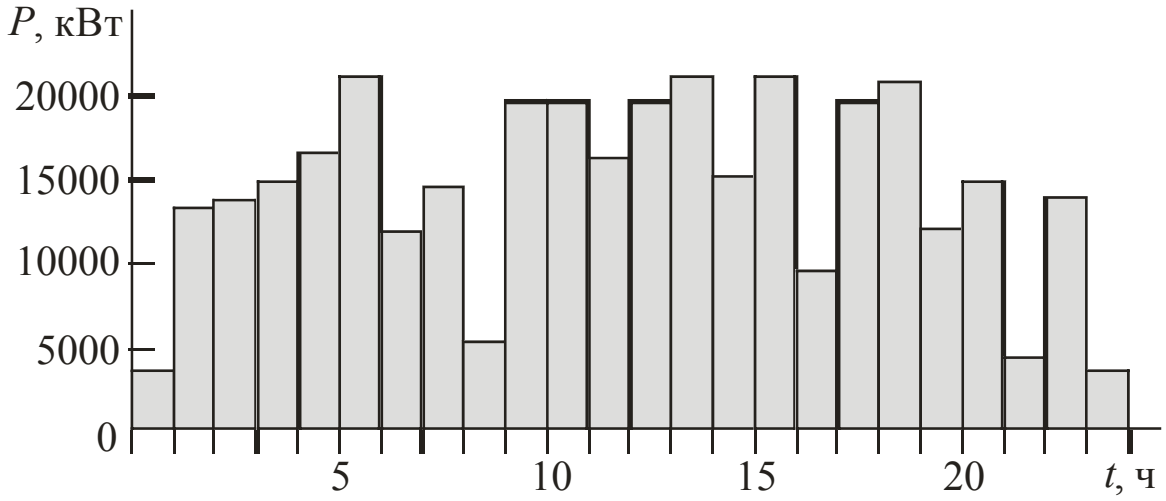
$K_{м}$ – коэффициент максимума.

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

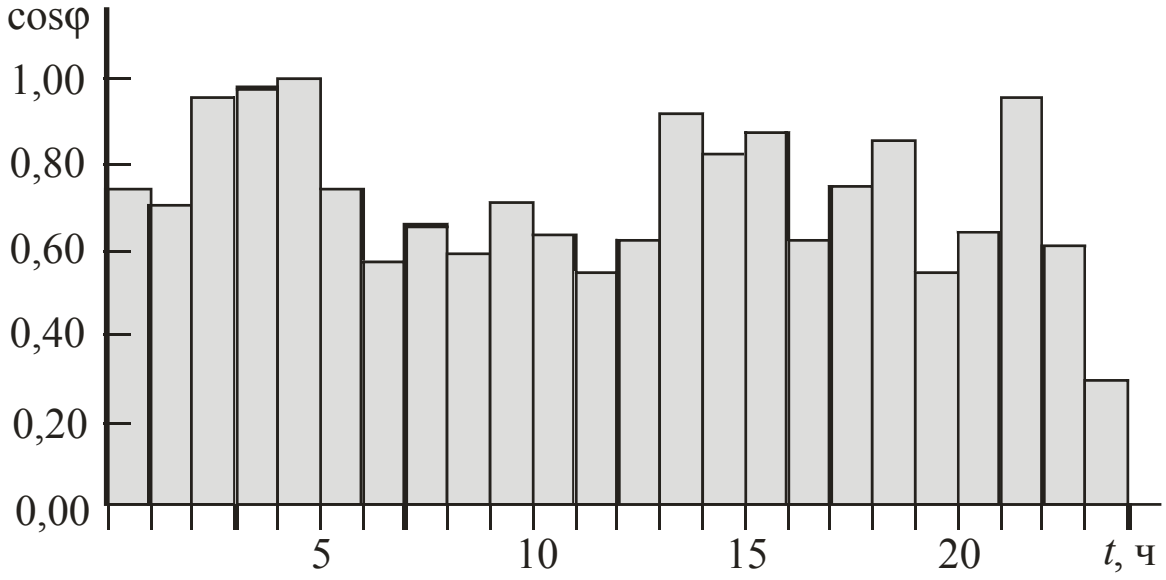
17. Для предприятия, суточные графики активной нагрузки и cosφ которого приведены на рис. 1.25, построить суточный график реактивной и полной нагрузки, годовой график активной нагрузки по продолжительности. По суточному графику активной нагрузки определить: максимальную и среднесуточную нагрузку, среднесменную нагрузку за наиболее загруженную смену (начало первой смены в 7^{00}, продолжительность смены 8 часов), среднеквадратичную мощность. Рассчитать средний за сутки коэффициент мощности. Определить коэффициенты заполнения, максимума и формы суточного графика активной нагрузки. Оценить число часов использования максимальной нагрузки и годовой расход активной электроэнергии.

18. Суточный график реактивной нагрузки предприятия и изменения cosφ даны на рис. 1.26. Построить суточный график активной и полной нагрузки, годовой график активной нагрузки по продолжительности. Выполнить задания примера 17.

19. Определить фактическое и эффективное число электроприемников по одному из упрощенных способов для группы потребителей со следующими данными:

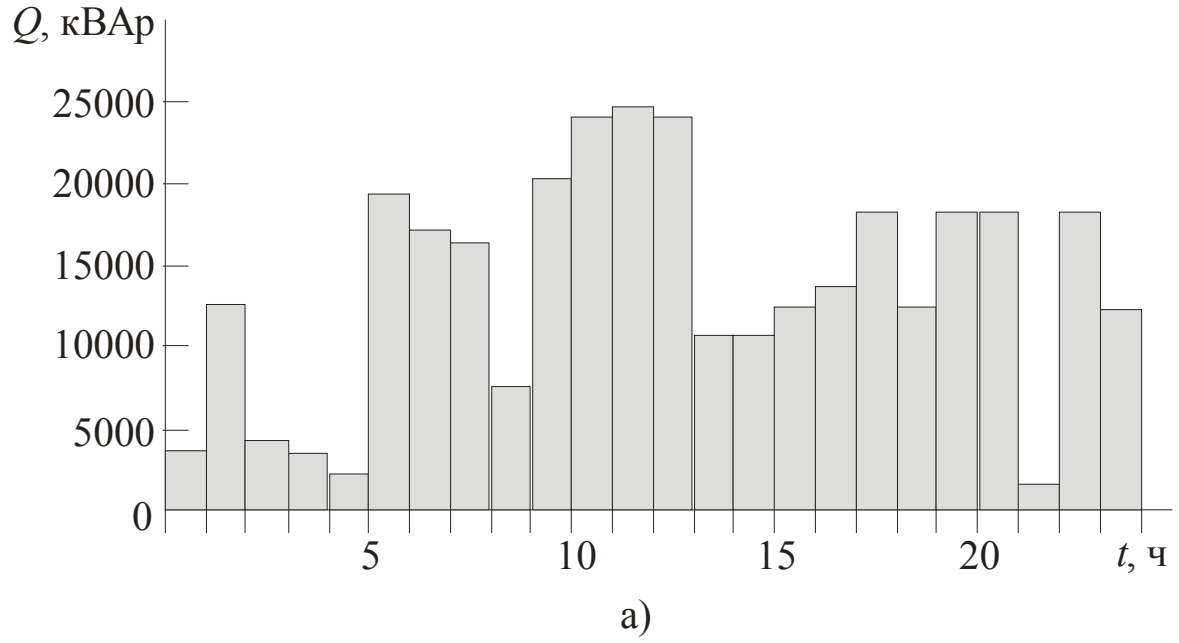


а)

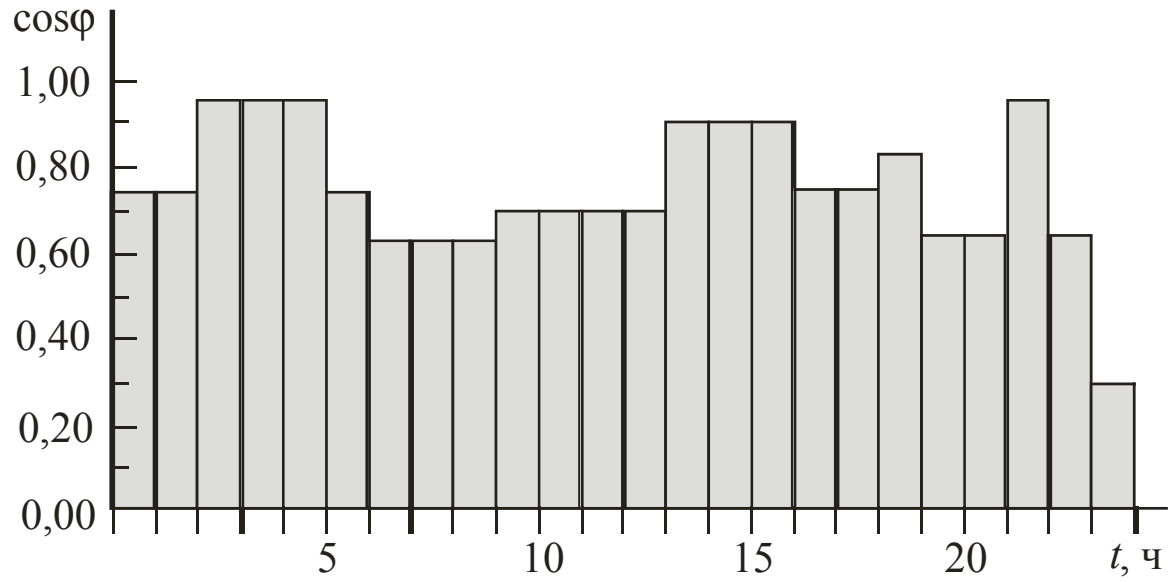


б)

Рис. 1.25. Суточный график активной нагрузки предприятия (а) и изменения коэффициента мощности (б)



а)



б)

Рис. 1.26. Суточный график реактивной нагрузки предприятий (а) и изменения коэффициента мощности (б)

- станки мелкие: 15 механизмов с номинальной мощностью от 3,1 до 13,1 кВт общей мощностью 98,2 кВт, $К_и = 0,13$;
- станки крупные: 6 механизмов с номинальной мощностью от 96 до 190,4 кВт общей мощностью 847,3 кВт, $К_и = 0,17$;
- краны: 2 механизма номинальной мощностью 5 и 14,7 кВт, $К_и = 0,1$;
- выпрямители и трансформаторы: 6 изделий с номинальной мощностью 23,5 кВт, $К_и = 0,3$.

Объяснить результаты расчета.

20. Определить эффективное число электроприемников длительного режима работы следующих номинальных мощностей: 8 по 0,5 кВт, 6 по 5 кВт, 10 по 7 кВт, 5 по 10 кВт и 2 по 15 кВт. Групповой коэффициент использования $К_и = 0,3$.

21. К четырем силовым распределительным шкафам присоединены 32 элекроприемника длительного режима работы следующих номинальных мощностей: 4 по 20 кВт, 5 по 15 кВт, 7 по 10 кВт, 6 по 7 кВт и 10 по 4,5 кВт. Определить эффективное число ЭП.

22. К шинопроводу подключена группа электроприемников длительного режима работы со следующими данными:
- асинхронный двигатель токарного станка: $р_{ном} = 125$ кВт, $к_и = 0,14$;
- 18 асинхронных двигателей различных механизмов с номинальной мощностью от 10 до 25 кВт и общей мощностью 340 кВт, $к_и = 0,36$;
- три электрические печи сопротивления мощностью по 40 кВт, $к_и = 0,55$;
- четыре вентилятора мощностью по 25 кВт, $к_и = 0,7$;
- семь специализированных станков-автоматов мощностью по 15 кВт, $к_и = 0,25$.

Определить фактическое и эффективное число электроприемников.

23. Одним из упрощенных способов определить $n_{эф}$ для группы электроприемников со следующими данными:
- металлорежущие станки: 20 механизмов с номинальной мощностью от 2 до 15 кВт общей мощностью 102 кВт, $к_и = 0,12$;
- станки универсального назначения: 5 механизмов с номинальной мощностью от 75 до 140 кВт общей мощностью 610 кВт, $к_и = 0,18$;

- краны: 2 механизма номинальной мощностью 10 и 95 кВт, $к_и = 0,1$;
- трансформаторы дуговой сварки: 4 изделия с номинальной мощностью от 2,5 до 5 кВт общей мощностью 18 кВт, $к_и = 0,25$.

Полученное значение сравнить с фактическим числом приемников. Прокомментировать результаты расчета.

24. Определить эффективное число электроприемников длительного режима работы следующих номинальных мощностей: 12 по 0,6 кВт, 5 по 6 кВт, 7 по 10 кВт, 5 по 12 кВт и 2 по 15 кВт. Групповой коэффициент использования $К_и = 0,1$.

25. Определить $n_{эф}$ для группы электроприемников длительного режима работы следующих номинальных мощностей: 5 по 20 кВт, 4 по 15 кВт, 6 по 10 кВт, 10 по 7 кВт, 4 по 4,5 кВт, 5 по 2,4 кВт и 20 по 1 кВт. Групповой коэффициент использования 0,35. Результат сравнить с расчетом по общей формуле для определения эффективного числа электроприемников.

26. Определить среднюю нагрузку за максимально загруженную смену следующей группы электроприемников:

- сварочная машина с паспортными данными: $S = 500$ кВА, ПВ = 15%, $\cos\varphi = 0,4$, $к_и = 0,3$;
- три токарных станка с двигателями мощностью по 16 кВт, $\cos\varphi = 0,7$ и коэффициент использования 0,14.

27. Определить среднюю и максимальную нагрузки группы электроприемников с указанными ниже данными:

- синхронный двигатель: $p_{ном} = 125$ кВт, $\cos\varphi = –0,95$, к.п.д. = 0,92, $к_и = 0,55$;
- 18 асинхронных двигателей разной мощностью от 10 до 25 кВт общей мощностью 340 кВт, $\cos\varphi = 0,65$, $к_и = 0,25$;
- три электроприемника мощностью по 40 кВт, один – 50 кВт, $\cos\varphi = 0,7$, $к_и = 0,3$;
- семь электроприемников мощностью по 15 кВт, $\cos\varphi = 0,55$, $к_и = 0,55$.

28. Для группы электроприемников с указанными ниже паспортными данными рассчитать среднюю и максимальную нагрузки:

- асинхронный двигатель поворота ванны сталеплавильной печи: $p_{ном} = 125$ кВт, $\cos\varphi = 0,95$, $к_и = 0,55$;

- 18 асинхронных двигателей приводов механизмов печи различной мощности от 10 до 25 кВт общей мощностью 340 кВт, cosφ = 0,65, $к_и$ = 0,25;
- три электроприемника мощностью по 40 кВт, один – 50 кВт, cosφ = 0,7, $к_и$ = 0,3;
- семь электроприемников мощностью по 15 кВт, cosφ = 0,55, $к_и$ = 0,55.

29. Рассчитать среднюю и максимальную нагрузки для группы электроприемников с указанными ниже паспортными данными:

- асинхронный двигатель наклона ванны сталеплавильной печи: $р_{ном}$ = 125 кВт, cosφ = 0,95, $ПВ_{пасп}$ = 25%, $к_и$ = 0,55;
- 18 асинхронных двигателей приводов различных механизмов номинальной мощностью от 10 до 25 кВт и общей мощностью 340 кВт, cosφ = 0,65, $к_и$ = 0,25;
- три электроприемника мощностью по 40 кВт, один – 50 кВт, cosφ = 0,7, $к_и$ = 0,3;
- семь электроприемников мощностью по 15 кВт, cosφ = 0,55, $к_и$ = 0,55.

30. Определить среднюю и максимальную нагрузки группы электроприемников с указанными ниже данными:

- сушильный шкаф с номинальной мощностью 125 кВт, cosφ = 0,95, $к_и$ = 0,55;
- 18 асинхронных двигателей различной мощности от 10 до 25 кВт общей мощностью 340 кВт, cosφ = 0,65, $к_и$ = 0,25;
- три электроприемника мощностью по 40 кВт, кузнечный молот с приводом от асинхронного двигателя мощностью 50 кВт, у каждого cosφ = 0,7, а $к_и$ = 0,3;
- семь электроприемников мощностью по 15 кВт, cosφ = 0,55, $к_и$ = 0,55.

31. Для группы электроприемников с указанными ниже паспортными данными рассчитать среднюю и максимальную нагрузки:

- сварочная машина стыковой сварки: $S_{пасп}$ = 125 кВА, $cosφ_{пасп}$ = 0,95, $ПВ_{пасп}$ = 0,25, $к_и$ = 0,55;
- 18 механизмов с асинхронными двигателями разной мощности от 10 до 25 кВт общей мощностью 340 кВт, cosφ = 0,65, $к_и$ = 0,25;
- три электроприемника мощностью по 40 кВт, один – 50 кВт, cosφ = 0,7, $к_и$ = 0,3;

- семь электроприемников мощностью по 15 кВт, cosφ = 0,55, $к_и$ = 0,55.

32. Рассчитать максимальный ток линии, запитывающей группу электроприемников длительного режима работы со следующими данными:

- два электроприемника по 80 кВт, два – по 50 кВт, cosφ = 0,8, $к_и$ = 0,4;
- один электроприемник 40 кВт, шесть – по 15 кВт, cosφ = 0,8, $к_и$ = 0,7;
- 14 асинхронных двигателей разной мощности от 7 до 15 кВт общей мощностью 170 кВт, cosφ = 0,65, $к_и$ = 0,2.

Все электроприемники включены на напряжение 380 В.

33. К распределительному шкафу подключены шесть электроприемников длительного режима работы следующих номинальных мощностей: два по 0,5 кВт, три по 1 кВт и один 10 кВт. Коэффициент использования всех электроприемников 0,25. Определить для этой группы электроприемников максимальную нагрузку и максимальный ток. Номинальное напряжение сети 380 В.

34. Определить расчетные нагрузки и максимальный ток линии при включении на линейное напряжение 380 В трех однофазных сварочных трансформаторов со следующими паспортными данными:

первый: фазы АВ s_1 = 70 кВА; $ПВ_1$ = 50%; $cosφ_1$ = 0,5;
второй: фазы АС s_2 = 42 кВА; $ПВ_2$ = 60%; $cosφ_2$ = 0,65;
третий: фазы ВС s_3 = 34 кВА; $ПВ_3$ = 65%; $cosφ_3$ = 0,5.

35. Определить максимальную нагрузку, максимальный и пиковый токи группы из трех электроприемников длительностью режима работы со следующими данными:

- печь сопротивления: $р_{ном}$ = 177 кВт, cosφ = 0,97, $к_и$ = 0,5;
- токарный станок с приводом от асинхронного двигателя: $р_{ном}$ = 15 кВт, cosφ = 0,72, к.п.д. = 0,7, $к_и$ = 0,14;
- механический пресс с приводом от асинхронного двигателя: $р_{ном}$ = 30 кВт, cosφ = 0,72, к.п.д. = 0,7, $к_и$ = 0,25.

Все электроприемники включены на напряжение 380 В.

36. Рассчитать пиковый ток линий, запитывающих группы электроприемников с данными, указанными в заданиях 27–31. Электроприемники включены на напряжение 380 В. Сравнить и объяснить результаты расчетов.

37. Для группы ЭП задания 32 определить пиковый ток линии при условии, что:

1. ЭП мощностью по 80 кВт включаются и работают раздельно;
2. ЭП мощностью по 80 кВт работают только совместно.

38. К магистрали подключены один электродвигатель 150 кВт, $\kappa_и = 0{,}55$, cosφ = 0,75 и десять электродвигателей по 2,5 кВт, $\kappa_и = 0{,}3$, cosφ = 0,6. Все электродвигатели длительного режима работы с переменным графиком нагрузки. Графика работы электродвигателя 150 кВт не имеется. Определить средние и максимальные нагрузки, максимальный и пиковый токи магистрали. Двигатели включены на напряжение 380 В.

