

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра систем управления и информационных технологий в строительстве

**ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Энергоснабжение»  
для студентов очного и заочного отделения,  
направления 27.03.02 Управление качеством

Воронеж 2021

УДК 621.31(07)  
ББК В152

**Составители:**

**канд. техн. наук, доцент А.В. Полуказаков**

**Энергоснабжение:** методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Энергоснабжение» для студентов специальности 27.03.02 «Управление качеством»/ ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А.В. Полуказаков. - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. - 89 с.

Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Энергоснабжение» разрабатывались на основе требований ФГОС с опорой на научные принципы формирования содержания образования. Данное пособие отражает актуальные направления 27.03.02 Управление качеством.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЛР\_ Энергоснабжение.

Табл. 56. Библиогр.: 8 назв.

**УДК 621.31(07)**

**ББК В152**

**Рецензент** - И. В. Поцбнева, канд. техн. наук, доц. кафедры систем управления и информационных технологий в строительстве Воронежского государственного технического университета

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного технического университета*

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение .....	4
Общие требования и указания по проведению работ .....	4
Лабораторная работа №1. Исследование суточных графиков электрических нагрузок	
Цель работы.....	6
Общие положения.....	6
Методические указания по выполнению работы .....	7
Контрольные вопросы.....	19
Лабораторная работа № 2. Формирование и исследование годовых графиков электрических нагрузок	
Цель работы.....	20
Общие положения.....	20
Методические указания по проведению работы .....	21
Контрольные вопросы.....	32
Приложение к лабораторной работе №2 .....	33
Лабораторная работа № 3. Исследование влияния коэффициента реактивной мощности однофазной нагрузки на распределение её активной и реактивной составляющих между фазами	
Цель работы.....	46
Общие положения и методические указания по выполнению работы.....	46
Краткое описание компьютерной модели системы электрообеспечения .....	50
Методические указания по проведению работы .....	54
Контрольные вопросы.....	62
Лабораторная работа № 4. Определение оптимального числа включённых в работу силовых трансформаторов в системе цехового электрообеспечения с тремя взаимно резервированными трансформаторами в различные смены суток	
Цель работы.....	63
Исходные данные .....	63
Порядок выполнения работы.....	63
Методические указания по выполнению работы .....	67
Контрольные вопросы.....	86
Библиографический список.....	88

## **ВВЕДЕНИЕ**

Привитие студентам навыков к самостоятельной работе и самообучению является одной из важнейших задач, решаемых учебным заведением при подготовке специалистов. Поэтому в учебных планах подготовки будущих специалистов особое внимание уделено практическим, лабораторным и семинарским занятиям по изучаемым дисциплинам. Так, более 50 % от общего объёма часов, отведённых учебным планом на изучение дисциплины «Электроснабжение», отпущено на самостоятельную работу, и только 15 % – на лекционные занятия.

Учитывая вышесказанное, автор счёл необходимым поместить в данном учебном пособии к лабораторным работам не только описание работ и исходные данные для их выполнения, но и в сжатой форме изложить теоретический материал, который должен быть освоен студентами при изучении дисциплины и используется при решении задач, поставленных в работах.

В данном учебном пособии приведено описание 4-х лабораторных работ, охватывающих основные разделы дисциплины и полностью соответствующих рабочей программе дисциплины. В описаниях работ кроме исходных данных и необходимых для выполнения работ теоретических положений приведены справочные данные, а также разработанные автором типовые таблицы, в которые вносятся исходные данные и результаты расчётов.

Внимательное изучение материала, помещённого в учебное пособие, подготовка ответов на контрольные вопросы, приведенные в конце описания каждой работы, будут способствовать успешной сдаче экзамена по дисциплине.

### **Общие требования и указания по проведению работ**

1. Работы выполняются на ПЭВМ бригадами в составе 2-х человек, сформированных до проведения первого занятия. Бригады в составе 3-х человек допускается только при общем количестве студентов в группе более 24-х человек.

2. Работы выполняются фронтальным методом, т. е. все бригады выполняют одну и ту же работу с соответствующим вариантом исходных данных, указанных преподавателем на первом занятии.

3. На выполнение каждой работы отводится 4 академических часа занятий, т. е. две пары, в течение которых студенты должны выполнить все вычислительные эксперименты и оформить отчёт.

4. При условии, когда бригада не успела выполнить работу и оформить отчёт в течение аудиторных занятий, работа должна быть завершена во внеаудиторное время в домашних условиях или в вычислительном зале кафедр.

5. Отчёт по выполненной лабораторной работе должен быть представлен преподавателю до начала очередной работы. Студенты, не представившие

отчёт по выполненной работе без уважительной причины, к следующей работе не допускаются.

6. Пропуск членами бригады аудиторных занятий по лабораторным работам и опоздание более, чем на 10 мин без уважительной причины не допускается.

7. Варианты исходных данных к следующей работе бригадам выдаются преподавателем на предыдущем занятии, если они не были выданы на первом занятии.

8. До проведения очередной работы студенты должны быть ознакомлены с описанием содержания работы и иметь заранее подготовленные электронные таблицы, в которых будут проводиться расчёты или заноситься результаты расчётов.

С целью успешного завершения выполнения работы, оформления отчёта и защиты в часы, отведённые на аудиторные занятия, полезно часть работы выполнить на стадии самостоятельной подготовки к проведению работы.

9. Студенты, пропустившие лабораторные занятия по уважительной причине, выполняют их в течение 2-х последних недель семестра, отпущенных учебным планом на предаттестационные консультации. В этот же период проводится защита лабораторных работ членами бригад, не сумевшими защитить работы в течение семестра по уважительной причине.

10. Студенты, не выполнившие лабораторные работы, к экзамену по дисциплине не допускаются.

11. При оформлении текста отчёта, формул, таблиц и рисунков рекомендуется руководствоваться требованиями, приведёнными в методическом пособии: «Ершов, А.М. Системы электроснабжения. Выпускная квалификационная работа по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника»: учебное пособие / Н.Ю. Аверина, Р.Г. Валеев и др.; под ред. А.М. Ершова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – 69 с», электронный текст которого помещен на сайте кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» [energynet.susu.ru](http://energynet.susu.ru). Отчёт должен включать в себя титульный лист и основную часть. На титульном листе обязательно должно быть указана информация:

- об исполнителях, номере и названии лабораторной работы;
- вариант;
- номер бригады;
- подписи членов бригады и дата выполнения.