39. Для одной из приведенных на рис. 1.27 схем методом упорядоченных диаграмм рассчитать электрические нагрузки шкафов и узла в целом. Схема выбирается согласно таблице 1.16, число электроприемников в каждом шкафу в зависимости от схемы по таблице 1.17 или 1.18, наименования электропиремников и их мощности – по таблице 1.19 или 1.20. При распределении электроприемников по шкафам поступить следующим образом: к ШР1 подключить из таблицы 1.19 или 1.20 первое требуемое таблицей 1.17 или 1.18 число электроприемников, к ШР2 – следующее число электроприемников и т. д.

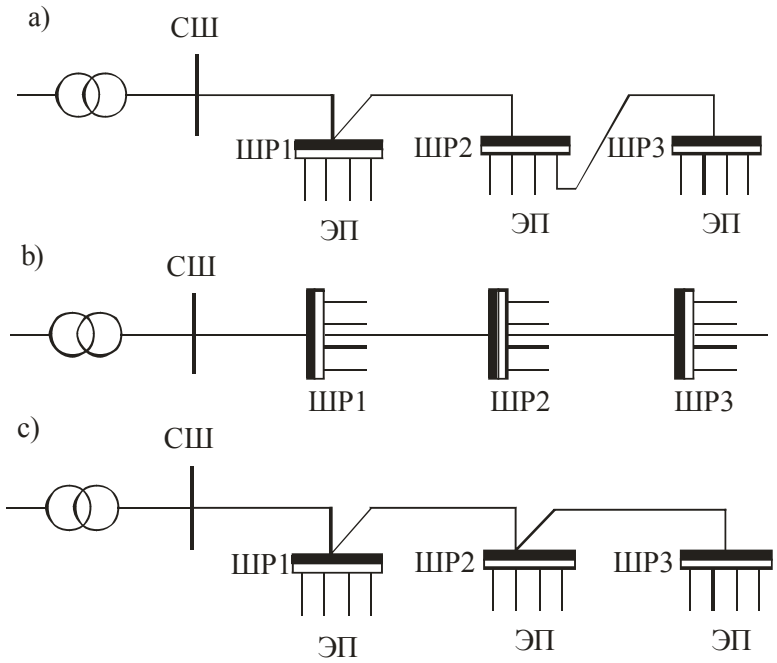


Рис. 1.27. Варианты схем для выполнения задания 39:
СШ – сборные шины распредустройства со вторичной стороны трансформатора 6-10/0,4 кВ; ЭП – электроприемники; ШР – шкаф распределительный; ШМА – шинопровод магистральный с алюминиевыми шинами

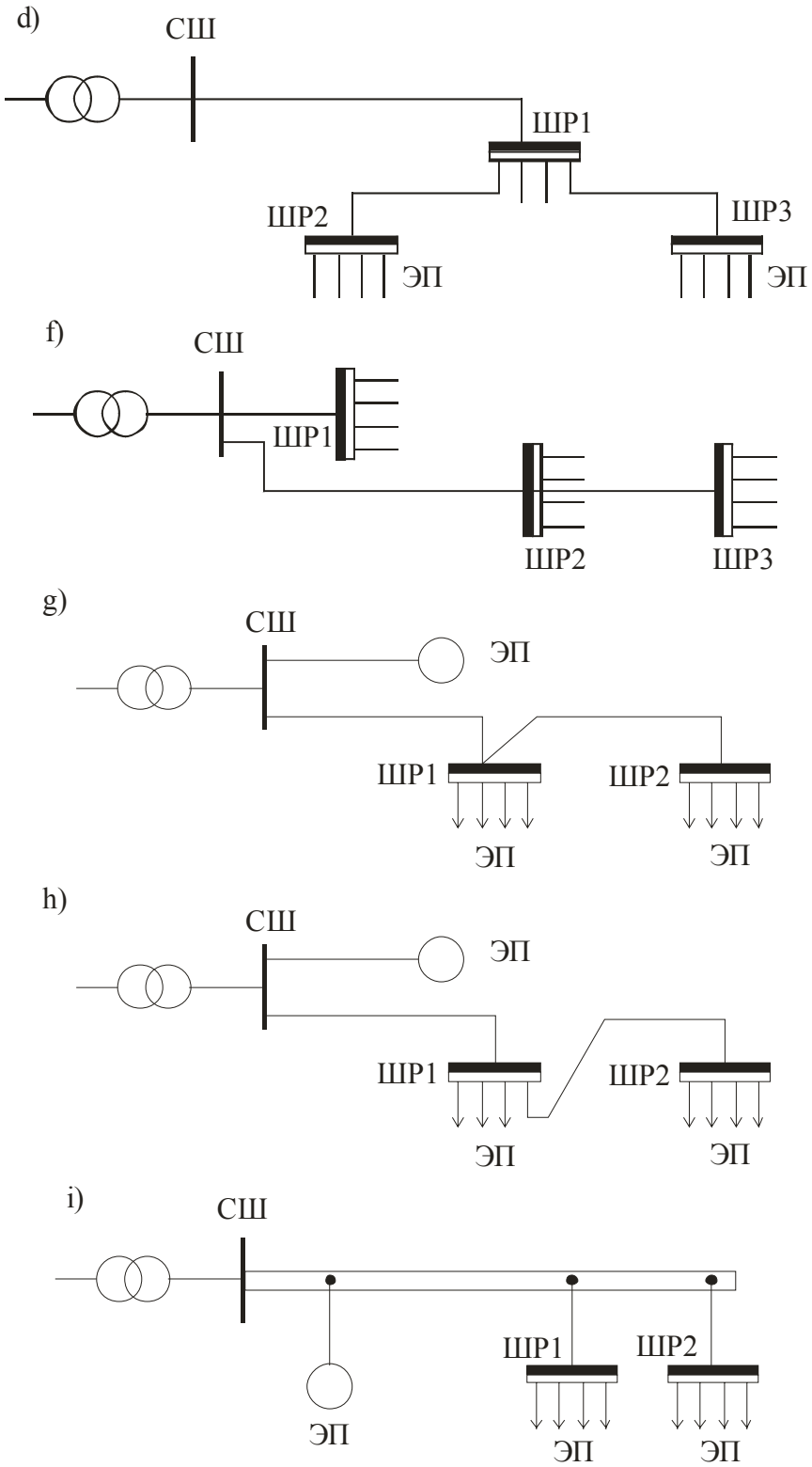

d)
СШ
ШР1
ШР2
ШР3
ЭП
ЭП
f)
СШ
ШР1
ШР2
ШР3
g)
СШ
ЭП
ШР1
ШР2
ЭП
ЭП
h)
СШ
ЭП
ШР1
ШР2
ЭП
ЭП
i)
СШ
ЭП
ШР1
ШР2
ЭП
ЭП

Таблица 1.16.

Номер схемы для расчета задания 39

Первая буква фамилии	А, В	Б	Г, Д	Е, Ж, З, И	К, Й	Л, О, Н	М, П, Р	Т, С, У	Ц, Ф, Х, Ч	Ш, Щ, Э, Ю, Я
Номер схемы рис.1.27	a	b	c	d	d	e	f	g	h	i

Таблица 1.17.

Число ЭП, подключенных к шкафам в схемах a–f, рис. 1.27

Вторая буква фамилии	ШР1	ШР2	ШР3
А, Б, В	5	8	3
Г, Д, Е	6	7	3
З, Ж, И, Я	6	7	3
К, Л, М, Ю	5	6	5
Н, О, П, Э	6	7	3
Р, С, Т, У, Щ	7	6	3
Ф, Х, Ц, Ч, Ш	5	8	3

Таблица 1.18.

Данные для расчета к схемам g–i, рис. 1.27

Вторая буква фамилии	Число ЭП		Данные ЭП, непосредственно подключенного к шинам или ШМА
	ШР1	ШР2	
А, Б, В, Г, Д	12	4	Компрессор (синхронный двигатель) $P_{ном}$=125 кВт, cosφ=0,9 (опережающий), к.п.д.=0,81. Кратность пускового тока $K_п$=7, $U_{ном}$=380 В
Е, Ж, И, К	7	9	Асинхронный двигатель токарного станка, $P_{ном}$=132 кВт, к.п.д.=0,91, cosφ=0,9, $U_{ном}$=380 В, $K_п$=7
Л, О, М, Н, Х	6	10	Компрессор $P_{ном}$=200 кВт, двигатель синхронный, cosφ=0,9 (опережающий), к.п.д.=0,92, $U_{ном}$=380 В
П, Р, С, Т, У, Ф	8	8	Электропечь сопротивления конвейерная 3-х фазная $P_{ном}$=177 кВт, $U_{ном}$=380 В
Ц, Ч, Ш, Щ, Э, Ю, Я	4	12	Электропечь индукционная 3-х фазная $U_{ном}$=380 В, $S_{ном}$=100 кВА

Таблица 1.19.

Число и номинальная мощность оборудования (кВт), подключенного к распределительным шкафам в схемах a–f, рис. 1.27

№	Наименование электро-оборудования	Первая буква имени						
		А, Б, В	Г, Д, Е	Ж, З, И, Я	К, Л, М, Ю	Н, О, П, Э	Р, С, Т, У, Щ	Ф, Х, Ц, Ч, Ш
1.	Токарно-винторезный станок	1×15	1×12,5	2×7	1×17	1×16,5	2×14,2	2×4
2.	Вертикально-сверлильный станок	2×15	1×4,6	1×23,6	2×6,5	2×5	2×4,6	1×30
3.	Резьбонарезной станок	1×34	1×24,8	1×19	1×34	1×24,8	1×34	2×14,2
4.	Долбежный станок	1×10	2×4	2×7,5	2×5,5	1×4	1×7,5	1×8,5
5.	Шлифовальный станок	2×4,5	2×11,6	1×8,5	2×8	2×4,5	1×11,6	1×9,4
6.	Прессы	2×10	1×28	2×11	1×55	2×14	1×10	1×6,2
7.	Вентиляторы	2×4	2×2,4	1×5	2×4	2×2,4	1×5	1×2,4
8.	Мостовой кран с ПВ=25%	1×20	1×9,4	1×16	1×20	1×9,4	1×16	1×6
9.	Электропечь-ванна	1×10	1×12	1×14	1×16	1×10	2×14	1×10
10.	Сварочный агрегат ПВ=60%, $\cos\varphi_{ном}$=0,46, $U_{ном}$=220 В	1×12 кВА	1×21 кВА	1×20 кВА	1×22 кВА	1×12 кВА	1×21 кВА	2×5 кВА
11.	Молоты	1×10	2×15	2×20	1×10	1×10	2×20	2×15
12.	Электропечь сушильная	1×30	1×30	1×36	1×50	1×40	1×40	1×10

Таблица 1.20.

Число и номинальная мощность оборудования (кВт), подключенного к распределительным шкафам в схемах g–i, рис. 1.27

№	Наименование электро-оборудования	Первая буква имени				
		А, Б, В, Г, Д	Е, Ж, З, И, К	Л, О, Н, М, Х	П, Р, С, Т, У, Ф	Ц, Ч, Ш, Щ, Э, Ю, Я
1.	Насосы	2×4	2×5,5	2×7	1×22	1×17
2.	Шкафы сушильные	1×30	1×30	1×30	1×30	1×30
3.	Станки токарные	1×14,2	1×23,6	2×16	2×7,9	2×5,65
4.	Отрезные станки	2×8,5	1×10	2×7,5	1×13	2×7,5
5.	Кран трехфазный ПВ=40%	1×9,4	1×18,8	1×38,2	1×9,4	1×17,3
6.	Пресс листогибочный	2×6,2	2×40	2×30	2×13,5	2×13,5
7.	Станки шлифовальные	1×10	2×2,2	1×7	2×10	2×4
8.	Станки заточные	1×6	3×1	2×2,3	2×3	2×4
9.	Молот пневматический	1×10	1×15	1×20	1×10	1×20
10.	Сварочный двигатель-генератор	2×15	1×25	1×10	1×17	1×15
11.	Станки сверлильные	2×5	1×4,7	1×5,65	2×4,15	1×4,7

40. Качественно (без выбора оборудования и проводников) разработать схему электроснабжения производственного участка цеха для одного из приведенных в таблице вариантов. Выбрать цеховую трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ.

Таблица 1.21.

Варианты заданий

Вариант	Категория электроснабжения	Площадь участка, м^2	Номера электроприемников по таблице 1.22
1.	1	450	1-4-14-17-23-25-28
2.	2	500	2-5-15-18-24-26-29
3.	3	550	3-6-16-21-22-26-28
4.	2	600	1-7-14-17-23-27-29
5.	3	400	2-8-15-18-24-25-28
6.	1	450	3-9-16-22-25-29
7.	3	500	1-10-14-17-24-27-28
8.	1	550	2-11-15-18-22-25-29
9.	2	600	3-12-16-19-23-25-28
10.	1	600	1-13-18-20-22-26-29

Таблица 1.22.

Технические данные электроприемников

№ п/п	Наименование электроприемника	$p_{ном}$, кВт	n	$к_и$	cosφ	tgφ
Трехфазный длительного режима						
1.	Компрессорная установка	28	5	0,65	0,8	0,75
2.	Вентиляторная установка	15	4	0,7		
3.	Насосная установка	55	8	0,75		
4.	Станок фрезерный	11,5	14	0,14	0,5	1,73
5.	Станок токарный	14	12			
6.	Станок строгальный	11	10			
7.	Станок карусельный	40	2			
8.	Станок наждачный	2,8	5			
9.	Станок винторезный	15	6			
10.	Станок расточный	42	2			
11.	Станок шлифовальный	3	15			
12.	Станок слиткообдирочный	45	4			
13.	Станок галтовочный	4	8			
14.	Молот ковочный	15	7	0,24	0,65	1,17
15.	Пресс штамповочный	4,5	12			
16.	Автомат фрезерный	7,5	20	0,17		
17.	Печь индукционная	8	4	0,75	0,35	2,67
18.	Печь дуговая	30	4		0,87	0,56

Окончание таблицы 1.22.

№ п/п	Наименование электроприемника	$p_{ном}$, кВт	n	$к_и$	cosφ	tgφ
19.	Печь сопротивления	35	6	0,8	0,95	0,33
20.	Конвейер ленточный	35	2	0,55	0,75	0,88
21.	Транспортер роликовый	10	3			
Трехфазный повторно-кратковременного режима						
22.	Кран мостовой, ПВ=25%	30	2	0,05	0,5	1,73
23.	Тележка подвесная, ПВ=40%	4	8	0,1		
24.	Тельфер транспортный, ПВ=60%	10	3			
Однофазный повторно-кратковременного режима, $U_{ном}$ = 380 В						
25.	Трансформатор сварочный, ПВ=40%	28 кВА	5	0,2	0,4	2,29
26.	Аппарат дуговой сварки, ПВ=60%	16 кВА	5	0,3	0,35	2,67
27.	Аппарат стыковой сварки, ПВ=25%	14 кВА	5	0,35	0,55	1,51
Осветительная установка						
28.	Лампы накаливания	9…11 Вт/м^2			1	—
29.	Газоразрядные лампы			0,85	0,95	0,33

41. К шинопроводу (рис. 1.28) подключены два асинхронных двигателя номинальной мощностью 200 и 260 кВт, cosφ = 0,8 и распределительный шкаф, запитывающий восемь электроприемников по 20 кВт, $к_и$ = 0,25, cosφ = 0,7. Все электроприемники длительного режима работы, включены на напряжение 380 В. График работы электродвигателей 200 и 260 кВт приведен на рис. 1.290. Определить электрические нагрузки узла, рассчитать пиковый ток шинопровода.

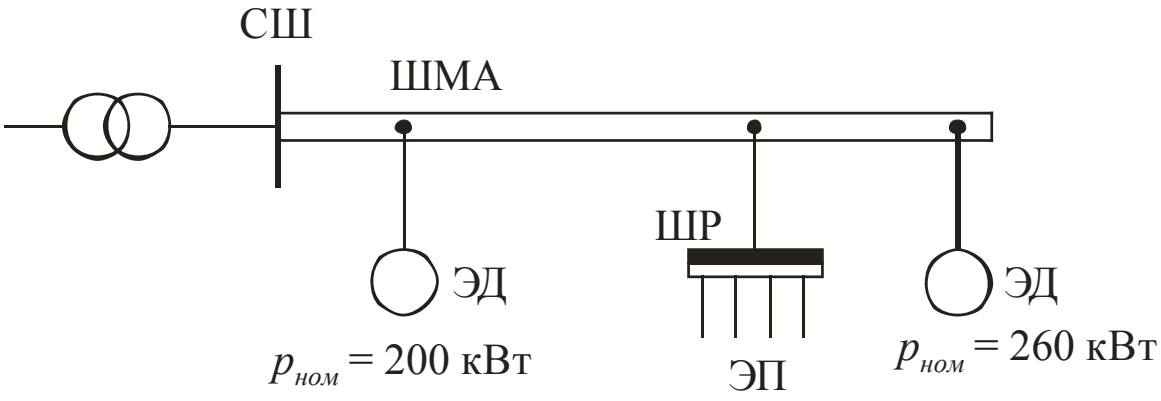


Рис. 1.28. Схема для выполнения задания 41:
СШ – сборные шины распредустройства со вторичной стороны трансформатора 10/0,4 кВ; ЭД – электродвигатель; ШР – шкаф распределительный; ЭП – электроприемники; ШМА – шинопровод магистральный с алюминиевыми шинами

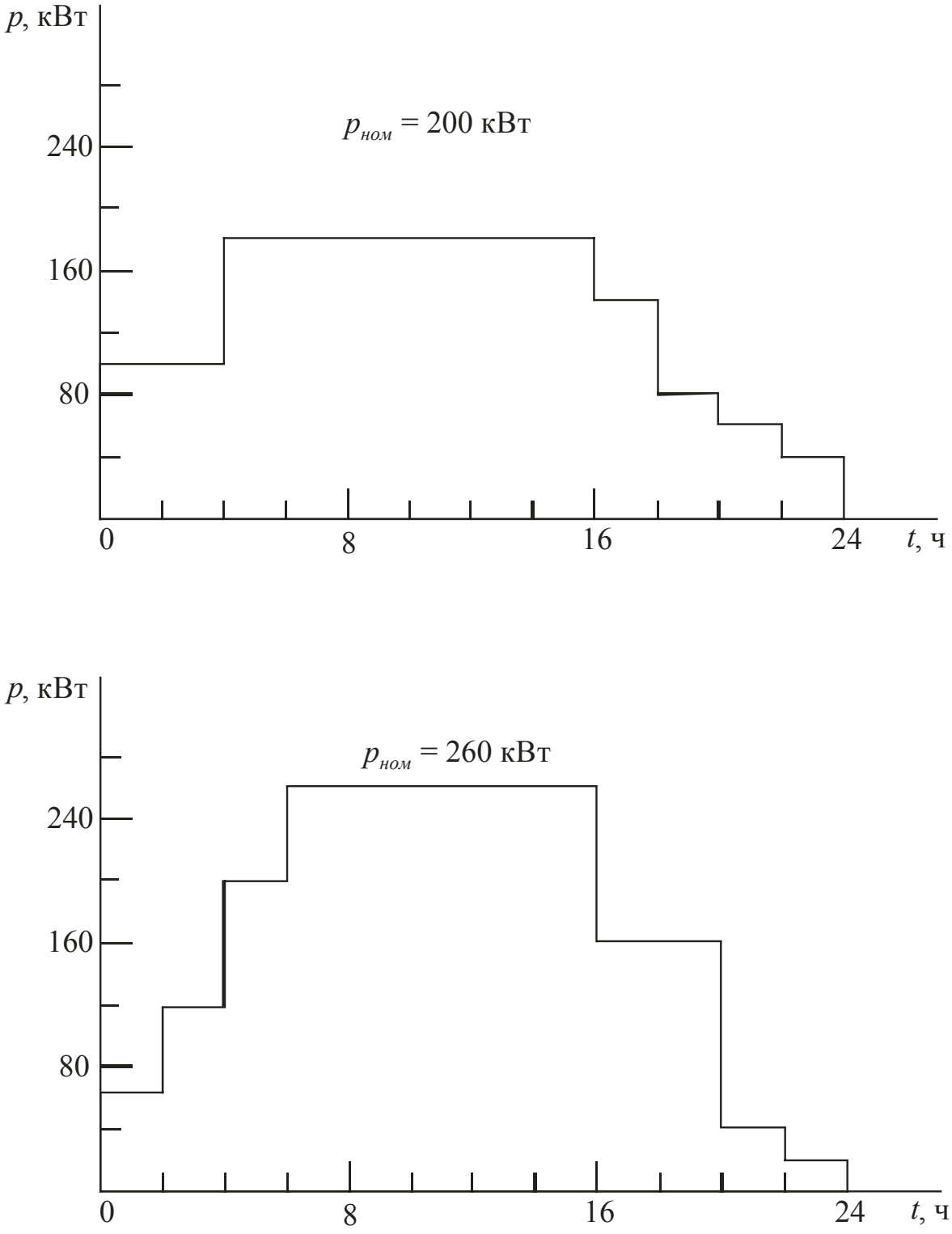


Рис. 1.29. Графики работы электродвигателей (к заданию 41)

42. Определить расчетную нагрузку группы электроприемников коксохимического цеха с разными режимами работы, средневзвешенными коэффициентами спроса и коэффициентами мощности. Установленная мощность подгрупп приемников с одинаковым режимом работы и справочные данные по их коэффициенту спроса и cosφ даны в таблице 1.23. Результаты расчета представить в виде таблицы.