Основная часть отчёта должна содержать следующую информацию:

- цель работы;
  - исходные данные и основные расчётные выражения;
  - построить требуемые в лабораторной работе графики и (или) зависимости.
- результаты расчётов;
  - выводы.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## ИССЛЕДОВАНИЕ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

### Цель работы

– привитие навыков определения параметров, используемых при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения (СЭС), по суточным графикам электрических нагрузок отдельных электроприёмников и узлов СЭС;

– проверка адекватности расчётного выражения для определения числа часов максимальных потерь, используемого в практике проектирования электрических сетей.

### Общие положения

Известно, что суточные графики нагрузок электроприёмников и узлов СЭС несут в себе надёжную информацию о режимах работы потребителей и электропотреблении ими, обусловленных, главным образом, технологией производства, без учёта которой невозможно создать надёжно работающую и экономически выгодную систему электроснабжения.

Суточные графики электрических нагрузок, как правило, снимаются в характерные сутки года (зимние, летние, осенне-весенние) и сутки недели (рабочие и празднично-выходные). Они, как правило, используются для построения упорядоченных годовых графиков по продолжительности и определения по ним показателей, используемых в технико-экономических расчётах. Однако эти же показатели могут быть определены, не прибегая к построению годовых графиков, используя при этом показатели суточных графиков, снятых в характерные сутки, и сведения об их повторяемости в течение года. Другими словами – применяя нетрадиционный подход.

Вполне очевидным является то, что объём вычислительной работы при этом будет заметно меньше, чем при использовании традиционного подхода, а достоверность получаемых результатов будет определяться правильностью обработки суточных графиков. Поэтому в данной работе уделено внимание обработке и определению показателей суточных графиков электрических нагрузок.

Поскольку работа является учебной, то в ней предлагается определять широкий спектр показателей, включая такие как число часов использования максимумов активной и реактивной нагрузки в течение одних суток соответственно  $T_{им.а}^{сут}$  и  $T_{им.р}^{сут}$ , и число часов максимальных потерь  $\tau_{сут}$ , которые традиционно принято находить за период времени, равному одному году.

## Методические указания по выполнению работы

При подготовке к лабораторной работе и для её выполнения изучите теоретические положения, изложенные в [1].

Исходные данные к лабораторной работе приведены к табл. 1.1.

Таблица 1.1

Суточные графики активной и реактивной нагрузок

Варианты суточных графиков нагрузок	Номер интервала времени суток	Длительность интервала времени наблюдения, ч	Нагрузка	
			активная, МВт	реактивная, Мвар
I	1	0–4	2	1,5
	2	4–8	2–5	1,5–3
	3	8–8,3	6	4
	4	8,3–12	5	4
	5	12–16	4	3
	6	16–20	4,5	3,5
	7	20–24	4,5–2	3,5–1,5
	8	–	–	–
II	1	0–2	4	4
	2	2–6	4–8	4–6
	3	6–8	8	6
	4	8–11,6	12	10
	5	11,6–12	14	12
	6	12–16	10	8
	7	16–20	12	10
	8	20–24	12–4	10–4
III	1	0–4	8	4
	2	4–8	8–16	4–8
	3	8–12	20	12
	4	12–12,25	24	16
	5	12,25–14	20	12
	6	14–16	16	8
	7	16–20	20	12
	8	20–24	20–8	12–4
IV	1	0–4	5	10
	2	4–8	5–20	10–20
	3	8–11,65	30	25
	4	11,65–12	35	25
	5	12–14	25	20
	6	14–18	30	22,5
	7	18–20	25	20
	8	20–24	25–20	20–10

Продолжение табл. 1.1

Варианты суточных графиков нагрузок	Номер интервала времени суток	Длительность интервала времени наблюдения, ч	Нагрузка	
			активная, МВт	реактивная, Мвар
V	1	0–6	20	20
	2	6–8	20–50	20–40
	3	8–12	70	50
	4	12–12,4	80	40
	5	12,4–16	60	40
	6	16–22	70	50
	7	22–24	70–20	50–20
	8	–	–	–
VI	1	0–6	60	40
	2	6–10	60–100	40–60
	3	10–12	120	90
	4	12–12,4	140	90
	5	12,4–14	120	90
	6	14–18	100	80
	7	18–20	120	90
	8	20–24	120–60	90–40
VII	1	0–6	2	1,5
	2	6–8	2–3	1,5–2
	3	8–11,8	3,5	2,5
	4	11,8–12	4	2,5
	5	12–16	3	2
	6	16–20	3,5	2,5
	7	20–24	3,5–2	2,5–1,5
	8	–	–	–
VIII	1	0–8	4,5	3
	2	8–10	4,5–9	3–6
	3	10–12	10,5	8
	4	12–12,3	12	8
	5	12,3–14	9	7,5
	6	14–18	10,5–8	8
	7	18–20	9	6
	8	20–24	9–4,5	6–3
IX	1	0–8	0,06	0,045
	2	8–10	0,06–0,15	0,045–0,09
	3	10–12	0,18	0,12
	4	12–12,25	0,21	0,12
	5	12,25–14	0,18	0,12
	6	14–16	0,15	0,09
	7	16–20	0,18	0,12
	8	20–24	0,18–0,06	0,12–0,045

Варианты суточных графиков нагрузок	Номер интервала времени суток	Длительность интервала времени наблюдения, ч	Нагрузка	
			активная, МВт	реактивная, Мвар
X	1	0–6	0,08	0,08
	2	6–8	0,08–0,2	0,08–0,16
	3	8–11,7	0,28	0,22
	4	11,7–12	0,32	0,22
	5	12–14	0,28	0,22
	6	14–16	0,24	0,16
	7	16–20	0,28	0,2
	8	20–24	0,28–0,08	0,2–0,08

**Примечание.** На интервалах времени суток, где указаны два значения мощности, разделённые знаком «–», нагрузка изменяется по линейному закону, причём первое значение соответствует началу интервала, а второе – концу интервала. На остальных интервалах указанные в таблице значения нагрузки остаются неизменными в течение соответствующих интервалов времени суток.

Путём обработки заданного преподавателем варианта суточных графиков изменения активной и реактивной мощности узла СЭС во времени соответственно  $P(t)$  и  $Q(t)$ , приведенных в табл. 1.1, определить следующие показатели:

*1. Средние за сутки активную и реактивную мощности*

При условии непрерывного изменения нагрузки во времени средние за сутки значения активной и реактивной мощности следует определять соответственно по формулам

$$P_{\text{ср.сут}} = \frac{W_{\text{а.сут}}}{24} = \frac{1}{24} \int_0^{24} P(t) dt;$$

$$Q_{\text{ср.сут}} = \frac{W_{\text{р.сут}}}{24} = \frac{1}{24} \int_0^{24} Q(t) dt,$$

где  $W_{\text{а.сут}}$  и  $W_{\text{р.сут}}$  – соответственно активная и реактивная энергии, пропускаемые через рассматриваемый узел СЭС в течение одних суток.

Учитывая форму заданных суточных графиков нагрузок активную и реактивную энергию, пропущенную за одни сутки, можно определить, не прибегая к процедуре интегрирования, по выражениям

$$W_{\text{а.сут}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} W_{\text{а}i} = \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} P_i \Delta t_i; \quad (1.1)$$

$$W_{\text{р.сут}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} W_{\text{р}i} = \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} Q_i \Delta t_i, \quad (1.2)$$

где  $n_{\text{сут}}$  – общее число интервалов времени в суточном графике, в которых активная и реактивная мощности остаются неизменными во времени и равными соответственно  $P_i$  и  $Q_i$ , но имеют различные численные значения, или в течение конкретного  $i$ -го интервала изменяются по линейному закону;  $W_{ai}$  и  $W_{pi}$  – активная и реактивная энергии, пропущенные через узел СЭС в течение  $i$ -го интервала времени суток;  $\Delta t_i$  – продолжительность  $i$ -го интервала времени.

На тех интервалах времени, где активная и реактивная мощности изменяются по линейному закону, значения  $P_i$  и  $Q_i$  рассчитываются соответственно по формулам

$$P_i = P_{\text{мин}i} + \frac{P_{\text{макс}i} - P_{\text{мин}i}}{2} = \frac{P_{\text{макс}i} + P_{\text{мин}i}}{2}; \quad (1.3)$$

$$Q_i = Q_{\text{мин}i} + \frac{Q_{\text{макс}i} - Q_{\text{мин}i}}{2} = \frac{Q_{\text{макс}i} + Q_{\text{мин}i}}{2}, \quad (1.4)$$

где  $P_{\text{макс}i}$  и  $P_{\text{мин}i}$  – максимальное и минимальное значения активной мощности на рассматриваемом  $i$ -м интервале времени;  $Q_{\text{макс}i}$  и  $Q_{\text{мин}i}$  – максимальное и минимальное значения реактивной мощности на рассматриваемом  $i$ -м интервале времени.

Графическая интерпретация замены наклонных участков суточного графика эквивалентного по условиям потребления электроэнергии прямоугольным участком, представлена на рис. 1.1. Там же показаны переменные, входящие в формулы (1.3) и (1.4).

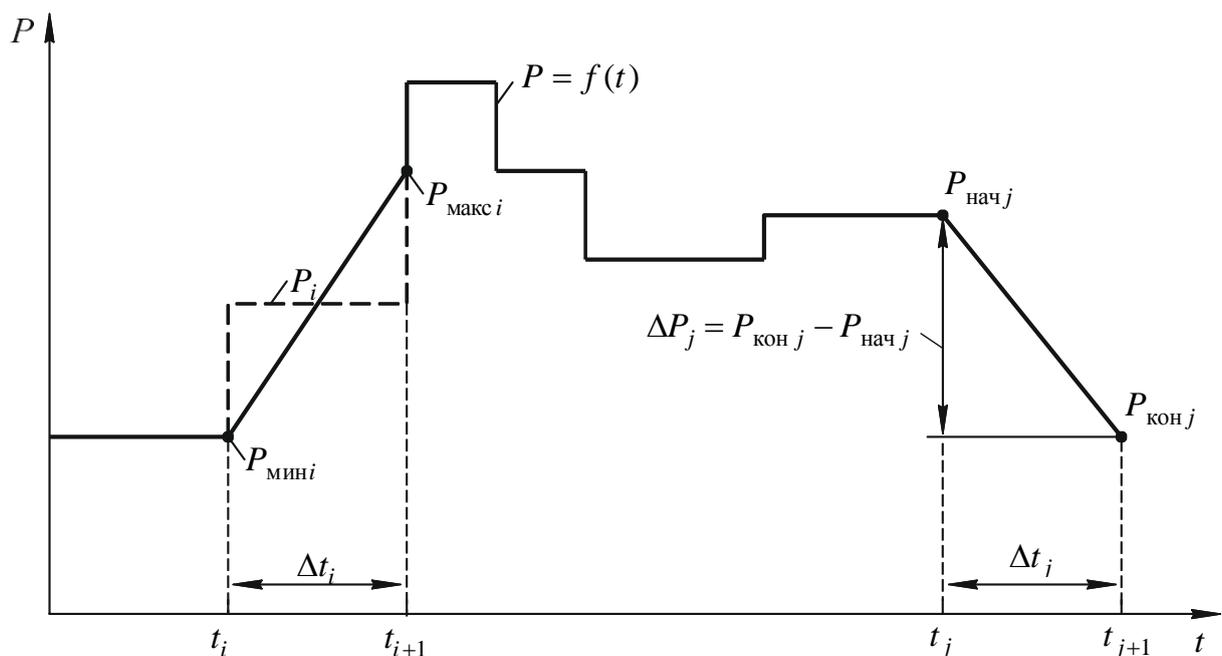


Рис. 1.1. Поясняющий рисунок

**Отметим**, что при более сложных законах изменения нагрузки во времени всегда можно воспользоваться методом кусочно-линейной аппроксимации и соответственно вышеприведенными выражениями (1.1)–(1.4).