Таблица 1.23.

Исходные данные и расчетная нагрузка группы электроприемников коксохимического цеха (к заданию 42)

Наименование подгрупп (групп) электроприемников	Число ЭП	Суммарная установленная мощность, кВт	K_c	$\frac{\cos\varphi}{\mathrm{tg}\varphi}$	Расчетные нагрузки		
					$P_{расч}$, кВт	$Q_{расч}$, кВАр	$S_{расч}$, кВА
Транспортеры	16	191,4	0,8	$\frac{0,75}{}$			
Дозировочные столы	2	9	0,35	$\frac{0,5}{}$			
Питатели	23	158,5	0,6	$\frac{0,75}{}$			
Вентиляторы, насосы	8	18	0,8	$\frac{0,85}{}$			
Общая нагрузка электроприемников всех четырех групп							

43. С учетом потерь мощности в высоковольтных линиях, в трансформаторах цеховых подстанций и ГПП определить полную мощность предприятия, исходные данные по цехам которого приведены в таблице 1.24. Освещение выполнено лампами накаливания.

44. Выполнить расчеты, предшествующие выбору низковольтного оборудования и проводников, и составить схему электроснабжения деревообрабатывающего цеха, выбрать цеховую трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВт.

Краткая характеристика производства и потребителей электроэнергии. Деревообрабатывающий цех предназначен для изготовления оконных блоков и является составной частью крупного домостроительного комбината. Весь технологический процесс осуществляется двумя потоками. Каждый поток состоит из трех автоматизированных линий:

Таблица 1.24.

Расчетные нагрузки по цехам завода (к заданию 43)

№ п/п	Наименование потребителей (цехов)	Силовая нагрузка					Осветительная нагрузка					Силовая и осветительная нагрузки		
		$P_{ном}$, Вт	K_c	cosφ/tgφ	$P_{расч}$, Вт	$Q_{расч}$, кВАр	F, м^2	$P_{уд.\,о}$, Вт/м	$P_{ном.\,о}$, Вт	$K_{со}$	$P_{расч.\,о}$, Вт	$P_{расч}$+ $P_{расч.\,о}$, Вт	$Q_{расч}$, кВАр	$S_{расч}$, кВА
Потребители электроэнергии 0,38 кВ														
1.	Механический	450	0,6	0,7/1,02			1168			0,85				
2.	Термический	360	0,65	0,7/1,02			1168			0,85				
3.	Заготовочный	200	0,6	0,7/1,02			1727			0,85				
4.	Инструментальный	580	0,7	0,7/1,02			1524			0,85				
5.	Кузнечный	920	0,7	0,7/1,02			685			0,95				
6.	Котельная	800	0,65	0,7/1,02			1066			0,95				
7.	Электроцех	390	0,6	0,7/1,02			1066			0,85				
8.	Экспериментальный	200	0,6	0,7/1,02			522			0,95				
9.	Компрессорная	45	0,5	0,7/1,02			1168			0,95				
10.	Насосная	700	0,75	0,75/0,88			391			0,85				
11.	Лаборатория	160	0,8	0,8/0,75			1408			0,85				
12.	Ремонтно-механический	380,2	0,6	0,75/0,88			942			0,85				
Территория завода							65032			1				
	ИТОГО по 0,38 кВ						$\sum F_ц$=							
Потребители электроэнергии 10 кВ														
13.	Компрессорная	700	0,5	0,7/1,02										
	ИТОГО по 10 кВ													

- ДЛ2 – линия раскроя пиломатериалов;
- ДЛ8А – линия обработки оконных блоков;
- ДЛ10 – линия сборки.

Готовая продукция проходит через малярную и идет к потребителю. Транспортировка деталей по цеху осуществляется электрокарами, для подзаряда аккумуляторов которых имеется зарядная. Кроме этого предусмотрены производственные, вспомогательные и бытовые помещения.

Участок раскроя пиломатериалов и зарядная являются пожароопасными помещениями.

Электроэнергию цех получает от собственной комплектной трансформаторной подстанции (КТП), подключенной к ГПП комбината.

По категории надежности электроснабжения – цех потребитель первой категории.

Количество рабочих смен – три (круглосуточно).

Каркас здания сооружен из блоков-секций длиной 6 м каждый. Размеры цеха А×В×Н = 48×30×8 м. Все помещения, кроме технологических участков, двухэтажные высотой 3,6 м.

Перечень электрооборудования цеха дан в таблице 1.25, указана номинальная мощность одного электроприемника ($p_{ЭП}$).

Расположение основного оборудования показан на плане (рис. 1.30).

Освещение выполнено лампами накаливания.

Таблица 1.25.

Перечень электрооборудования деревообрабатывающего цеха

№ на плане (рис.1.30)	Наименование электрооборудования	Вариант			Примечание
		1	2	3	
		$p_{ЭП}$, кВт			
1, 2	Вентиляторы	4,5	5	5,5	
3	Компрессор	6	7,5	5	
4	Установка окраски электростатической	3,5	4,5	4,8	однофазная, $U_{ном}$=380В
5, 6	Зарядные агрегаты	5	3,8	4,5	однофазная, $U_{ном}$=220В
7, 8	Токарные станки	2,8	2,5	1,8	
9, 29	Лифты вертикальные ДБ1	3	3	3	
10, 30, 15, 35	Загрузочные устройства	2,8	3,2	2,5	
11, 31	Торцовочные станки ДС1	3,2	3,4	2,8	
12, 32, 22, 42, 27, 47	Транспортеры ДТ4	3	2,8	2,6	

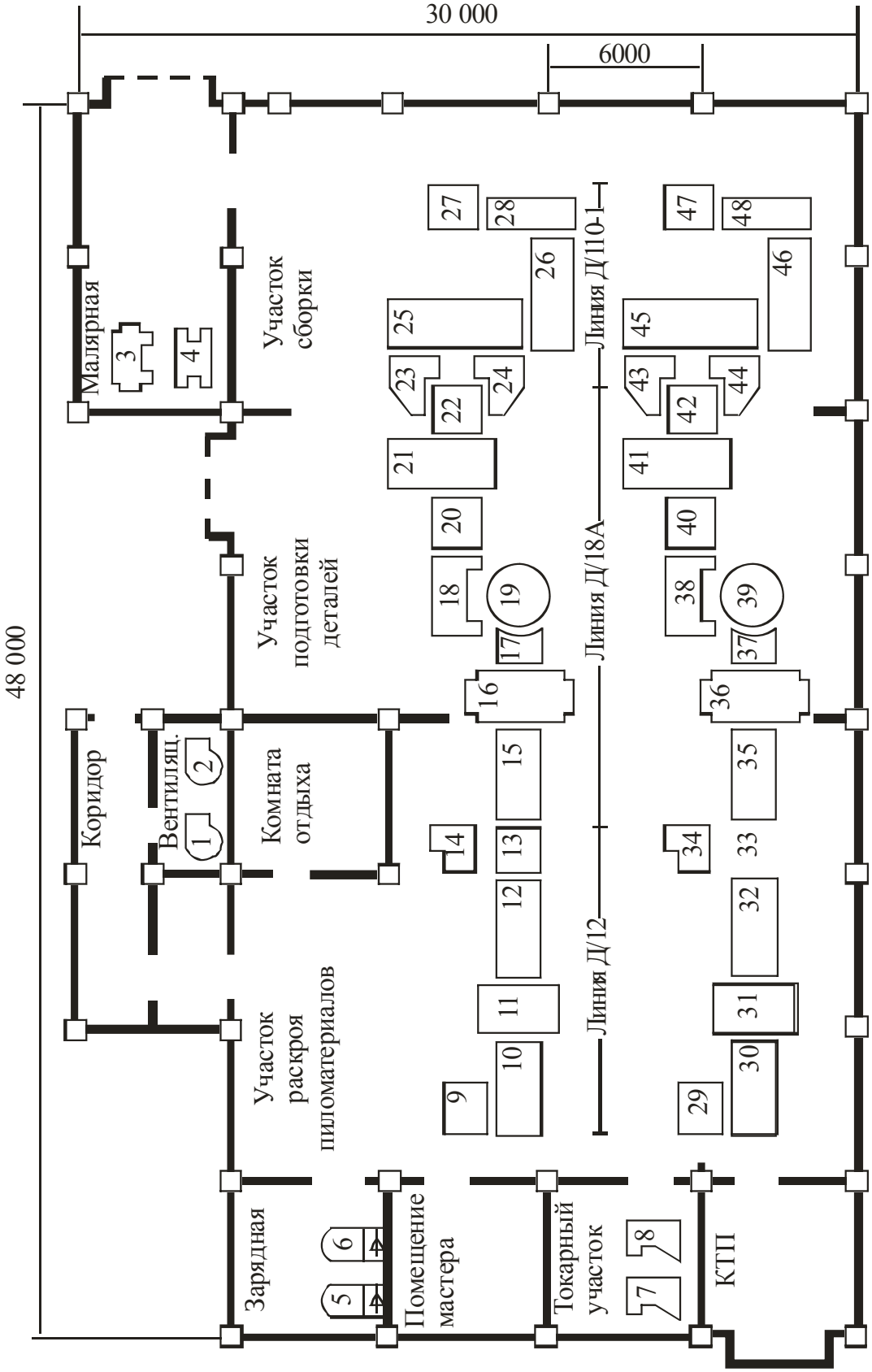


Рис. 1.30. План расположения электрооборудования деревообрабатывающего цеха (к заданию 44)

Окончание таблицы 1.25.

№ на плане (рис.1.30)	Наименование электрооборудования	Вариант			Примечание
		1	2	3	
		$p_{ЭП}$, кВт			
13, 33	Многопильные станки ЦМС	6	4	5	
14, 34	Станки для заделки сучков	2,2	2,6	2,4	
16, 36	Фуговальные станки	4,5	3	3,5	
17, 37, 20, 40	Транспортеры ДТ6	4,2	3,8	4	
18, 38	Шипорезные станки ДС35	4	4,2	4,5	
21,41	Станки четырехсторонние ДС38	6	5	4	
23, 24, 43, 44	Станки для постановки полупетель ДС39	1,8	1,6	1,4	
19, 39	Перекладчики ДБ14	3,8	3,6	4	
25, 45, 26, 46	Сборочный полуавтомат ДА2	2,4	2,5	2,6	
28, 48	Станок для снятия провесов ДС40	1,5	1,2	1,4	

45. Разработать схему электроснабжения инструментального цеха, выбрать цеховую трансформаторную подстанцию 10/0,4 кВ. Освещение выполнено газоразрядными лампами.

Краткая характеристика производства и потребителей электрической энергии. Инструментальный цех предназначен для изготовления и сборки различного измерительного, режущего, вспомогательного инструмента, а также штампов и приспособлений для горячей и холодной штамповки. Он является вспомогательным цехом завода по изготовлению механического оборудования и станков. Цех имеет производственные, вспомогательные, служебные и бытовые помещения.

Станочный парк размещен в станочном отделении. Электроснабжение цеха осуществляется от собственной цеховой ТП. Задание расположенного на расстоянии 1,2 км от заводской главной понизительной подстанции (ГПП), напряжение – 10 кВ. Расстояние ГПП от энергосистемы – 12 км.

Количество рабочих смен – 2. Потребители электроэнергии – 2 и 3 категории надежности электроснабжения.

Каркас здания сооружен из блоков-секций длиной 6 м каждый. Размеры цеха А×В×Н = 48×30×8 м. Все помещения, кроме станочного отделения, двухэтажные высотой 3,6 м.

Перечень электрооборудования цеха дан в таблице 1.26. Мощность элекропотребления ($p_{ЭП}$) указана для одного электроприемника.

Расположение электрооборудования на плане показано на рис. 1.31.

Таблица 1.26.

Перечень электрооборудования инструментального цеха

№ на плане (рис.1.31)	Наименование электрооборудования	Вариант			Примечание
		1	2	3	
		$p_{ЭП}$, кВт			
1, 2, 40, 41, 46	Поперечно-строгальные станки	5,5	7,5	8,5	
3, 5…7, 28…31	Токарно-револьверные станки	4,8	3,2	2,8	
4, 8, 32…34	Одношпиндельные автоматы токарные	1,8	2,2	3,5	
9…15, 26, 27	Токарные автоматы	4,5	5,5	7,5	
16, 17, 19, 20, 44, 45	Алмазно-расточные станки	2,8	4,8	2,2	
18, 21…25, 37, 38	Горизонтально-фрезерные станки	10	12,5	9,5	
35, 36, 50, 51	Наждачные станки	1,5	2,5	3	однофазные, $U_{ном}$=380В
39, 47	Кран-балки	5	10	15	ПВ = 60%
42, 43, 48, 49, 52, 53	Заточные станки	2,3	3	2,5	однофазные, $U_{ном}$=380В

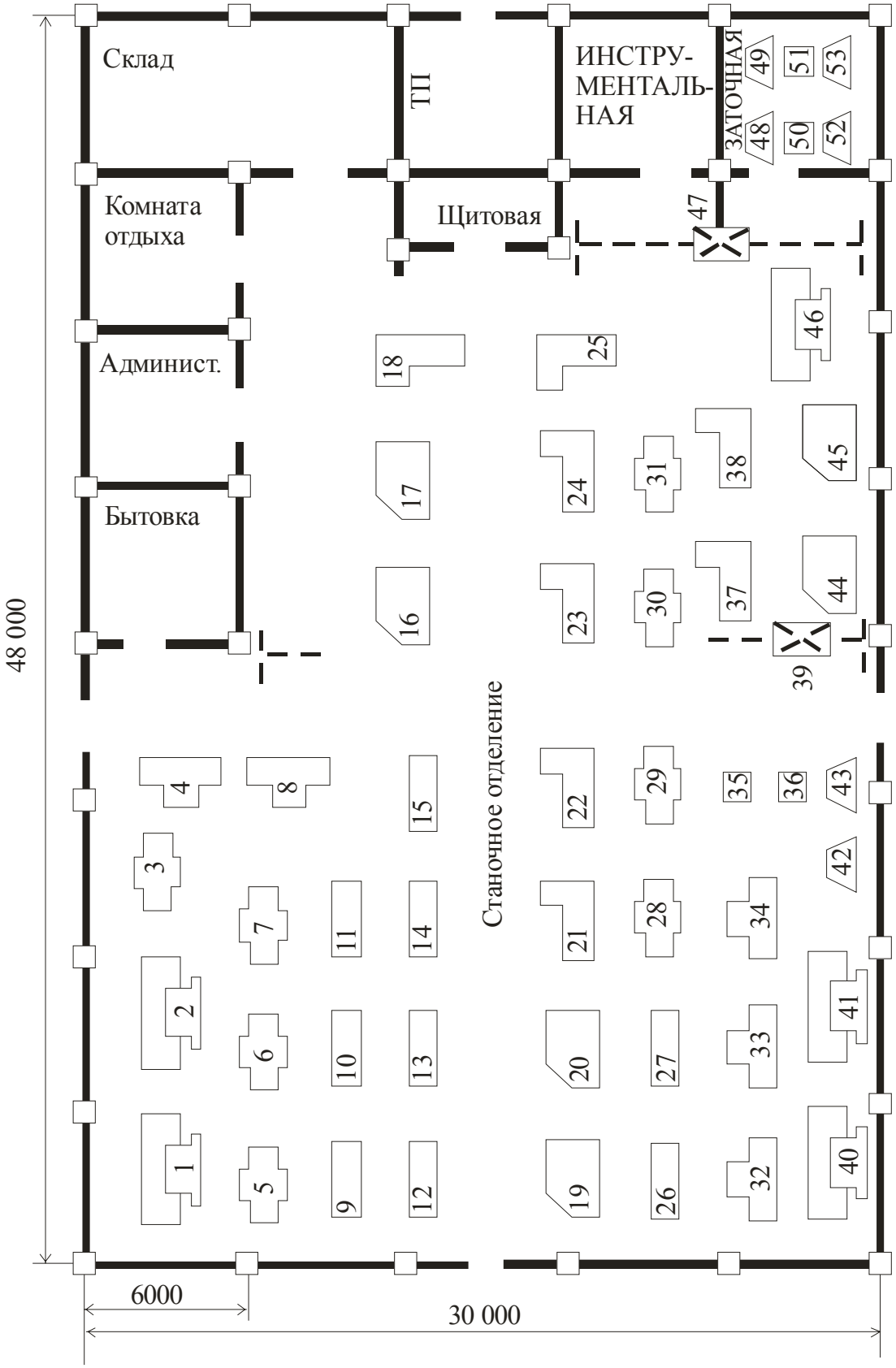


Рис. 1.31. План расположения электрооборудования инструментального цеха (к заданию 45)

2. НАГРЕВ ПРОВОДНИКОВ И ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Работа электрооборудования и питающих проводников сопровождается их нагревом. Это обусловлено происходящими в устройствах физическими процессами и потерями электроэнергии. В связи с этим характеристикой нагрузочных режимов работы оборудования и проводников выступает их тепловая характеристика (раздел 1.1). Ее анализ и оценка температуры в соответствии с законами нагрева и охлаждения конкретного изделия дают информацию о количестве тепла, накопленного изделием с точки зрения допустимого нагрева изоляции. При его превышении происходит ускоренное старение изоляции: снижается механическая прочность, появляются хрупкость, разломы и трещины. Это снижает ее электрическую прочность и приводит к пробою. Нормативный срок службы изделия сокращается. Состояние электрической изоляции определяет и степень безопасной эксплуатации электроустановок.

Основными причинами, вызывающими процессы старения электрической изоляции, являются:

- нагрев обмоток и жил рабочими и пусковыми токами, токами короткого замыкания и перегруза, теплотой от посторонних источников;
- динамические усилия, возникающие при взаимодействии проводников с током;
- коммутационные перенапряжения.

Большое влияние оказывают также условия окружающей среды: температура и влажность воздуха, загрязненность и запыленность.

В эксплуатации при работе оборудования и проводников в послеаварийном режиме, а также при росте нагрузок оценки нагрева изделий необходимы, чтобы исключить их длительную перегрузку, влияющую на ресурс работы.