## 2. Среднеквадратичные за сутки активную и реактивную мощности

Среднеквадратичные за сутки активную и реактивную мощности соответственно  $P_{\text{ср. кв. сут}}$  и  $Q_{\text{ср. кв. сут}}$  в общем случае при непрерывном изменении указанных мощностей во времени следует определять по формулам

$$P_{\text{ср. кв. сут}} = \sqrt{\frac{1}{24} \int_0^{24} P^2(t) dt};$$

$$Q_{\text{ср. кв. сут}} = \sqrt{\frac{1}{24} \int_0^{24} Q^2(t) dt}.$$

При заданной форме графиков активной и реактивной нагрузок их можно определить по выражениям

$$P_{\text{ср. кв. сут}} = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} \int_0^{\Delta t_i} P_i^2(t) dt}; \quad (1.5)$$

$$Q_{\text{ср. кв. сут}} = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} \int_0^{\Delta t_i} Q_i^2(t) dt}. \quad (1.6)$$

Поскольку с геометрической точки зрения интерпретации определённый интеграл представляет собой площадь, ограниченную подынтегральной функцией и осью независимой переменной (в нашем случае осью времени) в пределах интервала интегрирования. Поэтому можно на каждом  $i$ -м интервале времени начало интегрирования совместить с началом координат и интегрирование проводить в пределах от 0 до  $\Delta t_i$ . Тогда выражения (1.5) и (1.6) примут следующий вид

$$P_{\text{ср. кв. сут}} = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} \int_0^{\Delta t_i} P_i^2(t) dt}; \quad (1.7)$$

$$Q_{\text{ср. кв. сут}} = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} \int_0^{\Delta t_i} Q_i^2(t) dt}. \quad (1.8)$$

Отметим то, что изменение пределов интегрирования позволяет в некоторой степени упростить запись подынтегральных функций, входящих в (1.7) и (1.8), которые при заданной форме графиков активной (см. рис. 1.1) и реактивной нагрузок соответственно будут иметь вид

$$\begin{aligned}
P_i^2(t) &= \left( P_{\text{нач}i} + \frac{P_{\text{кон}i} - P_{\text{нач}i}}{\Delta t_i} t \right)^2 = \left( P_{\text{нач}i} + \frac{\Delta P_i}{\Delta t_i} t \right)^2 = \\
&= P_{\text{нач}i}^2 + 2P_{\text{нач}i} \frac{\Delta P_i}{\Delta t_i} t + \frac{\Delta P_i^2}{\Delta t_i^2} t^2;
\end{aligned} \tag{1.9}$$

$$\begin{aligned}
Q_i^2(t) &= \left( Q_{\text{нач}i} + \frac{Q_{\text{кон}i} - Q_{\text{нач}i}}{\Delta t_i} t \right)^2 = \left( Q_{\text{нач}i} + \frac{\Delta Q_i}{\Delta t_i} t \right)^2 = \\
&= Q_{\text{нач}i}^2 + 2Q_{\text{нач}i} \frac{\Delta Q_i}{\Delta t_i} t + \frac{\Delta Q_i^2}{\Delta t_i^2} t^2,
\end{aligned} \tag{1.10}$$

где  $P_{\text{нач}i}$  и  $Q_{\text{нач}i}$  – значения активной и реактивной мощности в начале  $i$ -го интервала времени;  $P_{\text{кон}i}$  и  $Q_{\text{кон}i}$  – значения активной и реактивной мощности в конце  $i$ -го интервала времени;  $\Delta P_i$  и  $\Delta Q_i$  – приращения соответственно активной и реактивной мощности на интервале времени  $\Delta t_i$ .

На рис. 1. наглядно представлены величины, которые входят в выражения 1.9 и 1.10.

Полученные подынтегральные функции (1.9) и (1.10) позволяют найти и сами интегралы

$$\begin{aligned}
\int_0^{\Delta t_i} P_1(t) dt &= \int_0^{\Delta t_i} \left( P_{\text{нач}i} + 2P_{\text{нач}i} \frac{\Delta P_i}{\Delta t_i} t + \frac{\Delta P_i^2}{\Delta t_i^2} t^2 \right) dt = \\
&= P_{\text{нач}i}^2 \Delta t_i + 2P_{\text{нач}i} \frac{\Delta P_i}{\Delta t_i} \frac{\Delta t_i^2}{2} + \frac{\Delta P_i^2}{\Delta t_i^2} \frac{\Delta t_i^3}{3} = \\
&= \left( P_{\text{нач}i}^2 + P_{\text{нач}i} \frac{\Delta P_i}{\Delta t_i} + \frac{\Delta P_i^2}{3} \right) \Delta t_i;
\end{aligned} \tag{1.11}$$

$$\begin{aligned}
\int_0^{\Delta t_i} Q_1(t) dt &= \int_0^{\Delta t_i} \left( Q_{\text{нач}i} + 2Q_{\text{нач}i} \frac{\Delta Q_i}{\Delta t_i} t + \frac{\Delta Q_i^2}{\Delta t_i^2} t^2 \right) dt = \\
&= Q_{\text{нач}i}^2 \Delta t_i + 2Q_{\text{нач}i} \frac{\Delta Q_i}{\Delta t_i} \frac{\Delta t_i^2}{2} + \frac{\Delta Q_i^2}{\Delta t_i^2} \frac{\Delta t_i^3}{3} = \\
&= \left( Q_{\text{нач}i}^2 + Q_{\text{нач}i} \frac{\Delta Q_i}{\Delta t_i} + \frac{\Delta Q_i^2}{3} \right) \Delta t_i.
\end{aligned} \tag{1.12}$$

Подставив вычисленные по выражениям (1.11) и (1.12) значения интегралов на каждом интервале времени суточных графиков активной и реактивной нагрузок соответственно в (1.7) и (1.8), получим искомые значения среднеквадратичных за сутки значений активной и реактивной мощности.

### 3. Коэффициент формы суточных графиков активной и реактивной мощности

Известно, что коэффициент формы графиков активной и реактивной нагрузок представляет собой отношение их среднеквадратичных значений за конкретный период времени к средним значениям за тот же период времени.

Учитывая вышесказанное, указанные коэффициенты рассчитывают по выражениям

$$K_{\text{ф. а. сут}} = \frac{P_{\text{ср. кв. сут}}}{P_{\text{ср. сут}}};$$
$$K_{\text{ф. р. сут}} = \frac{Q_{\text{ср. кв. сут}}}{Q_{\text{ср. сут}}}.$$

### 4. Число часов использования максимума активной и реактивной нагрузки за одни сутки

Число часов использования максимума активной нагрузки  $T_{\text{и. м. а}}$  за конкретный период времени представляет собой отношение активной энергии, пропущенной через узел СЭС за рассматриваемый период времени, к максимальной активной мощности, имевшей место в течение этого периода.

Учитывая вышесказанное, число часов использования максимума активной нагрузки за одни сутки рассчитывается по выражению

$$T_{\text{и. м. а. сут}} = \frac{W_{\text{а. сут}}}{P_{\text{макс}}} = \frac{24P_{\text{ср. сут}}}{P_{\text{макс}}}.$$

Аналогичную структуру имеют и выражения для определения числа часов использования максимума реактивной и полной нагрузки

$$T_{\text{и. м. р. сут}} = \frac{W_{\text{р. сут}}}{Q_{\text{макс}}} = \frac{24Q_{\text{ср. сут}}}{Q_{\text{макс}}};$$
$$T_{\text{и. м. сут}} = \frac{\int_0^{24} S(t) dt}{S_{\text{макс}}} = \frac{24S_{\text{ср. сут}}}{S_{\text{макс}}}.$$

### 5. Число часов максимальных потерь за сутки $\tau_{\text{сут}}$

Число часов максимальных потерь, используемое при определении нагрузочных потерь электроэнергии в элементах СЭС, может быть определено за любой промежуток времени, в том числе и за сутки.

Поскольку нагрузочные потери в токоведущих элементах обуславливаются протеканием по ним не только активной, но и реактивной мощности, то значение числа часов максимальных потерь следует определять, используя графики изменения полной мощности или тока во времени, соответственно  $S(t)$  и  $I(t)$ .

При условии, когда заданы графики активной и реактивной нагрузки раздельно, что имеет место в данной работе, то для определения числа часов максимальных потерь  $\tau$  можно воспользоваться одним из следующих методов:

1.  $\tau_{\text{сут}}$  по графику полной мощности.

Расчёт

Для этого необходимо построить суточный график нагрузки полной мощности и рассчитать  $\tau_{\text{сут}1}$ , используя выражение (1.13):

$$\tau_{\text{сут}1} = \frac{1}{S_{\text{макс}}^2} \int_0^{24} S^2(t) dt = \frac{\frac{24}{24} \int_0^{24} S^2(t) dt}{S_{\text{макс}}^2} = \frac{24 S_{\text{ср.кв.сут}}^2}{S_{\text{макс}}^2}, \quad (1.13)$$

где  $S_{\text{ср.кв.сут}}$  – среднеквадратичное значение полной мощности за сутки, кВ·А;  $S_{\text{макс}}$  – максимальное значение полной мощности за сутки, кВ·А.

Отметим то, что здесь и далее цифра в конце подстрочного индекса  $\tau_{\text{сут}}$  указывает на принадлежность порядковому номеру рассматриваемого метода.

Расчёт  $S_{\text{ср.кв.сут}}$  ведётся по формуле, аналогичной (1.7):

$$S_{\text{ср. кв. сут}1} = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} \int_0^{\Delta t_i} S_i^2(t) dt}.$$

Значения определённых интегралов, входящих в эту формулу, рассчитываются по выражению, аналогичному (1.11)

$$\begin{aligned} \int_0^{\Delta t_i} S^2(t) dt &= \int_0^{\Delta t_i} \left( S_{\text{нач}i}^2 + 2S_{\text{нач}i} \frac{\Delta S_i}{\Delta t} t + \frac{\Delta S_i^2}{\Delta t^2} t^2 \right) dt = \\ &= \left( S_{\text{нач}i}^2 + S_{\text{нач}i} \Delta S_i + \frac{\Delta S_i^2}{3} \right) \Delta t_i, \end{aligned}$$

где  $S_{\text{нач}i}$  – значение полной мощности в начале  $i$ -го интервала;  $\Delta S_i$  – приращение полной мощности на  $i$ -м интервале.

2. Расчёт  $\tau_{\text{сут}}$  по формуле, полученной на лекционных занятиях:

$$\tau_{\text{сут}2} = \frac{P_{\text{макс}}^2 \tau_{\text{а.сут}} + Q_{\text{макс}}^2 \tau_{\text{р.сут}}}{S_{\text{макс}}^2}, \quad (1.14)$$

где  $\tau_{\text{а.сут}}$  и  $\tau_{\text{р.сут}}$  – число часов максимальных потерь, обусловленных характером (формой) графиков соответственно активной и реактивной мощностей, которые определяются по выражениям, подобным (1.13)

$$\tau_{a.сут} = \frac{1}{P_{\max}^2} \int_0^{24} P^2(t) dt = \frac{\frac{24}{24} \int_0^{24} P^2(t) dt}{P_{\max}^2} = \frac{24 P_{\text{ср.кв.сут}}^2}{P_{\max}^2};$$

$$\tau_{p.сут} = \frac{1}{Q_{\max}^2} \int_0^{24} Q^2(t) dt = \frac{\frac{24}{24} \int_0^{24} Q^2(t) dt}{Q_{\max}^2} = \frac{24 Q_{\text{ср.кв.сут}}^2}{Q_{\max}^2}.$$

С использованием полученных значений среднеквадратичных величин активной, реактивной и полной мощностей можно проверить адекватность расчётного выражения

$$S_{\text{ср. кв. сут}}^2 = \sqrt{P_{\text{ср. кв. сут}}^2 + Q_{\text{ср. кв. сут}}^2}.$$

3. Расчёт  $\tau_{\text{сут}}$  с использованием эмпирической формулы, приводимой в справочниках:

$$\tau_{\text{сут}3} = \left( 0,124 + \frac{T_{\text{и.м.г}}}{10^4} \right)^2 T_{\text{сут}}, \quad (1.15)$$

где  $T_{\text{и.м.г}}$  – число часов использования максимума нагрузки за год, ч/год;  
 $T_{\text{сут}}$  – число часов в сутках, ч.