2.1. Нагрев проводников

Наибольшее распространение в качестве проводников в системах электроснабжения получили изолированные провода и кабели. Температура их токоведущих жил характеризует степень нагрева проводника. Нагрев (температура) изоляции или оболочек рассматривается отдельно.

Под *превышением нагрева* проводников (перегревом) понимается разность между температурой жил и температурой среды, в которой проложены проводники вместе с их изолирующими и защитными оболочками или трубами.

Установившимся нагревом (или установившимся превышением нагрева) считается такой нагрев (или превышение нагрева), величина которого неизменяется или изменяется в незначительных пределах (см. раздел 1.1).

Пример 2.1.

В помещении с температурой 25°С проложены проводники. Через 60 мин после включения оборудования проводники нагрелись до 55°С. Дальнейшего роста температуры не наблюдалось.

Решение.

В этом случае:

- температура среды $\theta_{ср} = 25°C$;
- установившийся нагрев проводников (жил) $\theta_{ж} = 55°C$;
- установившееся превышение нагрева проводников

$$\theta_{уст.\ н} = \theta_{ж} - \theta_{ср} = 55 - 25 = 30°C.$$

2.1.1. Установившийся нагрев проводника при длительной нагрузке

Часть передаваемой по проводникам электрической энергии преобразуется в тепловую. В начальный момент времени она расходуется на повышение температуры проводника, а затем – на поддержание ее установившегося значения.

Количество выделяемого тепла пропорционально квадрату тока и активному сопротивлению проводника ($I^2 \cdot r$). Рассеиваемое тепло определяется тепловым сопротивление конструкции при передаче тепла от токоведущей жилы и рассеивающей поверхности, площадью этой поверхности и коэффициентом теплоотдачи, определяющих способность изделия рассеивать тепло. Увеличение температуры проводника при работе сопровождается ростом активного сопротивления его жилы, следовательно, и количеством выделяющегося тепла. Возросший при этом перепад между температурой проводника и окружающей среды способствует улучшению рассеивания тепла поверхностью, то есть рост выделяющегося количества тепла в какой-то степени компенсируется увеличением теплоотдачи. В связи с этим, при длительном режиме работы проводника и токе, не превышающем длительно допустимый, в первом приближении можно считать сопротивление проводника и коэффициент теплоотдачи постоянными. При таком допущении перегрев проводника пропорционален только I^2. Зная установившуюся величину превышения нагрева $\theta_{уст.\ нI_1}$ при какой-либо длительной нагрузке I_1, можно рассчитать $\theta_{уст.\ нI_2}$ для любой другой длительной нагрузки I_2:

$$\theta_{уст.нI_2} = \theta_{уст.нI_1}\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2. \qquad (2.1)$$

Учет в расчетах тепловых потоков, условий окружающей среды и термических характеристик почвы рассмотрен в [11].

В таблице 2.1 приведены допустимые температуры нагрева проводников при длительно допустимой токовой нагрузке $I_{доп}$. Рекомендации по определению $I_{доп}$ с учетом способа прокладки и температуры окружающей среды $\theta_{ср}$ приведены в [1, 12]. На основе этих данных можно определить величину установившегося превышения нагрева:

$$\theta_{уст.нI_{доп}} = \theta_{доп.ж} - \theta_{ср}. \qquad (2.2)$$

Таблица 2.1.

Допустимая температура нагрева проводников, °С

Проводник и его изоляция	Длительная температура нагрева	Кратковременная температура нагрева при перегрузках	Температура нагрева при токах КЗ в проводниках	
			медном	алюминиевом
Неизолированные провода и шины	70	125	300	200
Провода и кабели с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией	55/65*	100/110*	150	150
Кабели с полиэтиленовой изоляцией	65	72	120	120
Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена	90	130	250	250
Кабели с бумажной пропитанной изоляцией:				
до 3 кВ	70-80	125	200	200
6 кВ	65	110	200	200
10 кВ	60	90	200	200
35 кВ	50	75	125	125

* – теплостойкая резина.

Располагая справочными данными по $I_{доп}$ и значениями $\theta_{уст.нI_{доп}}$ при длительной нагрузке этим током, можно оценить установившееся превышение нагрева проводника $\theta_{уст.нI}$ при длительной нагрузке его током I, отличающимся от $I_{доп}$:

$$\theta_{уст.нI} = \theta_{уст.нI_{доп}} \left(\frac{I}{I_{доп}} \right)^2 . \qquad (2.3)$$

Пример 2.2.

Три одножильных провода с алюминиевыми жилами 6 мм^2 и резиновой изоляцией при прокладке в одной трубе допускают длительную нагрузку $I_{доп}$ = 32 А. При температуре окружающей среды $\theta_{ср}$ = 25°С допустимая температура нагрева жил составляет $\theta_{доп.ж}$ = 65°С. Определить, до какой температуры нагреются провода, если в аварийном режиме установится длительная нагрузка 46 А.

Решение.

При длительной нагрузке проводников током 32 А установившееся превышение нагрева по (2.2) составит:

$$\theta_{уст.нI_{доп}} = \theta_{доп.ж} - \theta_{ср} = 65 - 25 = 40°\text{С}.$$

Если проводники нагрузить длительно током 46 А, то установившееся превышение нагрева по (2.3) достигнет:

$$\theta_{уст.нI} = \theta_{уст.нI_{доп}} \left(\frac{I}{I_{доп}} \right)^2 = 40 \left(\frac{46}{32} \right)^2 = 83°\text{С},$$

а установившийся нагрев (температура жил):

$$\theta_{ж} = 83 + 25 = 108°\text{С}.$$

2.1.2. Изменение превышения нагрева проводника при переменной нагрузке

Процесс нагрева трехжильного проводника током I описывается дифференциальным уравнением теплового баланса:

$$3I^2 r_0 dt = Cd\theta + A\theta dt , \qquad (2.4)$$

где r_0 – погонное сопротивление жилы проводника, Ом/км;

C – теплоемкость 1 км проводника, Вт·с/(град·км);

θ – температура перегрева проводника относительно окружающей среды, °С;

A – коэффициент теплоотдачи, Вт/(град·км);

t – время, с.

Уравнение (2.4) можно преобразовать к более удобному для решения виду:

$$\frac{C}{A}\frac{d\theta}{dt} + \theta = \frac{3I^2 r_0}{A} \qquad (2.5)$$

или

$$\tau \frac{d\theta}{dt} + \theta = \theta_m , \qquad (2.6)$$

где $\tau = C/A$ – постоянная времени нагрева проводника, с (физический смысл этой величины дан в разд. 1.1);

$\theta_m = \dfrac{3I^2 r_0}{A}$ – максимальная температура перегрева проводника при токе I.

Решением уравнения (2.6) является:

$$\theta(t) = \theta_m \left(1 - \exp\left(-\,t/\tau\right)\right) + \theta_0 \exp\left(-\,t/\tau\right), \qquad (2.7)$$

где θ_0 – начальная температура перегрева проводника.

Распространенными случаями, отражающими тепловой режим проводников при работе, являются их нагрев от $\theta_{уст.\ нI} = 0$ до установившейся величины при неизменной нагрузке и изменение превышения нагрева после отключения нагрузки. Для них тепловые процессы описываются не суммой приведенных в (2.7) экспонент, а отдельными слагаемыми.

Изменение превышения нагрева проводника от нуля до установившейся величины при неизменной нагрузке. Температура проводника, длительно не нагружавшегося током, равна температуре окружающей среды, то есть перегрев $\theta_{уст.\ нI} = 0$. Включение электроприемника сопровождается нагревом проводника, процесс изменения которого описывается выражением (2.7) при $\theta_0 = \theta_{уст.\ нI} = 0$:

$$\theta(t) = \theta_{уст.\ нI} \left(1 - \exp\left(-\,t/\tau\right)\right), \qquad (2.8)$$

где $\theta(t)$ – превышение нагрева проводника (перегрев) в момент времени t после включения нагрузки;

$\theta_{уст.\ нI}$ – установившееся превышение нагрева при токе I (определяется по соотношению (2.3)).

Графически изменение перегрева от времени приведено на рис. 2.1.

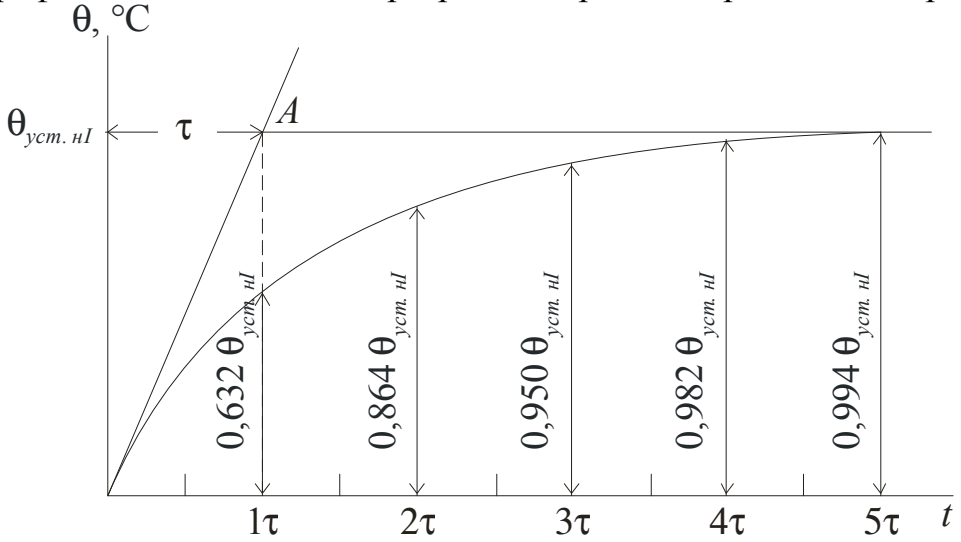


Рис. 2.1. Изменение превышения нагрева проводника от нуля до установившейся величины при неизменной нагрузке

Практически установившаяся величина превышения нагрева достигается за время $t = 3\tau$ (ошибка не превышает 5%). Значения τ для некоторых проводников и условий прокладки приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Значения τ для проводов и кабелей с медными жилами

Площадь сечения медной жилы, мм^2	Постоянные времени нагрева проводов с резиновой изоляцией, мин				Постоянные времени нагрева трехжильных бронированных кабелей с бумажной изоляцией на 1…10 кВ, мин	
	одножильных, проложенных открыто на опорах	двухжильных	трехжильных	четырехжильных	проложенных в земле	проложенных на воздухе
		проложенных в одной трубе				
4	2,4	2,5	3	4	6	18
6	3	4	4,75	6,25	7,2	19,1
10	4,2	6,75	7,5	9,5	8,4	20,6
16	5,6	9,3	11	13,7	10,8	21,6
25	7,2	13	15,7	19,5	12	26,4
35	9	15,7	19,5	24	14,4	28,8
50	12	19	23,5	28,3	18	32,4
70	15	22	27,5	33	21,6	32,4
95	18,4	26,3	32	37,5	26,4	43
120	21,4	29,5	35,8	42	30	48
150	24,4	33,5	42	47	34,7	53
185	—	—	—	—	40	60
240	—	—	—	—	45	90

Примечание: для проводов и кабелей с алюминиевыми жилами при одинаковой площади сечения с медными жилами, одинаковой конструкции изолирующих и защитных покровов и одинаковом способе прокладки постоянную времени нагрева можно принять: для оголенных проводов $\tau_{Al} = 0{,}7\ \tau_{Cu}$; для изолированных проводов $\tau_{Al} = 0{,}85\ \tau_{Cu}$; для кабелей $\tau_{Al} = 0{,}9\ \tau_{Cu}$; где τ_{Al} и τ_{Cu} – постоянные времени нагрева проводов и кабелей с алюминиевыми и медными жилами соответственно.

Пример 2.3.

Резервная трехфазная линия из трех одножильных медных проводников сечением 150 мм^2 с резиновой изоляцией в нормальном режиме не несет нагрузки. Температура проводников равна температуре окружающей среды $\theta_{ср} = 25°C$. В аварийном режиме к линии подключается нагрузка, в 2,6 раза превышающая допустимую ($I/I_{доп} = 2{,}6$). Оценить, как быстро и до какой величины возрастет превышение нагрева проводников.

Решение.

Данные для расчета и расчет сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3.

Решение примера 2.3

$\theta_{ср}$	25°C				Задано
$\theta_{доп.\ ж}$	65°C				Определяется по таблице 2.1
$\theta_{уст.\ н\ I_{доп}}$	40°C				Определяется по уравнению (2.2)
$I/I_{доп}$	2,6				Задано
$\theta_{уст.\ н\ I}$	$40 \cdot 2{,}6^2 = 270$°C				По уравнению (2.3)
τ, мин	42				Определяется по таблице 2.2
t, мин	4	8	12	16	Выбирается произвольно
t / τ	0,1	0,2	0,3	0,4	Рассчитывается
$1 - \exp(-t/\tau)$	0,095	0,18	0,26	0,33	Рассчитывается
$\theta(t)$	270·0,095 =25,5°C	270·0,18= 48,5°C	270·0,26= 70°C	270·0,33= 90°C	По уравнению (2.8)

Температура жилы определяется: $\theta_{ж} = \theta(t) + \theta_{ср}$. Продолжая расчет для больших t, можно выявить полную картину нагрева: превышение нагрева до 100°C может быть достигнуто через 19 мин, а 200°C – через 55 мин.

В начальный момент времени выделяемое в проводнике тепло расходуется на повышение его температуры (отвод незначителен) и превышение нагрева возрастает быстро, почти пропорционально времени. Поэтому для $t / \tau \le 0{,}1$ расчет $\theta(t)$ можно вести по соотношению:

$$\theta(t) = \theta_{уст.\ нI} \cdot \frac{t}{\tau}. \qquad (2.9)$$

Пример 2.4.

Для линии, описанной в примере 2.3, определить $\theta(t)$ по соотношению (2.9) для $t = 4$ мин. Результат сравнить с расчетом по (2.8).

Решение.

Расчет по (2.9) для случая $t = 4$ мин ($t / \tau \approx 0{,}1$) дает:

$$\theta(t) = 270 \cdot 0{,}1 = 27\text{°C},$$

что составляет около 106% от значения 25,5°C, полученное в таблице 2.3 из расчета по соотношению (2.8). Для $t < 4$ мин ошибка будет еще меньше.



Рис. 2.2. Изменение превышения нагрева проводника после отключения нагрузки

Отключение нагрузки. Перегрев проводника, находящегося длительное время под неизменной нагрузкой, достигает установившегося значения. Отключение нагрузки приведет к его охлаждению. Процесс снижения температуры представлен на рис. 2.2.

Уравнение кривой охлаждения является частным случаем уравнения (2.7) и имеет вид:

$$\theta(t) = \theta_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \qquad (2.10)$$

так как установившее превышение нагрева $\theta_m = \theta_{уст.\ н}$ должно стать равным нулю. В соотношении (2.10) θ_0 – превышение нагрева, которое имел проводник в момент отключения нагрузки.

Полный нагрев проводника в любой момент времени t после отключения нагрузки равен превышению нагрева, определенному по уравнению (2.10), плюс температура окружающей среды.

Пример 2.5.

Проложенный в земле трехжильный кабель на 3 кВ с бумажной изоляцией и медными жилами сечением 120 мм^2 перенес сквозной ток короткого замыкания, при котором его жилы были нагреты до $\theta_{ж} = 215$°С. Защита отключила кабель. Определить превышение нагрева жил кабеля через 15, 30, 60, 90, 120 и 150 мин после отключения нагрузки.

Решение.

Постоянная времени нагрева кабеля составляет $\tau = 30$ мин (табл. 2.2), допустимая температура нагрева $\theta_{доп.\ ж} = 80$°С (табл. 2.1), а температура окружающей среды $\theta_{ср} = 15$°С [1]. Перегрев жил в момент отключения равен:

$$\theta_0 = \theta_{ж} - \theta_{ср} = 215 - 15 = 200\text{°С}.$$

Превышение нагрева кабеля через указанное время t находится по соотношению (2.10). Результаты представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4.

Изменение превышения нагрева кабеля после отключения нагрузки (к примеру 2.5)

Заданный или расчетный параметр	Численное значение					
t, мин	15	30	60	90	120	150
t / τ	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
$\exp(-t / \tau)$	0,607	0,368	0,136	0,050	0,018	0,006
$\theta(t) = 200 \cdot \exp(-t / \tau)$, °С	121,4	73,6	27,2	10	3,6	1,2

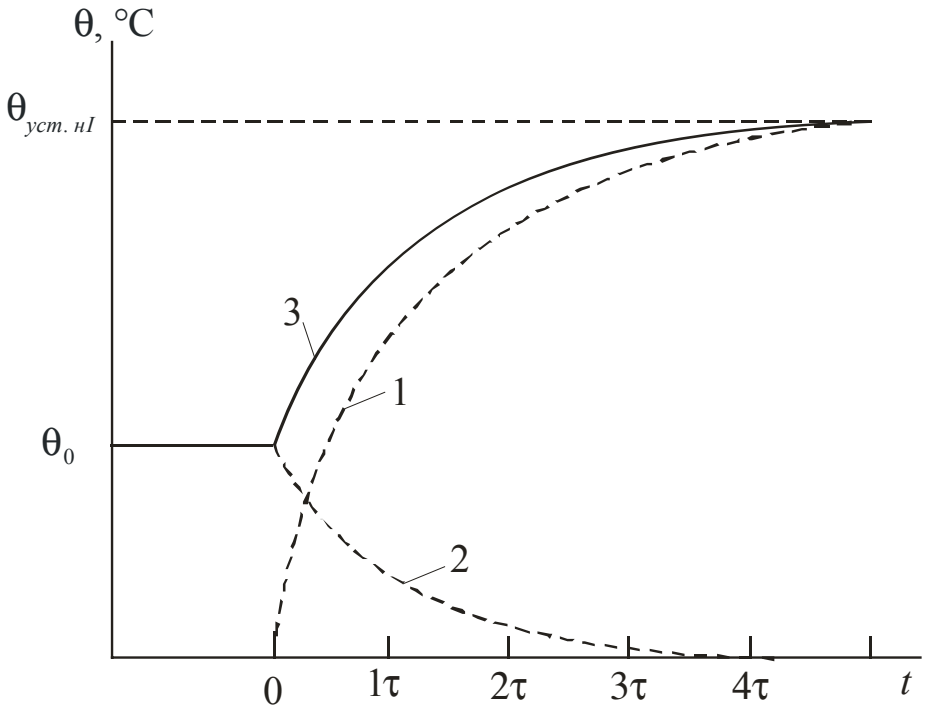
Расчет показывает, что после отключения тока КЗ превышение нагрева кабеля снизится до длительно допустимой температуры 80°С ($\theta_{доп.\ ж} = \theta(t) + \theta_{ср} = 65 + 15$) через 34 мин, а полностью он остынет через 2–2,5 часа.

Переменная нагрузка. Для нагруженного током I_0 проводника, имеющего перегрев θ_0, изменение нагрузки до I сопровождается изменением установившейся величины превышения нагрева, которая с течением времени вновь достигнет установившегося значения $\theta_{уст.\ нI}$. Величину $\theta_{уст.\ нI}$ можно определить либо по (2.1) на основе данных I / I_0 и величины θ_0, либо, если θ_0 неизвестно, по уравнению (2.3). Процесс изменения превышения нагрева проводника от θ_0 до $\theta_{уст.\ нI}$ легко проанализировать, если рассмотреть его как результат двух независимых одновременно протекающих процессов.

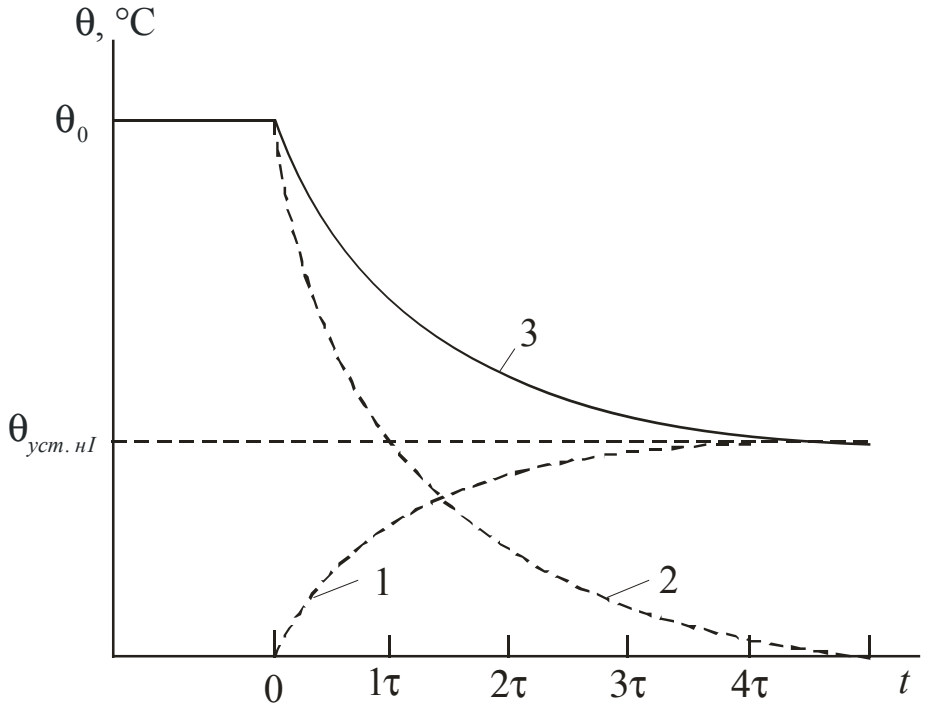
Процесс 1. Проводник был нагружен током I_0 и имел установившееся превышение нагрева θ_0. В момент времени $t = 0$ (рис. 2.3) нагрузка I_0 была отключена. Превышение нагрева проводника, обусловленное этой нагрузкой, должно снижаться от θ_0 к нулю по уравнению (2.10), что на рис. 2.3 изображено кривой 2.

Процесс 2. В тот же момент времени $t = 0$, когда была отключена нагрузка I_0, включена другая нагрузка I. Превышение нагрева проводника, обусловленное этой нагрузкой, должно повышаться от нуля до соответствующего этой нагрузке установившегося превышения нагрева $\theta_{уст.\ нI}$ по уравнению (2.8), что на рис. 2.3 изображено кривой 1.

В результате наложения этих двух одновременно протекающих процессов действительный ход изменения превышения нагрева изобразится кривой 3 (рис. 2.3), ординаты которой в любой точке равны сумме ординат кривых 1 и 2. Аналитически оба этих процесса могут быть описаны соотношением (2.7), которое является решением уравнения теплового баланса (2.4).



а)



б)

Рис. 2.3. Изменение превышения нагрева проводника от величины θ_0, соответствующей ранее имевшейся нагрузке I_0, до величины $\theta_{уст.\ нI}$, соответствующей вновь установившейся нагрузке I: а – увеличение превышения нагрева при $I > I_0$; б – снижение превышения нагрева при $I < I_0$

С помощью уравнения (2.7) можно рассчитать и построить кривые изменения превышений нагрева не только, когда одна длительная нагрузка сменяется другой длительной нагрузкой, но и когда нагрузка изменяется относительно быстро и нагрев проводника не успевает достичь установившейся величины.

Пример 2.6.

При обследовании действующей трехфазной линии, питающей 150 электродвигателей металлообрабатывающих станков с общей установленной мощностью 370 кВт и суммой номинальных токов 795 А, за наиболее загруженную смену был получен график нагрузки, показанный на рис. 2.4. Нагрузка измерялась с помощью счетчика активной электроэнергии через каждые 10 мин. В пределах десятиминутного интервала нагрузка постоянна. Средневзвешенное значение коэффициента мощности составляет cosφ = 0,5. Напряжение сети 380 В.

Оценить, можно ли при реконструкции эту трехфазную линию выполнить из трех алюминиевых проводников сечением по 95 мм^2, проложенных в одной водогазопроводной трубе, если для такой линии длительно допустимая нагрузка $I_{доп} = 200$ А при температуре окружающей среды $\theta_{ср} = 25°C$ и длительно допустимом нагреве $\theta_{доп.\,ж} = 65°C$. Проверить, будут ли такие проводники перегреваться или неэффективно использоваться.

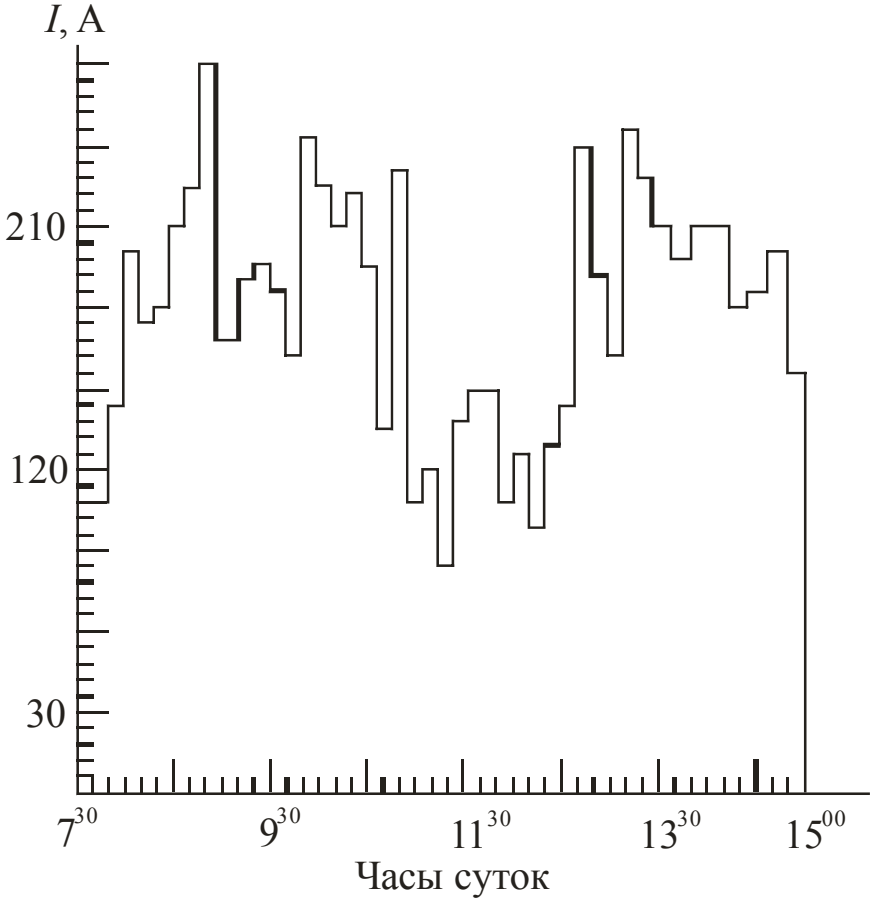


Рис. 2.4. График нагрузки трехфазной линии, питающей электродвигатели металлообрабатывающих станков (к примеру 2.6)

Решение.

Из графика видно, что нагрузка меняется через каждые 10–20 мин, то есть в такие моменты времени превышение нагрева проводников θ_0 не равно нулю. Расчет для каждого десятиминутного интервала выполняется по уравнению (2.7). Исключение составляет первый интервал. Он подробно рассмотрен ниже.

В таблице 2.5 приведен расчет изменения перегрева проводников для первых интервалов графика.

Таблица 2.5.

Изменение превышения нагрева проводников (к примеру 2.6)

Десятиминутный интервал (часы суток)	Нагрузки в десятиминутном интервале, I, А	$\frac{I}{I_{доп}}$	$\theta_{уст.нI} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) + \theta_0 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) = \theta(t)$				
1	2	3	4	5	6	7	8
$7^{30} – 7^{40}$	110	0,55	12	0,308	0	0,692	3,7
$7^{40} – 7^{50}$	110	0,55	12	0,308	3,7	0,692	6,3
$7^{50} – 8^{00}$	144	0,72	21	0,308	6,3	0,692	10,9
$8^{00} – 8^{10}$	200	1,00	40	0,308	10,9	0,692	19,8
$8^{10} – 8^{20}$	175	0,875	31	0,308	19,8	0,692	23,6
$8^{20} – 8^{30}$	180	0,90	32	0,308	23,6	0,692	26,0
$8^{30} – 8^{40}$	210	1,05	44	0,308	26,0	0,692	31,6
$8^{40} – 8^{50}$	225	1,13	51	0,308	31,6	0,692	37,8
$8^{50} – 9^{00}$	270	1,35	73	0,308	37,8	0,692	48,6
$9^{00} – 9^{10}$	165	0,825	27	0,308	48,6	0,692	41,9
$9^{10} – 9^{20}$	190	0,95	36	0,308	41,9	0,692	40,0
$9^{20} – 9^{30}$	195	0,98	38	0,308	40,0	0,692	39,3

Столбцы 1 и 2. Содержат десятиминутные интервалы и определенные по графику (рис. 2.4) соответствующие им нагрузки I.

Столбец 3. По нагрузке I (столбец 2) и заданному значению $I_{доп}$ = 200 А для каждого интервала рассчитывается $I / I_{доп}$.

Столбец 4. По уравнению (2.2) определяется $\theta_{уст.нI_{доп}} = \theta_{доп.ж} - \theta_{ср} = 65 - 25 =$ = 40°С, а по (2.3) и данным столбца 3 находится значение той установившейся величины превышения нагрева $\theta_{уст.нI}$, которого достигли бы проводники, если бы нагрузка рассматриваемого десятиминутного интервала длительно не изменялась.

Столбцы 5 и 7. По таблице 2.2 с учетом примечания для алюминиевых проводов сечением 3×95 мм^2 при прокладке их в одной трубе постоянная времени нагрева $\tau = 0{,}85 \cdot 32 = 27$ мин. Рассматриваемый график имеет интервалы продолжительностью по 10 мин, следовательно, для каждого из них:

$$\frac{t}{\tau} = \frac{10}{27} = 0{,}37;$$

$$\left(1-\exp\left(-\,t/\tau\right)\right)=0{,}308;$$

$$\exp\left(-\,t/\tau\right)=0{,}692.$$

Столбец 6. Величина превышения нагрева, которого достигли проводники к моменту изменения нагрузки, то есть в начале каждого десятиминутного интервала (θ_0), определяется:

- для первого интервала предполагается, что к началу обследования линии проводники не были нагружены током, то есть их температура равна температуре окружающей среды, а $\theta_0 = 0$;
- для каждого последующего интервала значение θ_0 равно тому превышению нагрева $\theta(t)$, которого достигли проводники к концу предыдущего интервала (см. столбец 8).

Столбец 8. Располагая данными столбцов 4–7, по уравнению (2.7) определяется превышение нагрева $\theta(t)$ проводников к концу каждого десятиминутного интервала. Результаты расчета изображены в виде кривой 1 на рис. 2.5. По нагреву выбранные проводники используются удовлетворительно.

Для случая, когда к началу обследования линии перегрев проводников отличен от $\theta_0 = 0$ и составляет, например $\theta_0 = 40$°С, расчет показан на рис. 2.5 кривой 2. Из сопоставления кривых 1 и 2 видно, что для проводников, длительно работающих с переменным графиком нагрузки, их температура в начальный момент времени существенно на расчет не влияет. К концу временного интервала (3–4)τ результаты расчета практически совпадают. Точное значение θ_0 необходимо только для определения нагрева проводников в начальный период графика нагрузки.

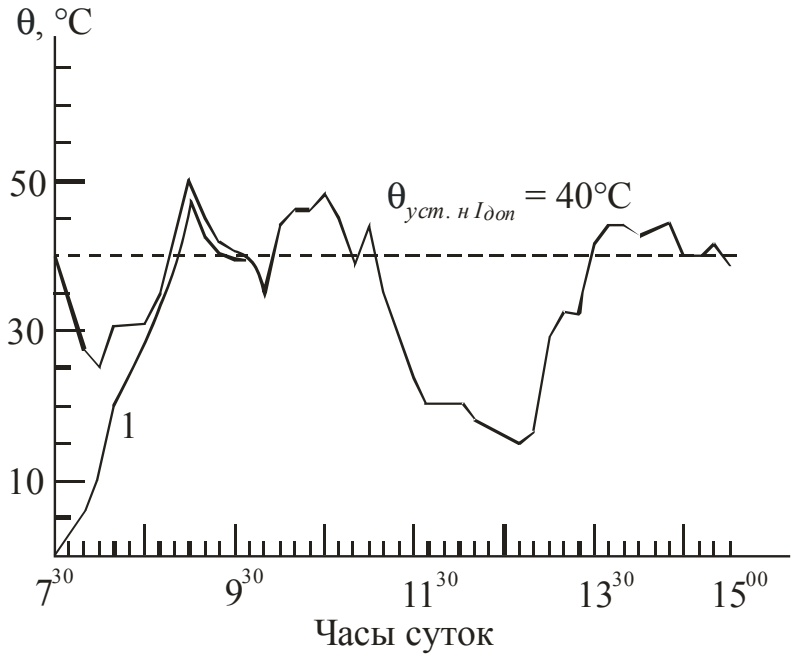


Рис. 2.5. Изменение превышения нагрева алюминиевых проводников 3×95 мм^2, проложенных в одной водогазопроводной трубе (загрузка линии по графику рис. 2.4): 1 – при отсутствии предшествующего нагрева проводников ($\theta_0 = 0$); 2 – при предшествующем нагреве, равном длительно допустимой температуре ($\theta_0 = 40$°С)

2.1.3. Учет постоянной времени нагрева при выборе сечения проводников

Выбор проводников и оборудования электрической сети предприятия производится по расчетной нагрузке. При ее определении действительная переменная по значению нагрузка узла заменяется такой максимальной по значению постоянной нагрузкой, которая эквивалентна фактической нагрузке по максимальной температуре нагрева проводников или по тепловому износу изоляции. То есть расчетная нагрузка – это максимальная усредненная за определенный интервал времени нагрузка. Интервал усреднения определяется постоянной времени нагрева проводников. Для проводников малых и средних сечений τ составляет около 10 мин (табл. 2.2), а за время $t = 3\tau$ их нагрев достигается практически установившегося значения. Поэтому интервал усреднения расчетной максимальной нагрузки принят равным 30 мин (получасовой максимум):

$$P_{расч} = P_{30'}. \qquad (2.11)$$

Проводники больших сечений и мощное электрооборудование систем электроснабжения имеют $\tau > 10$ мин, их выбор по $P_{расч} = P_{30'}$ дает завышенные значения сечений токоведущих частей. «Руководящие указания по электроснабжению промышленных предприятий» допускают это как некоторый запас. Исключение составляет трансформаторы. Для них τ = 1,5–3 ч и более, соответственно и интервал усреднения получается равным 4,5–9 часов. Поэтому за расчетную нагрузку при выборе трансформаторов принимают среднюю нагрузку за максимально загруженную смену:

$$P_{расч.тр} = P_{см}. \qquad (2.12)$$

При необходимости более точного учета влияния постоянной времени нагрева $\tau > 10$ мин, например, при выборе площади сечения кабелей 70 мм^2 и больше, можно определить уточненное значение коэффициента максимума нагрузки $K_{м\,уточ}$ и через него – расчетную мощность $P_{расч.\,t}$. Порядок расчета:

- по таблице 2.2 определяется постоянная времени нагрева и рассчитывается время усреднения нагрузки $t = 3\tau$;
- определяется уточненное значение коэффициента максимума нагрузки для t-часового максимума нагрузки:

$$K_{м\ уточ} = 1 + \frac{K_м - 1}{\sqrt{2t}}, \qquad (2.13)$$

где $K_м$ – коэффициент максимума, рассчитанный для получасового максимума нагрузки (определяется по таблице или кривым [1, 2]);

t – время усреднения нагрузки, ч;

- определяется $P_{расч.\ t}$ для t-часового максимума:

$$P_{расч.\ t} = K_{м\ уточ} \cdot P_{см}. \qquad (2.14)$$

Для проводов и кабелей с алюминиевыми жилами τ определяется по таблице 2.2 с учетом примечания.

Пример 2.7.

Кабельная линия питает группу электроприемников, для которой $n_{эф} = 8$, а $K_и = 0{,}4$. Линия проложена на воздухе трехжильным бронированным кабелем с медными жилами 3×150 мм^2 и бумажной изоляцией. Выбор сечения жил кабеля выполнен без учета действительного значения постоянной времени нагрева. Оценить запас этой линии для дальнейшего наращивания нагрузки.

Решение.

1. Для кабелей с площадью сечения жил 150 мм^2 постоянная времени нагрева τ составляет 53 мин (табл. 2.2), а время усреднения нагрузки:

$$t = 3\tau = 3 \cdot 53 = 159 \text{ мин} \approx 2{,}5 \text{ ч}.$$

2. По [1] коэффициент максимума для получасового максимума нагрузки $K_м = f(n_{эф}, K_и)$ и равен 1,5.

3. Для 2,5-часового максимума нагрузки уточненное значение коэффициента максимума составит:

$$K_{м\ учточ} = 1 + \frac{K_м - 1}{\sqrt{2t}} = 1 + \frac{1{,}5 - 1}{\sqrt{2 \cdot 2{,}5}} = 1 + \frac{0{,}5}{\sqrt{5}} \approx 1{,}23.$$

4. Без учета действительного значения постоянной времени нагрева:

$$P_{расч} = P_{30'} = K_м \cdot P_{см} = 1{,}5 P_{см},$$

где $P_{см}$ – средняя нагрузка за максимально загруженную смену.

5. Для 2,5-часового максимума нагрузки расчетная нагрузка составит:

$$P_{расч.\ 2{,}5ч} = K_{м\ уточ} \cdot P_{см} = 1{,}23 P_{см}.$$

6. Завышение расчетной нагрузки:

$$\delta = \frac{1{,}5 P_{см}}{1{,}23 P_{см}} = 1{,}22,$$

соответственно завышается и площадь сечения жил кабеля.

2.2. Тепловой режим трансформаторов

2.2.1. Тепловая диаграмма трансформатора

Тепловой режим находящегося под нагрузкой трансформатора характеризуется тепловой диаграммой, которая показывает изменение температуры масла и обмотки по высоте трансформатора. Для трансформаторов с естественным масляным охлаждением (М) и с масляным охлаждением с дутьем и естественной циркуляцией масла (Д) тепловая диаграмма показана на рис. 2.6, а, а для трансформаторов с масляным охлаждением с дутьем и принудительной циркуляцией масла через воздушные охладители (ДЦ) и масляно-водяным охлаждением с принудительной циркуляцией масла и воды (Ц) – на рис. 2.6, б.