Число часов использования максимума нагрузки за год  $T_{\text{и.м.г}}$  можно определить, используя следующие выражения:

$$T_{\text{и.м.г}} = n T_{\text{и.м.сут}} = 24n \frac{S_{\text{ср.сут}}}{S_{\max}},$$

где  $n_{\text{г}}$  – число дней в году, равное 365.

Исходные данные своего варианта и результаты расчётов занести в табл. 1.2 и 1.3.

После завершения всех расчётов необходимо оформить отчёт по лабораторной работе.

В отчёте необходимо:

- показатели графиков нагрузки, которые требуется определить;
- зависимости  $P = f(t)$ ,  $Q = f(t)$  и  $S = f(t)$ , которые лучше разместить на одном графике. Кроме того, указать на каждом графике величину средней и среднеквадратичной мощности. Пример оформления графиков нагрузок представлен на рис. 1.2;
- результаты расчётов (табл. 1.2 и 1.3);
- выводы.

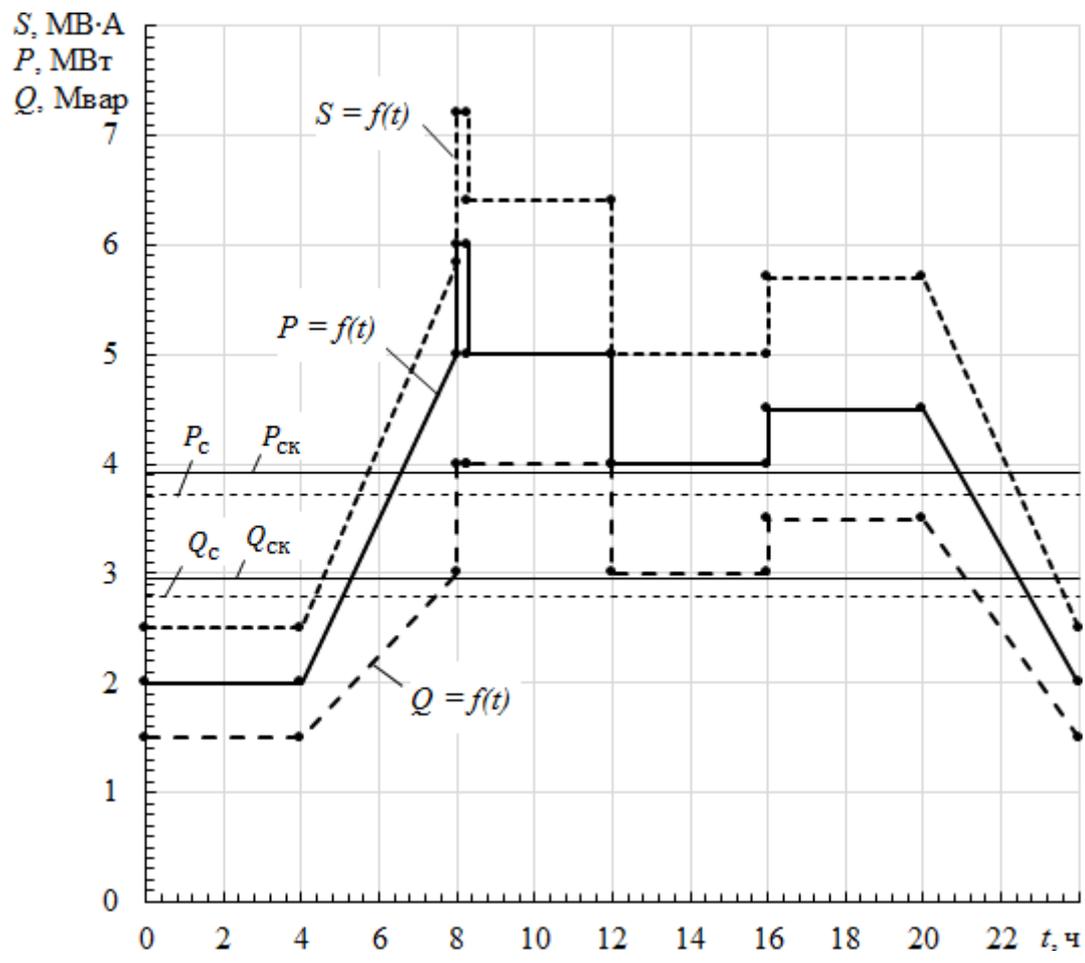


Рис. 1.2. Пример оформления графиков нагрузки средствами Microsoft Excel

Таблица 1.2

## Исходные данные и результаты расчётов

№ интервала времени суток	Интервал времени суток, ч			Значения активных и реактивных мощностей в начале и конце интервалов времени				Характерные особенности суточных графиков активной и реактивной нагрузок, используемых при определении их показателей					
	$t_i$	$t_{i+1}$	$\Delta t_i$	$P_{\text{нач}},$ МВт	$P_{\text{кон}},$ МВт	$Q_{\text{нач}},$ Мвар	$Q_{\text{кон}},$ Мвар	$\Delta P,$ МВт	$P_{\text{макс}},$ МВт	$P_{\text{мин}},$ МВт	$\Delta Q,$ Мвар	$Q_{\text{макс}},$ Мвар	$Q_{\text{мин}},$ Мвар
1													
2													
...													
8													

Окончание таблицы 1.2

№ интервала времени суток	Характерные особенности суточного графика нагрузки полной мощности, используемый при определении его показателей			Энергия, пропущенная через узел СЭС в течение интервала		$\int_0^{\Delta t_i} P_i^2(t) dt,$ (МВт) <sup>2</sup> ·ч	$\int_0^{\Delta t_i} Q_i^2(t) dt,$ (Мвар) <sup>2</sup> ·ч	$\int_0^{\Delta t_i} S_i^2(t) dt,$ (МВ·А) <sup>2</sup> ·ч
	$S_{\text{нач}},$ МВ·А	$S_{\text{кон}},$ МВ·А	$\Delta S,$ МВ·А	$W_a,$ МВт·ч	$W_p,$ Мвар·ч			
1								
2								
...								
8								
ИТОГО								