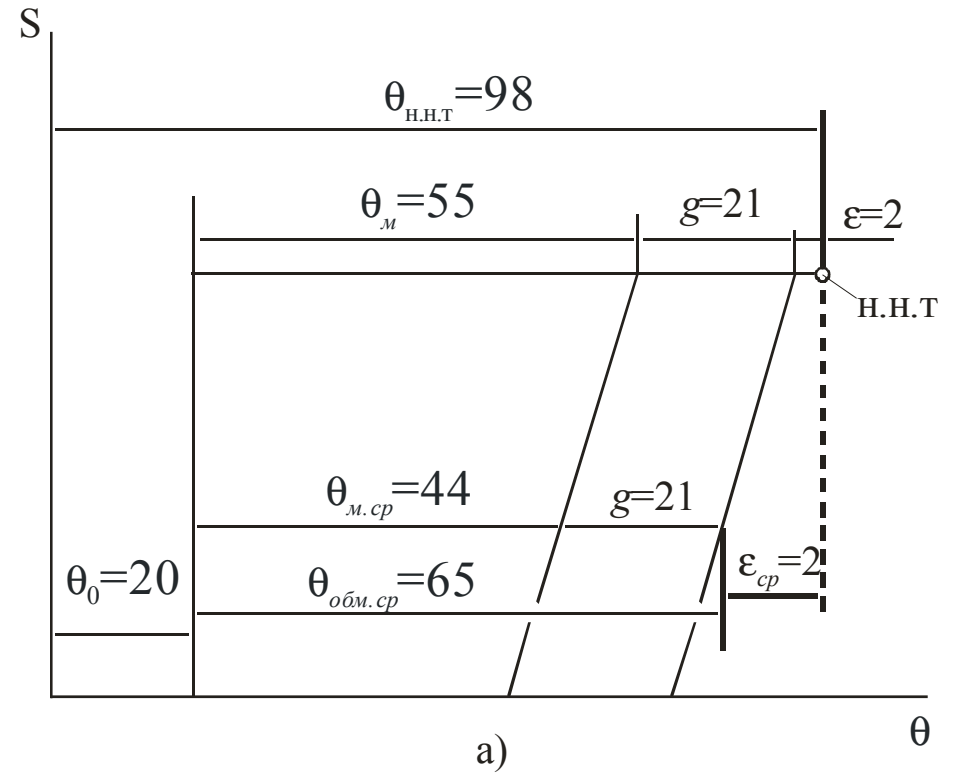
Независимо от системы охлаждения установлены нормированные значения:

- температуры охлаждения среды θ_0;
- превышения температуры масла над температурой охлаждающей среды (в верхних слоях масла $\theta_м$ и в средней по высоте части трансформатора $\theta_{м.ср}$);
- превышения температуры обмотки в верхних слоях масла $\theta_{обм}$ и в средней части трансформатора (средняя температура обмотки) $\theta_{обм.\ ср}$;
- температуры обмотки в наиболее нагретой точке (н.н.т) $\theta_{обм.\ н.н.т}$ и соответствующего превышения температуры $\Delta\theta_{обм.\ н.н.т}$;
- превышения температуры в наиболее нагретой точке обмотки над средней температурой обмотки $\varepsilon_{ср}$ и над температурой обмотки в верхних слоях масла ε;
- градиента превышения температуры обмотки над температурой масла g.

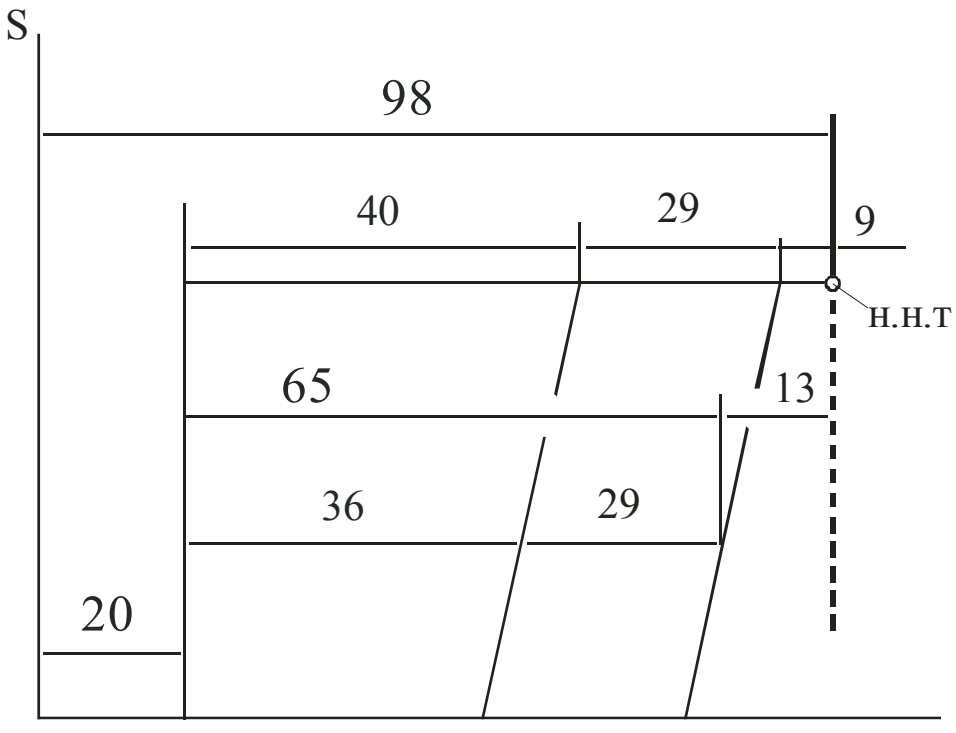
При систематических нагрузках максимально допустимая температура масла в верхних слоях составляет 95°С, а при аварийных перегрузках – 115°С, нормированное (базовое) значение температуры обмотки в наиболее нагретой точке – 98°С.

На максимально допустимую температуру в наиболее нагретой точке обмотки установлены ограничения:

- 160°С – для аварийных перегрузок трансформаторов на 110 кВ и ниже;
- 140°С – для аварийных перегрузок трансформаторов на 110 кВ и выше;
- 140°С – для систематических нагрузок.



а)



б)

Рис. 2.6. Тепловые диаграммы трансформаторов:
а – с системами охлаждения М и Д;
б – с системами охлаждения ДЦ и Ц

Максимально возможные систематические перегрузки – 1,5, аварийные – 2,0. Максимально допустимые систематические нагрузки и аварийные перегрузки трансформаторов определяются по таблицам в зависимости от длительности перегрузки и соотношения начальной и повышенной нагрузок.

При отклонении режима трансформатора от номинального возникает необходимость расчета температуры обмотки и масла.

Для трансформаторов справедливо соотношение:

$$\theta_м = \Delta P^m, \tag{2.15}$$

где ΔP – потери мощности в трансформаторе.

При номинальном режиме потери:

$$\Delta P_{ном} = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз} = \Delta P_{xx}\left(1 + \frac{\Delta P_{кз}}{\Delta P_{xx}}\right) = \Delta P_{xx}(1+d), \tag{2.16}$$

откуда, используя мощность трансформатора в относительных единицах (или коэффициент загрузки трансформатора):

$$\overset{*}{S} = \frac{S}{S_{ном}}, \tag{2.17}$$

где S – фактическая нагрузка трансформатора, можно записать,

$$\begin{aligned}\Delta P = \Delta P_{xx} + \Delta P_{кз}\overset{*}{S}^2 = \Delta P_{xx}\left(1 + d\overset{*}{S}^2\right) = \frac{\Delta P_{xx}(1+d)}{1+d}\left(1 + d\overset{*}{S}^2\right) = \\ = \Delta P_{ном}\frac{1 + d\overset{*}{S}^2}{1+d},\end{aligned} \tag{2.18}$$

тогда

$$\theta_м \approx \theta_{м.ном}\frac{1 + d\overset{*}{S}^2}{1+d}. \tag{2.19}$$

В соотношениях (2.16)–(2.19): ΔP_{xx} – потери холостого хода; $\Delta P_{кз}$ – потери короткого замакания; $d = \Delta P_{кз} \big/ \Delta P_{xx}$; $\overset{*}{S}$ – мощность трансформатора в относительных единицах.

Согласно рекомендациям Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) при расчетах нагрузочной способности трансформаторов принимают $d = 5$, а в (2.15) можно принимать $m = 0{,}9$ для трансформаторов с системой охлаждения М и Д и $m = 1$ для трансформаторов с системами охлаждения ДЦ и Ц.

Температура обмотки в наиболее нагретой точке определяется по соотношению [13]:

$$\theta_{обм.н.н.т} = \theta_м + (g + \varepsilon) \cdot \overset{*}{S}^{2n}, \qquad (2.20)$$

где n = 0,8 для трансформаторов с системой охлаждения М и Д;

n = 0,9 для трансформаторов с системой охлаждения ДЦ и Ц;

g, ε – определяются по тепловой диаграмме трансформатора (см. рис. 2.6)

Пример 2.8.

Определить температуру в наиболее нагретой точке обмотки трансформатора ТМ-6300/35 при его длительной 20% перегрузке. Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой охлаждающей среды при номинальном режиме составляет 55°С.

Решение.

При температуре охлаждающей среды 20°С и номинальном режиме работы трансформатора температура масла не будет превышать 20 + 55 = 75°С. Длительная 20% перегрузка приведет к его нагреву до:

$$\theta_м = \theta_{м.ном} \frac{1 + d \cdot \overset{*}{S}^2}{1 + d} = 75 \frac{1 + 5 \cdot 1{,}2^2}{1 + 5} = 102{,}5\ °\text{C}.$$

Температура в наиболее нагретой точке обмотки определяется по соотношению (2.20) и тепловой диаграмме, приведенной для трансформатора ТМ-6300/35 на рис. 2.6, а:

$$\theta_{обм.н.н.т} = \theta_м + (g + \varepsilon) \cdot \overset{*}{S}^{2n} = 102{,}5 + (21 + 2) \cdot 1{,}2^{2 \cdot 0{,}8} = 133\ °\text{C}.$$

Полученный результат не превышает установленных ограничений на максимально допустимую температуру в наиболее нагретой точке обмотки (160°С для аварийных перегрузок и 140°С для систематических).

2.2.2. Нагрев трансформаторов при неравномерном графике нагрузки

При неравномерном графике нагрузки тепловой режим трансформатора непрерывно изменяется, причем законы изменения температуры масла и температуры обмотки отличаются друг от друга.

Для двухступенчатого графика нагрузки, приведенного на рис. 2.7, превышение температуры масла (индексы «м» опущены) в верхних слоях можно, исходя из уравнения теплового баланса аналогичного (2.4) и рис. 2.7, б, записать:

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \theta_0 + (\theta_{1y} - \theta_0)(1 - \exp(-\Delta t_1 / \tau)); \\ \theta_2 &= \theta_1 + (\theta_{2y} - \theta_1)(1 - \exp(-\Delta t_2 / \tau)); \\ \theta &= \theta_0 + (\theta_{3y} - \theta_2)(1 - \exp(-\Delta t_3 / \tau)); \end{aligned} \qquad (2.21)$$

где θ_{1y}, θ_{2y}, θ_{3y} – установившиеся превышения температуры масла в верхних слоях соответственно при нагрузках трансформатора S_1, S_2, S_3;

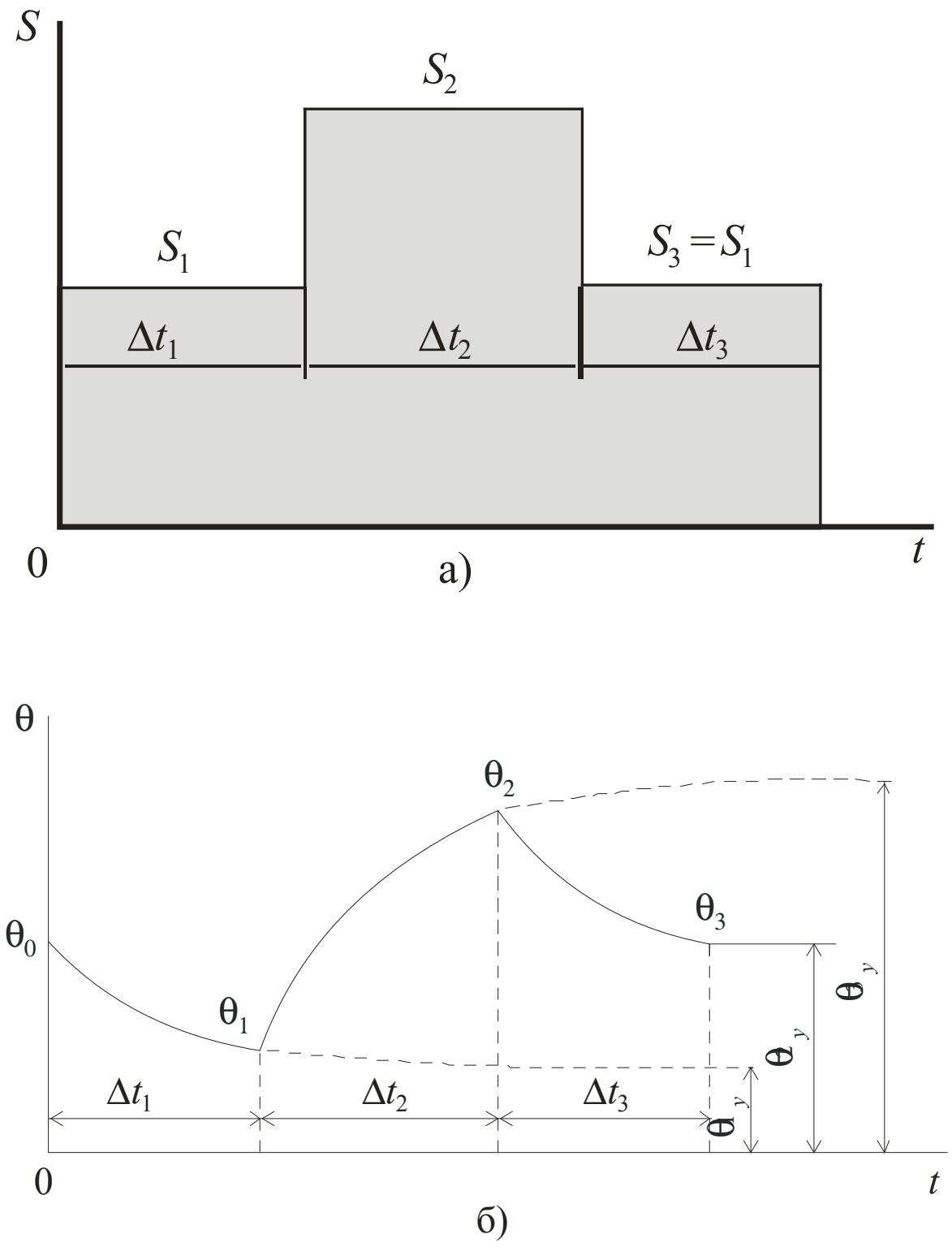


Рис. 2.7. Нагрев масла трансформатора при двухступенчатом графике нагрузки: а – график нагрузки; б – изменение температуры масла

τ – постоянная времени нагрева трансформатора;

Δt – промежуток времени нагрева при нагрузке S_i трансформатора.

Ориентировочно постоянная времени нагрева трансформаторов принимаются по таблице 2.6. Их значения мало изменяются для различных конструкций трансформаторов, так как определяются массами сердечников и обмоток.

Таблица 2.6.

Постоянная времени нагрева трансформаторов [13]

Система охлаждения трансформатора	Номинальная мощность трансформатора, МВА	Постоянная времени нагрева, ч
М	0,001–1 1,6–6,3	2,5 3,5
Д	10–32 40–63	2,5 3,5
ДЦ, Ц	100–125 Более 125	2,5 3,5

Для определения температуры масла при многоступенчатом графике нагрузки трансформатора (рис. 2.8) необходимо составить систему из n уравнений (где n – число ступеней графика), аналогично (2.21), и решить ее при условии, что $\theta_n = \theta_0$. Ее решение позволяет найти начальное повышение температуры масла θ_0 и превышение температуры масла $\theta_æ$ в конце любой ступени æ:

$$\theta_0 = \frac{1}{K_{n-1}} \sum_{i=1}^{n} \theta_{iy} \left(K_i - K_{i-1} \right);$$
$$\theta_ж = \frac{1}{K_ж} \left[\theta_0 + \sum_{i=1}^{n} \theta_{iy} \left(K_i - K_{i-1} \right) \right], \qquad (2.22)$$

где θ_{iy} – установившееся превышение температуры масла в верхних слоях при неизменной нагрузке, равной нагрузке i-го интервала;

n – число ступеней графика нагрузки;

$K_i = \exp(t_i/\tau)$;

t_i – интервал времени от начала графика нагрузки до конца i-й ступени.

Постоянная времени нагрева обмотки значительно меньше постоянной времени нагрева трансформатора и составляет несколько минут. Поэтому можно считать, что температура обмотки в наиболее нагретой точке в моменты ступенчатого изменения нагрузки меняется также скачками от одного установившегося значения к другому, а далее изменяется соответственно изменению температуры масла (рис. 2.9).

Значение $\theta_{обм.\ н.н.т}$ определяется по выражению (2.20).

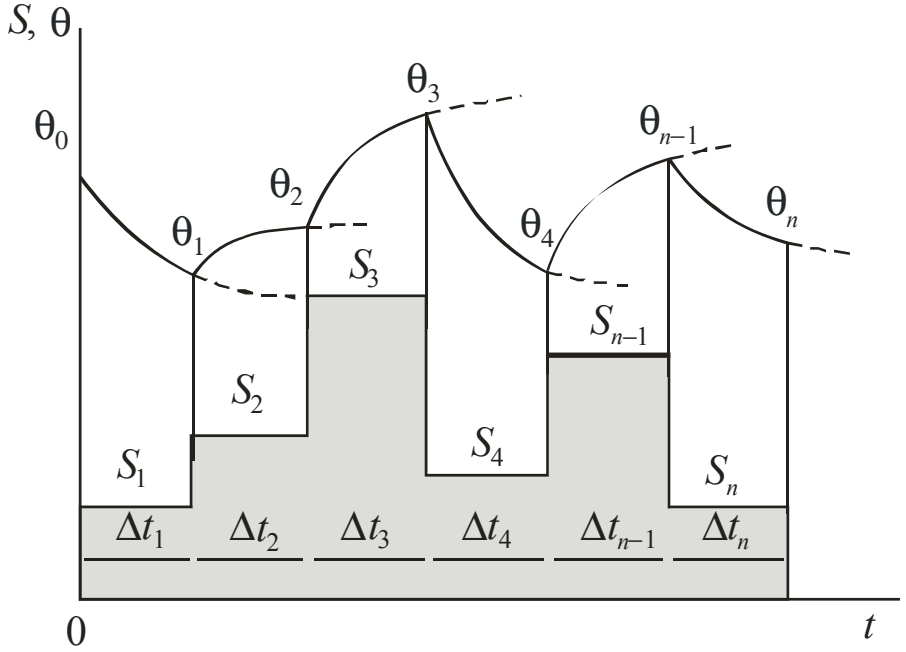
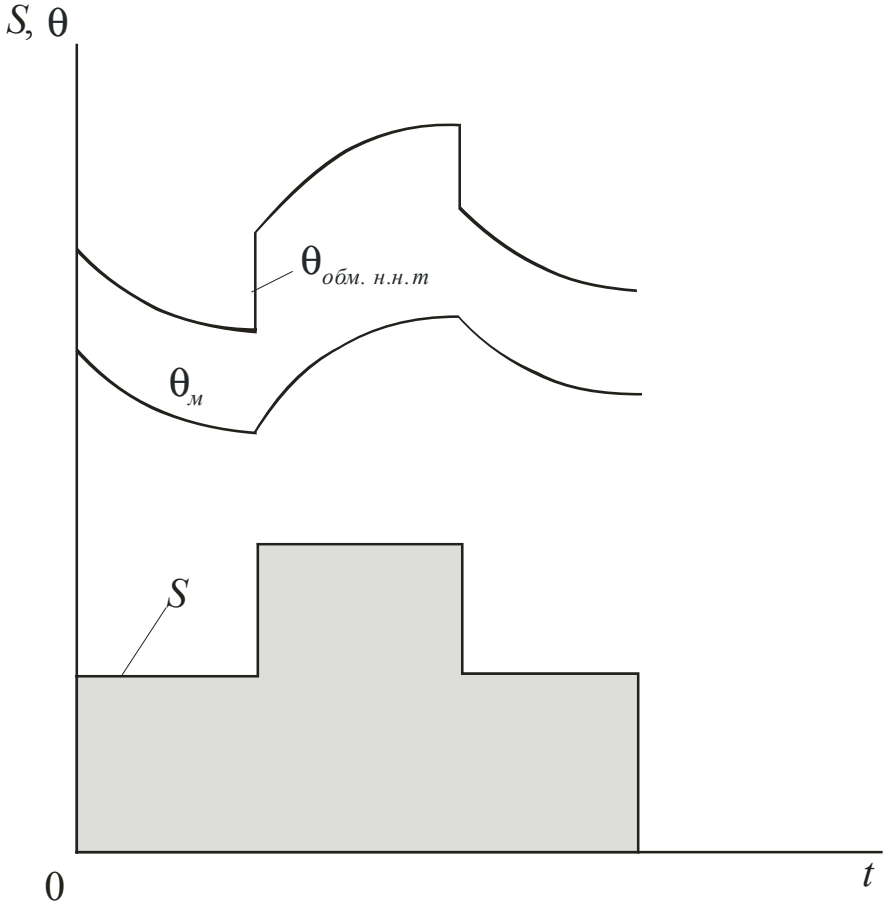


Рис. 2.8. Нагрев масла трансформатора при многоступенчатом графике нагрузки



2.9. Нагрев масла и обмотки трансформатора в наиболее нагретой точке при двухступенчатом графике нагрузки

2.2.3. Нагрузочная способность трансформатора

Номинальная мощность трехфазного трансформатора определяется номинальным током и номинальным напряжением:

$$S_{ном} = \sqrt{3} \cdot U_{ном} \cdot I_{ном} . \qquad (2.23)$$

Расчетный срок службы трансформатора в 25 лет обеспечивается при соблюдении условий:

$$S = S_{ном}; \quad U_c = U_{ном}; \quad \theta_0 = \theta_{о.ном}, \qquad (2.24)$$

где U_c – напряжение сети, к которой подключен трансформатор;

θ_0 – температура охлаждения среды;

S – фактическая нагрузка трансформатора.

Реальные условия эксплуатации трансформаторов отличаются от нормированных. При нарушении одного или нескольких из условий (2.24), то есть:

$$S > S_{ном}; \quad \theta_0 > \theta_{о.ном} = 20^{\circ}\text{C}; \quad U_c > U_{ном}, \qquad (2.25)$$

возникает вопрос о допустимых перегрузках.

Перегрузки по напряжению должны исключаться схемой и режимом работы электрической сети, а также защитными устройствами. Обычно рассматривается только допустимость перегрузок по мощности (току) в условиях изменяющейся температуры охлаждающей среды.

Различают систематические и аварийные перегрузки. Первые могут иметь место систематически при неравномерном суточном графике нагрузки трансформатора, вторые – при аварийной ситуации. Во втором случае требуется обеспечить электроснабжение потребителей, несмотря на наличие перегрузки трансформатора.

Допустимость систематических перегрузок определяется ресурсом изоляции. Ее средний износ должен быть меньше или равен расчетному. В связи с этим вводятся дополнительные ограничения:

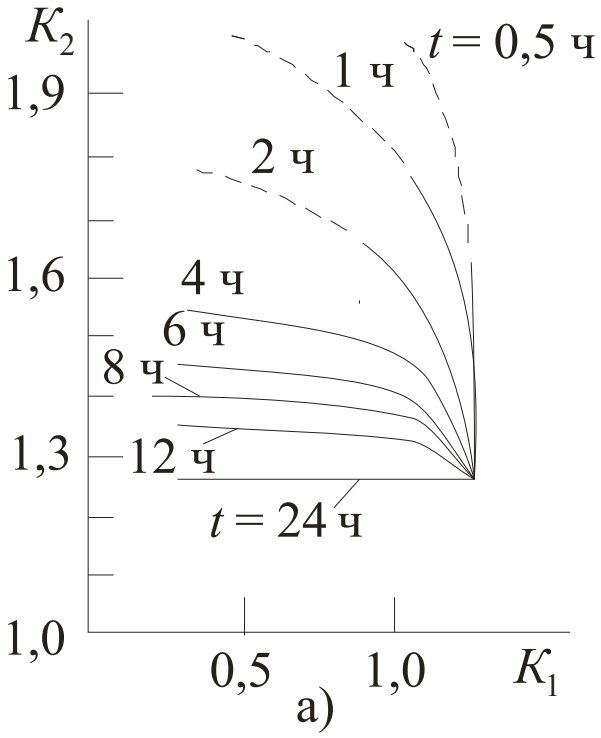
$$\theta_{обм.н.н.т} \le 140^{\circ}\text{C}; \quad \theta_м \le 95^{\circ}\text{C}; \quad S \le 1{,}5 S_{ном} . \qquad (2.26)$$

Последнее из условий (2.26) лимитируется параметрами вводов трансформатора и параметрами устройств РПН (регулирования коэффициента трансформации под нагрузкой) и ПБВ (переключения без возбуждения).

Допустимость аварийных перегрузок лимитируется не износом изоляции, а предельно допустимыми температурами для обмотки и масла:

$$\theta_{обм.н.н.т} \le 140^{\circ}\text{C}; \quad \theta_м \le 115^{\circ}\text{C} . \qquad (2.27)$$

На рис. 2.10 в качестве примера приведены графики нагрузочной способности масляных трансформаторов с системами охлаждения М и Д. Более подробная информация о подобных графиках содержится в [13].



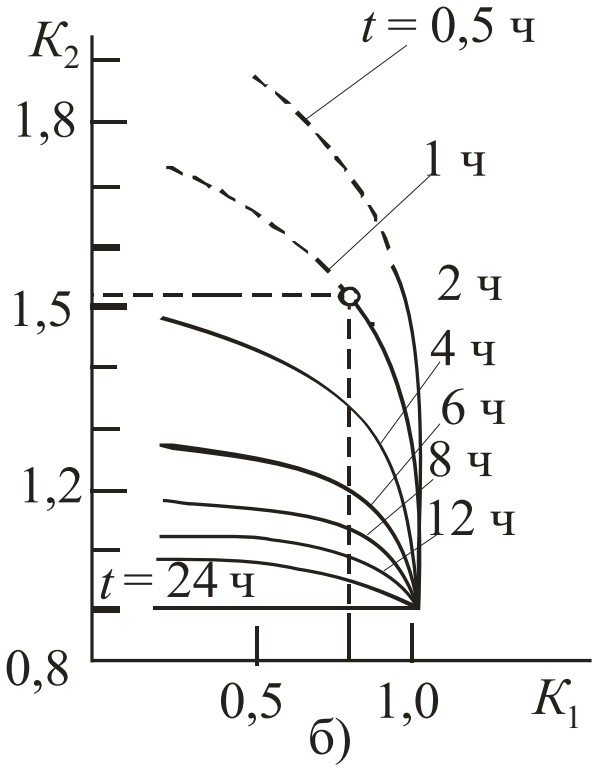


Рис. 2.10. Графики нагрузочной способности масляных трансформаторов с системами охлаждения М и Д: а – при эквивалентной температуре $\theta_{эк} = -10$°С; б – при $\theta_{эк} = +20$°С. Эквивалентная температура определяется по среднегодовой температуре воздуха (см. приложение 1 или [13])

На рис. 2.10 даны семейства кривых $K_2 = f(K_1)$ при различных длительностях перегрузки. Коэффициенты начальной K_1 и повышенной K_2 нагрузок находятся по соотношениям:

$$K_1 = \frac{I_{эк1}}{I_{ном}} = \frac{S_{эк1}}{S_{ном}};$$
$$K_2 = \frac{I_{эк2}}{I_{ном}} = \frac{S_{эк2}}{S_{ном}}, \qquad (2.28)$$

где $I_{эк1}$ и $I_{эк2}$ – эквивалентные токи соответственно начальной и повышенной нагрузок;

$S_{эк1}$ и $S_{эк2}$ – эквивалентные мощности соответственно начальной и повышенной нагрузок.

Эквивалентные токи и эквивалентные мощности определяются:

$$I_{эк} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + ... + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}};$$
$$S_{эк} = \sqrt{\frac{S_1^2 t_1 + S_2^2 t_2 + ... + S_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + ... + t_n}}, \qquad (2.29)$$

где I_n, S_n и t_n – соответственно ток, полная мощность и продолжительность n-й ступени графика нагрузки трансформатора.

При $K_2 > 1{,}5$ кривые на графиках показаны пунктиром, так как на работу трансформатора с перегрузками более 50% требуется согласие завода-изготовителя.

Для пользования графиками нагрузочной способности реальный график нагрузки трансформатора необходимо преобразовать в эквивалентный двухступенчатый (рис. 2.11). При этом возможны три варианта:

- суточный график содержит один максимум нагрузки в зоне перегрузки, где $S > S_{ном}$;
- суточный график содержит два максимума нагрузки в той же зоне, причем больший максимум нагрузки является вторым по времени;
- суточный график в указанной зоне содержит два максимума нагрузки, причем больший максимум является первым по времени.

В первом варианте $S_{эк2}$ определяется для зоны, где $S > S_{ном}$, а $S_{эк1}$ – для зоны продолжительностью 10 ч, предшествующей режиму перегрузки.

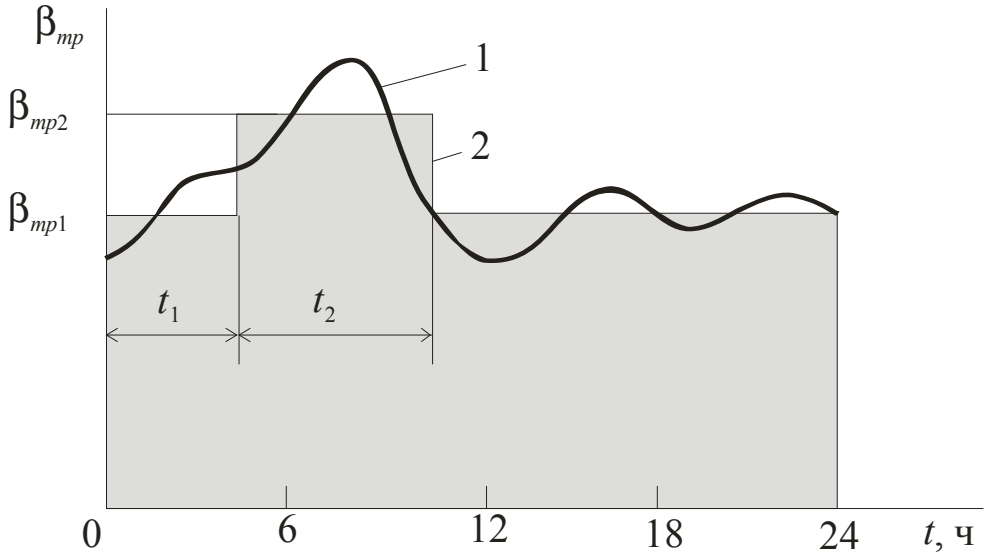


Рис. 2.11. Суточный график нагрузки: 1 – действительный; 2 – преобразованный двухступенчатый; $\beta_{тр}$ – коэффициент загрузки трансформатора

Во втором варианте $S_{эк2}$ определяется для зоны, где $S > S_{ном}$ во время второго максимума нагрузки, а $S_{эк1}$ – для предшествующей зоны продолжительностью 10 ч, включая первый максимум нагрузки в той мере, в какой он в эту зону входит.

В третьем варианте $S_{эк2}$ определяется для зоны, где $S > S_{ном}$ во время первого максимума нагрузки, а $S_{эк1}$ – для последующей зоны продолжительностью 10 ч, включая второй максимум в той мере, в какой он входит в эту зону.

Для систематических перегрузок допускается использовать однопроцентное правило: если максимум типового (среднего) графика нагрузки трансформатора в летний период меньше его номинальной мощности, то в зимнее время допускается дополнительная однопроцентная перегрузка трансформатора на каждый процент недогрузки летом, но не более чем на 15% (причем должно соблюдаться условие $S \le 1{,}5S_{ном}$).

Различают два типа аварийных перегрузок:

- кратковременные – независящие от предшествующей нагрузки, температуры охлаждающей среды и места установки трансформатора;
- длительные – зависящие от предшествующей нагрузки.

Кратность и длительность кратковременных аварийных перегрузок для трансформаторов с системой охлаждения М, Д, ДЦ и Ц связаны следующим образом:

Кратность перегрузки ……	1,3	1,45	1,6	1,75	2,0	3,0
Длительность перегрузки, мин …	120	80	45	20	10	1,5

При аварийных режимах работа с перегрузкой трансформаторов с системами охлаждения М, Д, ДЦ и Ц (в случае, если коэффициент начальной нагрузки $K_1 \le 0{,}93$) допускается в течение не более 5 сут. Перегрузка на 40% во время максимумов нагрузки для этих трансформаторов не должна превышать 6 ч в сутки. При этом должны быть приняты все меры для усиления охлаждения трансформаторов (включение вентиляторов, насосов системы охлаждения, резервных охладителей).

При проектировании систем электроснабжения предприятий допускается выбирать мощность трансформаторов по условиям аварийных перегрузок, которые определены для предшествующей нагрузки трансформаторов, не превышающей $0{,}8S_{ном}$, и приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7.

Допустимые аварийные перегрузки трансформаторов при выборе их номинальной мощности при предшествующей нагрузке $\beta_{тр1} \le 0{,}8$

Продолжительность перегрузи в течение суток	Перегрузки $\beta_{тр.\,ав2}$ в долях номинального тока в зависимости от средней температуры охлаждающего воздуха, °С													
	– 20		– 10		0		10		20		30		40	
	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ	М, Д	ДЦ
0,5	2	1,9	2	1,8	2	1,8	2	1,7	2	1,6	2	1,5	2	1,5
1	2	1,8	2	1,7	2	1,7	2	1,6	2	1,5	1,9	1,5	1,7	1,4
2	2	1,7	2	1,6	1,9	1,6	1,8	1,5	1,7	1,4	1,6	1,4	1,4	1,3
4	1,8	1,6	1,7	1,5	1,7	1,5	1,6	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,3
6	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2
8	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,4	1,2	1,3	1,1	1,2
12	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,4	1,2	1,3	1,1	1,2
24	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,4	1,4	1,3	1,4	1,2	1,3	1,1	1,2

Расчет максимально допустимых нагрузок и перегрузок проводится с целью:

- проверки допустимости существующего графика нагрузки цеха, участка, предприятия;
- определения возможных вариантов двухступенчатых суточных графиков нагрузки с максимальным значением $\beta_{тр2}$ при различных значениях $\beta_{тр1}$ и t_2 ($\beta_{тр1}$ – коэффициент загрузки трансформатора в момент, предшествующий режиму перегрузки; $\beta_{тр2}$ – коэффициент загрузки трансформатора в режиме перегрузки).

Допустимые значения максимальных систематических нагрузок и аварийных перегрузок трансформаторов с системами охлаждения М и Д приведены в таблице 2.8, а с системами охлаждения ДЦ и Ц – в [9].

Пример 2.9.

Определить допустимую длительность аварийной перегрузки $\beta_{тр2} = 1{,}8$ при начальной загрузке $\beta_{тр1} = 0{,}8$ и температуре охлаждающей среды $\theta_{охл} = 10°C$ для трансформатора ТМН-6300/110.

Решение.

По таблице 2.7 для трансформаторов с естественным масляным охлаждением при $\beta_{тр1} = 0{,}8$ и $\beta_{тр2} = 1{,}8$ определяется допустимое время такой перегрузки при температуре охлаждающего воздуха 10°С. Продолжительность перегрузки составляет 2 часа.

Пример 2.10.

Выбрать число и мощность трансформаторов на главной питающей подстанции машиностроительного завода. Средняя мощность предприятия за максимально загруженную смену $P_{см} = 60$ МВт, $\cos\varphi = 0{,}92$. Максимальная расчетная мощность завода $P_{расч} = 70$ МВт. Электроприемники I и II категорий потребляют 83% мощности предприятия. Суммарное время максимальной расчетной нагрузки $t_2 = 4$ ч. Температура охлаждающей среды $\theta_{охл} = 10°C$.

Решение.

На заводе имеются потребители I категории, поэтому необходима установка двух трансформаторов. Рекомендуемый коэффициент их загрузки $\beta_{тр} = 0{,}7$ [9].

С учетом (2.12) мощность трансформатора:

$$S_{тр} = \frac{P_{см}}{2 \cdot \beta_{тр} \cdot \cos\varphi} = \frac{60}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}92} = 46{,}5\ \text{МВА}.$$

К установке намечается два трансформатора мощностью по 40 МВА с естественным масляным охлаждением.

В период загрузки трансформатора расчетной максимальной мощностью:

$$S'_{тр} = \frac{P_{расч}}{2 \cdot \beta_{тр} \cdot \cos\varphi} = \frac{70}{2 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}92} = 54{,}2\ \text{МВА}.$$

Мощность электроприемников I и II категорий:

$$P_{см\ I,\ II} = 0{,}83 \cdot P_{см} = 0{,}83 \cdot 60 = 50\ \text{МВт};$$

$$P_{расч\ I,\ II} = 0{,}83 \cdot P_{расч} = 0{,}83 \cdot 70 = 58{,}1\ \text{МВт}.$$

В нормальном режиме при $t_2 = 4$ ч и $\beta_{тр1} = 0{,}7$ по таблице 2.8 определяется максимальная систематическая нагрузка $\beta_{тр2} = 1{,}39$.

Загрузка трансформатора расчетной максимальной мощностью в нормальном режиме составит:

$$\beta'_{тр.норм} = \frac{S'_{тр}}{S_{ном}} = \frac{54{,}2}{40} = 1{,}36 < 1{,}39\ .$$

Таблица 2.8.

Допустимые значения максимальных систематических нагрузок и аварийных перегрузок трансформаторов при температуре охлаждающей среды $\theta_{охл} = 10°C$

Время t_2, ч, по рис. 2.11	Система охлаждения М и Д							
	$\beta_{тр2}$ при значениях $\beta_{тр1} = 0,25 \div 1$							
	0,25	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,5	+ / 2	+ / 2	+ / 2	+ / 2	+ / 2	+ / 2	+ / 2	1,84 / 2
1	+ / 2	+ / 2	+ / 2	2 / 2	1,94 / 2	1,86 / 2	1,76 / 2	1,6 / 1,9
2	1,76 / 1,9	1,73 / 1,9	1,7 / 1,9	1,67 / 1,9	1,63 / 1,8	1,58 / 1,8	1,51 / 1,8	1,4 / 1,7
4	1,46 / 1,6	1,44 / 1,6	1,43 / 1,6	1,41 / 1,6	1,39 / 1,6	1,36 / 1,6	1,32 / 1,5	1,25 / 1,5
6	1,33 / 1,5	1,32 / 1,5	1,31 / 1,5	1,3 / 1,5	1,29 / 1,5	1,27 / 1,5	1,24 / 1,4	1,2 / 1,4
8	1,26 / 1,4	1,26 / 1,4	1,25 / 1,4	1,24 / 1,4	1,23 / 1,4	1,22 / 1,4	1,2 / 1,4	1,17 / 1,4
12	1,19 / 1,4	1,19 / 1,4	1,18 / 1,4	1,18 / 1,4	1,17 / 1,4	1,16 / 1,4	1,15 / 1,4	1,13 / 1,4
24	1,08 / 1,4	1,08 / 1,4	1,08 / 1,4	1,08 / 1,4	1,08 / 1,4	1,08 / 1,4	1,08 / 1,4	1,08 / 1,4

Примечания:

1. Знак «+» и значения, выделенные прямоугольником, указывают на то, что для данного режима нагрузки расчетное значение $\beta_{тр2} > 2$, но допускается его любое значение в интервале $1,5 < \beta_{тр2} \leq 2$ по согласованию с заводом-изготовителем.

2. В числителе – нормы максимально допустимых систематических нагрузок, в знаменателе – нормы допустимых аварийных перегрузок трансформаторов.