Таблица 1.3

## Параметры суточных графиков

Максимальные мощности в суточных графиках			Среднесуточные мощности			Среднеквадратичные мощности			
$P_{\text{макс}}$ , МВт	$Q_{\text{макс}}$ , Мвар	$S_{\text{макс}}$ , МВ·А	$P_{\text{ср.сут}}$ , МВт	$Q_{\text{ср.сут}}$ , Мвар	$S_{\text{ср.сут}}$ , МВ·А	$P_{\text{ср.кв.сут}}$ , МВт	$Q_{\text{ср.кв.сут}}$ , Мвар	$S_{\text{ср.кв.сут1}}$ , МВ·А	$S_{\text{ср.кв.сут2}}$ , МВ·А

Окончание табл. 1.3

Коэффициенты формы суточных графиков		Число часов использования максимума нагрузки за сутки			Число часов максимальных потерь				
$K_{\text{ф. а.сут}}$ , о.е.	$K_{\text{ф. р.сут}}$ , о.е.	$T_{\text{и. м. а.сут}}$ , ч/сут	$T_{\text{и. м. р.сут}}$ , ч/сут	$T_{\text{и. м. сут}}$ , ч/сут	$\tau_{\text{а.сут}}$ , ч/сут	$\tau_{\text{р.сут}}$ , ч/сут	$\tau_{\text{сут1}}$ , ч/сут	$\tau_{\text{сут2}}$ , ч/сут	$\tau_{\text{сут3}}$ , ч/сут

## Контрольные вопросы

С целью подготовки к защите лабораторной работы дайте ответы на следующие контрольные вопросы:

1. Что вы понимаете под средней активной и реактивной мощностями, и как они определяются?
2. Что собой представляет среднеквадратичная мощность?
3. Какова область использования среднеквадратичного тока?
4. В чём заключается физический смысл коэффициента использования установленной мощности  $k_{и.а}$  электроприёмника?
5. Приведите классификацию графиков электрических нагрузок и укажите область их использования.
6. График нагрузки какой смены суток следует применять при определении коэффициента использования установленной мощности электроприёмника?
7. Как связаны между собой средняя и среднеквадратичная мощности?
8. С какой целью снимаются суточные графики нагрузок?
9. Что собой представляет коэффициент спроса установленной мощности электроприёмника и чем он принципиально отличается от коэффициента использования?
10. В какие характерные сутки года следует снимать суточные графики нагрузок? Обоснуйте свой ответ.
11. Что вы понимаете под числом часов использования максимума активной нагрузки?
12. Что вы понимаете под числом часов максимальных потерь?
13. Что собой представляет коэффициент формы графика нагрузок? Какова область его применения?
14. Что будет происходить с коэффициентом формы графика нагрузок узла СЭС при возрастании числа электроприёмников, питающихся от неё? Обоснуйте свой ответ.
15. Определить по построенным графикам нагрузки расчетные мощности.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2**

### **ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ГОДОВЫХ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

#### **Цель работы**

- привитие навыков определения отдельных параметров, используемых при проектировании и эксплуатации систем электроснабжения (СЭС), по годовым графикам электрических нагрузок узлов СЭС;
- проверка теоретических положений и адекватности упрощенных выражений, используемых для определения отдельных показателей при проектировании СЭС.

#### **Общие положения**

Известно, что суточные графики нагрузок электроприёмников и узлов СЭС несут в себе надёжную информацию о режимах их работы и электропотреблении, обусловленных, главным образом, технологией производства, без учёта которой невозможно создать надёжно работающую и экономически выгодную систему электроснабжения.

На формирование графика нагрузки влияет много случайных факторов, которые математически не всегда можно учесть. Мощность, потребляемая отдельным электроприёмником, например, станком, зависит от формы и величины обрабатываемой детали, скорости подачи и глубины резания, времени, связанного с остановкой станка для замера размеров детали, и даже индивидуальных качеств токаря, обрабатывающего детали.

Электрические нагрузки промышленных предприятий являются основным исходным материалом для проектирования любой системы электроснабжения, выбора числа и мощности силовых трансформаторов и сечения проводов, кабелей, шин и т. д. Поэтому изучение методов расчета электрических нагрузок и практический анализ их графиков представляет большой интерес.

Для определения показателей годовых графиков нагрузок, как правило, формируются упорядоченные годовые графики по продолжительности. При этом используются суточные графики нагрузок, снятые в характерные сутки года (зимние, летние, осенне-весенние) и сутки недели (рабочие и празднично-выходные), и их повторяемость в течение года. Суточные графики в большинстве случаев снимаются с использованием счётчиков электрической энергии.

Однако показатели годовых графиков могут быть определены, не прибегая к построению упорядоченных годовых графиков, используя при этом показатели суточных графиков, снятых в характерные сутки, и сведения о повторяемости характерных суточных графиков в течение года, другими

словами – применяя нетрадиционный подход. В данной работе для определения показателей годовых графиков используется именно такой подход.

При подготовке к лабораторной работе и для её выполнения изучите теоретические положения, изложенные в [1].

Работа проводится с использованием персональных компьютеров, оснащённых стандартным пакетом программ Microsoft Office.

### Методические указания по проведению работы

1. В редакторе электронных таблиц Excel сформируйте таблицу, форма которой приведена ниже

Таблица 2.1

Показания счетчиков активной энергии  $W$ , кВт·ч и реактивной  $V$  – квар·ч, за характерные сутки

Момент времени съёма показаний счётчиков, ч	Летние				Зимние			
	Рабочие		Выходные		Рабочие		Выходные	
	$W$	$V$	$W$	$V$	$W$	$V$	$W$	$V$
0.0								
1.0								
.....								
.....								
24.0								

2. Внесите в сформированную табл. 2.1 заданный преподавателем вариант показаний счётчиков активной и реактивной энергии за 4 характерные сутки. Варианты показаний счётчиков представлены в табл. П.1–П.12.