При аварийном выходе из строя одного из трансформаторов и при отключении нагрузок III категории:

$$\beta_{тр.ав} = \frac{P_{расч\ I,\ II}}{1 \cdot \cos\varphi \cdot S_{ном}} = \frac{58{,}1}{1 \cdot 0{,}92 \cdot 40} = 1{,}58 .$$

По таблице 2.8 аварийная перегрузка при $t_2 = 4$ ч составляет $\beta_{тр2} = 1{,}60 > 1{,}58$, следовательно, мощность трансформаторов выбрана правильно.

Пример 2.11.

На однотрансформаторной цеховой подстанции установлен трансформатор ТМ-400/6 напряжением 6/0,4 кВ. Номинальный ток трансформатора $I_{ном} = 580$ А. Проверить необходимость замены указанного трансформатора на трансформатор большей мощности, если в связи с ростом производства максимальная мощность возрастает до 490 кВА с продолжительностью максимума $t = 2$ ч; средняя нагрузка составляет 290 кВА. По суточному графику нагрузки определены эквивалентный ток в период максимума нагрузки $I_{эк2} = 725$ А и эквивалентная начальная нагрузка за 10 ч до начала максимума $I_{эк1} = 465$ А. Среднегодовая температура +10°С.

Решение.

Определяется коэффициент начальной нагрузки (соотношение (2.28)):

$$K_1 = \frac{I_{эк1}}{I_{ном}} = \frac{465}{580} = 0{,}8 .$$

Величина эквивалентной нагрузки определяется по действительному графику нагрузки как среднеквадратичный ток (см. (2.29)). Эквивалентный ток в период максимума нагрузки $I_{эк2}$ рассчитывается за время, в течение которого нагрузка превышает номинальную. Эквивалентная начальная нагрузка $I_{эк1}$ определяется за время 10 ч до начала максимума нагрузки.

Сравнивается расчетный коэффициент K_2 с допустимым K_2', найденным по рис. 2.10, и устанавливается правильность выбора мощности трансформатора.

Расчетный коэффициент превышения нагрузки (соотношение (2.28)):

$$K_1 = \frac{I_{эк2}}{I_{ном}} = \frac{725}{580} = 1{,}25 .$$

Для среднегодовой температуры +10°С по кривым приложения 1 эквивалентные температуры воздуха равны +20°С для лета и +5°С для зимы. Для расчета принимается наибольшая эквивалентная температура +20°С.

По кривым нагрузочной способности трансформатора с системой охлаждения М (рис. 2.10, б) при $K_1 = 0{,}8$ и $t = 2$ ч допустимое значение коэффициента превышения нагрузки составляет $K_2' = 1{,}52$, что больше расчетного значения $K_2 = 1{,}25$.

Таким образом, при росте нагрузки замена трансформатора мощностью 400 кВА на трансформатор большей мощности не требуется.

2.3. Нагрев электрических машин

Основные номинальные режимы электрических машин в зависимости от характера изменения нагрузки приведены в разд. 1.1. Для эффективного контроля количества тепла, накопленного двигателем в процессе работы, необходимо знать законы его нагрева и охлаждения. Анализ теплового баланса электрических машин выполняется при следующих допущениях:

- двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее бесконечно большую теплопроводность и одинаковую температуру во всех своих точках;
- теплоемкость двигателя и его коэффициент теплоотдачи не зависят от нагрузки на валу двигателя;
- температура двигателя зависит от нагрузки и температуры окружающей среды;
- средняя температура пропорциональна количеству тепла, накопленному двигателем.

С учетом перечисленных допущений нагрев электрических машин может быть описан уравнением (2.8), а их охлаждение – (2.10).

Точный расчет нагрева электрических машин требует решения трехмерной тепловой задачи, осложненной неравновесным распределением источников тепла в объеме машины, различными тепловыми характеристиками элементов машины, зависящими от технологии изготовления машины и системы охлаждения [14].

2.4. Старение электрической изоляции

На практике почти не встречаются потребители, у которых нагрузка долго не изменяется по величине. Пример реального графика нагрузки приведен на рис. 2.4. Временные изменения нагрузки, причем в значительных пределах, отражаются на нагреве проводников и электрооборудования, что вызывает старение их электрической изоляции.

Силовые кабели и провода. Ресурс электрической изоляции кабеля (провода) определяет его фактическую наработку, а срок службы характеризует календарное время с момента ввода кабеля в эксплуатацию независимо от наработки и коэффициента загрузки. Многие кабельные линии находятся в работе и после истечения срока их службы, так как не выработали своего ресурса. Поэтому при эксплуатации необходимо знать наработку кабеля и, что особенно важно, его остаточный ресурс.

Ресурс электрической изоляции существенно зависит от температуры и от напряженности электрического поля, но методика, основанная на этих параметрах, является разрушающей и подходит только для вновь разрабатываемых кабелей, проходящих ресурсные испытания в лабораториях или на полигонах. Кроме того, каждый действующий кабель работает в индивидуальных условиях, а параметры, необходимые для данных расчетов, изменяются в широких пределах [15].

Разрушающими являются и профилактические высоковольтные испытания, предназначенные для своевременного выявления состаренных кабелей. Эти испытания сами по себе могут привести к ухудшению состояния изоляции и появлению новых слабых мест в изоляции кабеля, так как испытательное напряжение в 4–6 раз превышает номинальное напряжение кабельной линии. Такими испытаниями эффективно выявляются повреждения, связанные с насыщением изоляции влагой (механические повреждения, коррозия металлических оболочек, увлажнение изоляции муфт). Дефекты, обусловленные старением изоляции в результате длительного воздействия эксплуатационных факторов, выявляются малоэффективно.

Для своевременной диагностики и повышения эксплуатационной надежности кабельных линий наиболее предпочтительным является применение щадящих и неразрушающих методов испытаний кабельных линий. Такие методы, основанные на периодическом измерении наиболее информативных характеристик изоляции, не только позволяют получать информацию о состоянии изоляции кабелей, но и могут быть использованы для прогнозирования остаточного срока службы длительно эксплуатирующихся кабелей. Методы находятся на стадии разработки [16, 17]. Их использование на практике требует накопления банка данных о результатах испытаний от исходного состояния изоляции до ее полного износа.

Трансформаторы [13]. Для диапазона температур 80–140°С, имеющих место при эксплуатации трансформаторов с изоляцией класса А, для определения срока ее службы E справедлива формула:

$$E = D\exp(-p\theta), \qquad (2.30)$$

где D – постоянная;

$p = 0{,}1155°\text{C}^{-1}$ – коэффициент;

θ – температура изоляции (принимается по наиболее нагретой точке).

Каждые 6°С прироста температуры θ вызывают сокращение срока службы изоляции вдвое, то есть ее износ удваивается (шестиградусное правило старения изоляции).

Это означает, что если в диапазоне 80–140°С температуре θ соответствует срок службы E, то при температуре (θ+6) он составляет 0,5E:

$$0{,}5E = D\exp(-p(\theta + 6)). \qquad (2.31)$$

Если в качестве базовой выбрана такая температура $\theta_б$, для которой срок службы принимается нормальным, то отношение этого срока к сроку службы, соответствующему любой другой температуре θ, называется относительным износом изоляции. Срок службы изоляции трансформатора определяется, ориентируясь на номинальную температуру в его наиболее нагретой точке, принимаемую равной 98°С (рис. 2.6).

Используя (2.30), относительный износ изоляции ζ при температуре θ составит:

$$\zeta = \frac{D\exp(-0{,}1155\theta_б)}{D\exp(-0{,}1155\theta)} = \exp(0{,}1155(\theta - \theta_б)). \qquad (2.32)$$

Если принять $\theta_б = \theta_{н.н.т} = 98$°С, то формула (2.32) для расчета относительного износа изоляции ζ при неизменной температуре θ примет вид:

$$\zeta = \exp(0{,}1155(\theta - 98)). \qquad (2.33)$$

Расчет температуры наиболее нагретой точки трансформатора упрощен и справедлив только для однородной обмотки (с одинаковыми катушками и охлаждающими каналами катушек), у которой превышения средней температуры каждой катушки над температурой прилегающих слоев масла одинаковы, а температура масла изменяется вдоль высоты обмотки по линейному закону.

Электродвигатели. Нормативный срок службы электродвигателя определяется допустимой температурой нагрева его изоляции. В современных двигателях применяется несколько классов изоляции, допустимая температура нагрева которых составляет:

для класса A – 105°С,
E – 120°С,
B – 130°С,
F – 155°С,
H – 180°С,
C – свыше 180°С.

Системы изоляции обмоток электрических машин классов нагревостойкости А и Е в настоящее время практически вытеснены более нагревостойкими системами. Это повышает устойчивость к

кратковременным перегрузкам, дает возможность работы машин при более высокой температуре окружающей среды.

При эксплуатации электрических машин происходит износ изоляции: дополнительно к технологическим образуются новые дефекты. Приращение дефектности зависит от времени наработки электродвигателя и скорости дефектообразования (численно равной приращению дефектности в единицу времени). Для электрических двигателей общепромышленного использования скорость дефектообразования в основном зависит от температуры обмотки и может быть определена по соотношению:

$$H = H_0 \exp\left(a(\theta - \theta_0) + b(\theta - \theta_0)^2\right), \qquad (2.34)$$

где H_0 – скорость дефектообразования изоляции при температуре, равной температурному индексу θ_0 (определяется классом нагревостойкости изоляции);

θ – температура старения;

a и b – коэффициенты, определяющие изменение скорости дефектообразования при изменении температуры на один градус.

Значения коэффициентов уравнения (2.34) некоторых систем витковой изоляции и отдельных слоев корпусной или междуфазной изоляции приведены в [18, 19].

К эксплуатационным факторам, определяющим отказы изоляции обмотки, относятся также коммутационные перенапряжения и условия окружающей среды. Эти факторы являются выявляющими, то есть определяют отказы системы изоляции при условии существования в них сквозных повреждений. В [18] приведены эмпирические соотношения, позволяющие оценить ресурс изоляции электрических машин при эксплуатации.

Длительная работа электродвигателей всего лишь при 5%-й перегрузке сокращает срок их службы в 10 раз. В связи с этим возникает необходимость применения различного вида защит [20, 21] и диагностики состояния двигателей в процессе их работы [22].

Аварийные режимы работы электродвигателей и способы защиты от них рассмотрены в [20, 21, 23].

В настоящее время широко используются метод вибродиагностики состояния элементов электродвигателей и метод спектрального анализа потребляемого тока [22]. Помимо этих измерений рекомендуется проведение мониторинга приложенного к электродвигателю напряжения, что позволяет определить его несимметрию, наличие высших гармонических составляющих и импульсов перенапряжений

(что возможно при работе с частотными регуляторами скорости вращения), то есть тех факторов, которые напрямую влияют на срок службы и экономичность работы двигателя. Первые два из вышеупомянутых факторов приводят как к перегреву обмотки статора, так и к повреждению подшипников из-за возникновения высокочастотных вращающих моментов обратной последовательности.

Выполнение такой работы позволит провести полномасштабную натурную диагностику и анализ условий работы парка электродвигателей и связанных с ними механических устройств, существенно сократить как затраты, связанные с отказами оборудования, так и непродуктивные затраты электроэнергии.

Пример 2.12.

Трансформатор ТМ-6300/35 длительное время работал с перегрузкой 40%. Превышение температуры масла в верхних слоях над температурой охлаждающей среды при номинальном режиме составляло 55°С. Определить относительное старение изоляции трансформатора.

Решение.

При температуре охлаждающей среды 20°С и номинальном режиме работы трансформатора температура масла составит 20 + 55 = 75°С. Длительная перегрузка вызовет его дополнительный нагрев. Температура масла при перегрузках может быть оценена по соотношению (2.19):

$$\theta_{м} = \theta_{м.ном}\frac{1+d\overset{*}{S}^{2}}{1+d} = 75\frac{1+5\cdot 1{,}4^{2}}{1+5} = 135\ °\text{C}.$$

Температура в наиболее нагретой точке обмотки определяется по выражению (2.20) и тепловой диаграмме, приведенной для трансформатора ТМ-6300/35 на рис. 2.6, а:

$$\theta_{обм.н.н.т} = \theta_{м} + (g+\varepsilon)\overset{*}{S}^{2n} = 135 + (21+2)\cdot 1{,}4^{2\cdot 0{,}8} = 174{,}4\ °\text{C}.$$

Относительный износ изоляции трансформатора при температуре θ, соответствующей температуре наиболее нагретой точки $\theta_{обм.н.н.т}$ при перегрузке, оценивается по соотношению (2.33):

$$\zeta = \exp(0{,}1155(\theta - 98)) = \exp(0{,}1155(174{,}4 - 98)) = 6800\,.$$

Это означает, что за один час работы при таком нагреве изоляция состарится так, как будто она работала 6800 ч при обычном нагреве, допускаемом нормами длительно.

Пример 2.13.

Трансформатор ТМ-1000/10 перенес сквозной ток короткого замыкания, при котором температура обмотки в наиболее нагретой точке достигла 223°С. Защита отключила трансформатор. Определить относительный износ изоляции за время охлаждения трансформатора. Температура охлаждающей среды 20°С.

Решение.

По тепловой диаграмме трансформатора с системой охлаждения М (рис. 2.6, а) определяется температура масла. Она составляет 223 – 23 = 200°С. Превышение нагрева масла в момент отключения трансформатора составит 200 – 20 = 180°С. Пользуясь уравнением (2.10), рассчитывается процесс снижения этого превышения от 180°С до нуля после отключения тока (рис. 2.12). Из рис. 2.12 видно, что только через 60–90 мин после отключения тока короткого замыкания превышение нагрева снизится до длительно допустимой по нормам температуры 115°С, а полностью трансформатор остынет только через 10–12 часов. При температуре масла 115°С температура наиболее нагретой точки обмотки составит 140°С (рис. 2.6, а), что для изоляции класса А является наибольшей длительно допустимой температурой по условию старения.

Для расчета относительного износа изоляции фактический график охлаждения трансформатора (рис. 2.12, кривая 1) заменяется на эквивалентный ступенчатый (рис. 2.12, ступени 2). Для каждой ступеньки прямоугольного графика по масштабу определяется среднее для этой ступени превышение нагрева, а по уравнению (2.33) – относительный износ. Умножив фактическое время по графику на величину относительного износа, определяется относительное время, «прожитое изоляцией». Результаты расчета приведены в таблице 2.9.

Таблица 2.9.

Относительный износ изоляции трансформатора (к примеру 2.13).

Ступень графика по рис. 2.12	Фактическое время по графику, ч	Среднее превышение нагрева, °С		Относительное старение изоляции по уравнению (2.33)	Относительное время «прожитое изоляцией», ч
		масла	наиболее нагретой точки обмотки		
1	0,1	177	200	130744	13074
2	0,1	168	191	46235	4624
3	0,1	163	186	25952	2595
4	0,1	156	179	11562	1156
5	0,1	150	173	5782	578
6	0,1	144	167	2891	289
7	0,1	138	161	1446	145
8	0,1	134	157	911	91
9	0,1	128	151	456	46
10	0,1	122	145	228	23
Итого	1	—	—	—	22621

Расчет проведен для первых десяти ступеней графика. Дальнейший расчет заметных уточнений не внесет. Из расчета видно, что за один час снижения

превышения нагрева изоляция трансформатора состарится так, как будто трансформатор нес номинальную нагрузку с длительно допустимым превышением нагрева по нормам в течение 22621 ч подряд.

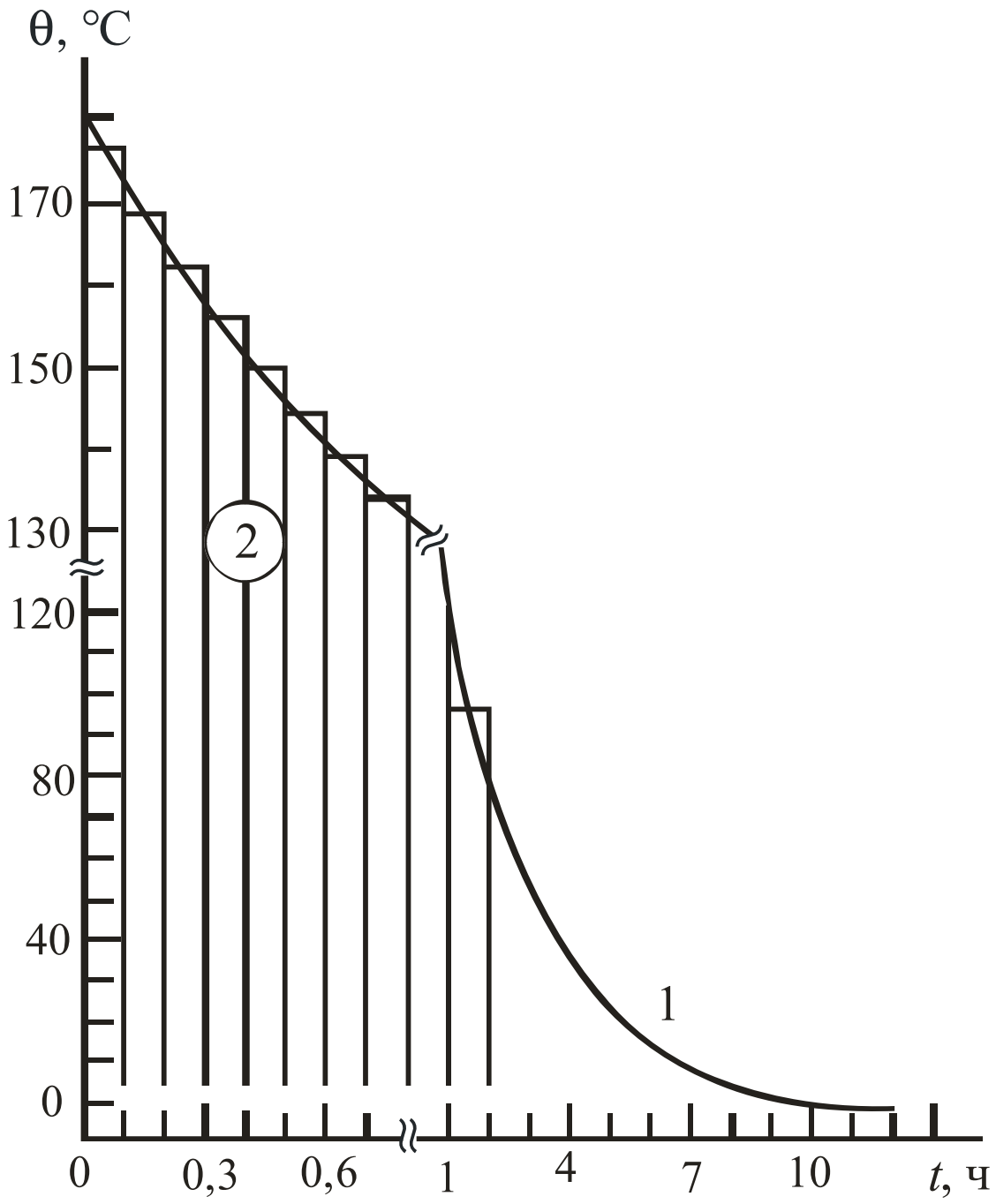


Рис. 2.12. Фактический (1) и эквивалентный (2) графики охлаждения трансформатора после отключения тока сквозного короткого замыкания

Александр Васильевич Кабышев

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ОБЪЕКТОВ

Ч.1. Расчет электрических нагрузок, нагрев проводников и электрооборудования

Учебное пособие

Редактор Е.О. Фукалова

Подписано к печати 02.04.2007.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Печать RISO. Усл.печ.л. 10,75.. Уч.изд.л. 9,74.
Тираж 300 экз. Заказ. Цена свободная
Издательство ТПУ. 634050, Томск, пр. Ленина, 30.