3. Найдите средние активные и реактивные мощности за каждый час характерных суток по формулам:

$$P_{срi} = K_{тт} K_{тн} \frac{W_{i+1} - W_i}{\Delta t_i}, \text{ кВт};$$

$$Q_{срi} = K_{тт} K_{тн} \frac{V_{i+1} - V_i}{\Delta t_i}, \text{ квар},$$

где  $W_i$ ,  $W_{i+1}$  – показание счётчика активной энергии соответственно в начале и конце  $i$ -го часа суток, кВт·ч;  $V_i$ ,  $V_{i+1}$  – показание счётчика реактивной энергии соответственно в начале и конце  $i$ -го часа суток, квар·ч;  $K_{тт}$ ,  $K_{тн}$  – коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения, варианты численных значений которых приведены в таблице П.13 (вариант задаётся преподавателем);  $\Delta t_i$  – интервал время между  $i$  и  $i+1$  замерами, ч.

Полученные результаты занесите в табл. 2.2.

4. Постройте суточные графики активной, реактивной и полной мощности за все характерные сутки.

Таблица 2.2

Среднечасовые активная, реактивная и полная мощности

Интервал времени, ч	Летние сутки						Зимние сутки					
	Рабочие			Выходные			Рабочие			Выходные		
	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$S$ , кВ·А	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$S$ , кВ·А	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$S$ , кВ·А	$P$ , кВт	$Q$ , квар	$S$ , кВ·А
0–1												
1–2												
2–3												
...												
23–24												

5. По суточным графикам активной, реактивной и полной нагрузок определите следующие показатели:

– максимальные получасовые значения активной и реактивной нагрузок  $P_M$  и  $Q_M$ , а также максимальное значение полной мощности в каждые характерные сутки  $S_M$ ;

– средние за каждые характерные сутки активную и реактивную нагрузки

$$P_{\text{ср. сут}} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} P_i \Delta t_i,$$

$$Q_{\text{ср. сут}} = \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{24} Q_i \Delta t_i,$$

– среднеквадратичные активные и реактивные нагрузки за каждые характерные сутки

$$P_{\text{ср. кв. сут}} = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^n P_i^2 \Delta t_i},$$

$$Q_{\text{ср. кв. сут}} = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{i=1}^n Q_i^2 \Delta t_i};$$

– коэффициенты форм суточных графиков активной и реактивной нагрузок

$$K_{\text{ф. а. сут}} = \frac{P_{\text{ср. кв. сут}}}{P_{\text{ср. сут}}},$$

$$K_{\text{ф. п. сут}} = \frac{Q_{\text{ср. кв. сут}}}{Q_{\text{ср. сут}}};$$

– коэффициенты максимума активной и реактивной нагрузки

$$K_{\text{м. а}} = \frac{P_{\text{м}}}{\max(P_{\text{ср. см } j})}; K_{\text{м. р}} = \frac{Q_{\text{м}}}{\max(Q_{\text{ср. см } j})},$$

где  $P_{\text{ср. см}}$  и  $Q_{\text{ср. см}}$  – средние активная и реактивная мощности за одну смену (при расчётах принять трёхсменный режим работы);

Средние активная и реактивная мощности за  $j$ -ю смену определяются по следующим выражениям:

$$P_{\text{ср. см } j} = \frac{1}{T_{\text{см } j}} \sum_{i=1}^{n_{\text{см } j}} P_{ji} \Delta t_{ji}; Q_{\text{ср. см } j} = \frac{1}{T_{\text{см } j}} \sum_{i=1}^{n_{\text{см } j}} Q_{ji} \Delta t_{ji},$$

где  $T_{\text{см } j}$  – продолжительность  $j$ -й смены суток;  $n_{\text{см } j}$  – число интервалов времени  $\Delta t$  в  $j$ -ю смену суток с фиксированными значениями активной и реактивной мощности;

– коэффициенты заполнения графиков активных и реактивных нагрузок

$$K_{\text{з. г. а}}^{\text{сут}} = \frac{P_{\text{ср. сут}}}{P_{\text{м. сут}}}; K_{\text{з. г. р}}^{\text{сут}} = \frac{Q_{\text{ср. сут}}}{Q_{\text{м. сут}}},$$

где  $P_{\text{м. сут}}$  – максимальное значение активной мощности в рассматриваемом суточном графике активной нагрузки;  $Q_{\text{м. сут}}$  – максимальное значение реактивной мощности в рассматриваемом суточном графике реактивной нагрузки;

– коэффициенты мощности средневзвешенные за сутки  $\cos\varphi_{\text{ср. сут}}$  и в момент максимума полной нагрузки  $\cos\varphi_{(S=S_{\text{м}})}$ :

$$\cos\varphi_{\text{ср. сут}} = \frac{P_{\text{ср. сут}}}{\sqrt{P_{\text{ср. сут}}^2 + Q_{\text{ср. сут}}^2}}; \cos\varphi_{(S=S_{\text{м}})} = \frac{P_{(S=S_{\text{м}})}}{S_{\text{м}}},$$

где  $S_{\text{м}}$  – максимальное значение полной мощности, наблюдаемой в течение рассматриваемой сутки.

Результаты расчётов занесите в табл. 2.3



6. На суточных графиках активных и реактивных нагрузок покажите средние, среднеквадратичные, максимальные и расчетные нагрузки.

7. Сформируйте и постройте упорядоченные годовые графики активной, реактивной и полной мощности.

Упорядоченные графики нагрузок – графики, в которых мощности (токи) располагаются в порядке возрастания или убывания их величин (чаще в порядке убывания).

Для построения годовых графиков по продолжительности целесообразно сначала сформировать упорядоченные (по мере убывания) суточные графики активной, реактивной и полной мощности за каждые характерные сутки, используя при этом данные табл. 2.2. При этом мощности располагаем по мере их убывания, а суммарный интервал времени протекания  $i$ -го значения мощности в течение  $j$ -х характерных суток  $\Delta t_{ji}^{сут}$  находим путём суммирования отдельных  $k$ -х интервалов времени в суточном графике, в которых это значение мощности наблюдалось, т. е.

$$\Delta t_{ji}^{сут} = \sum_{k=1}^{n_{ji}} \Delta t_{ik}, \quad (2.1)$$

где  $n_{ji}$  – число интервалов времени в  $j$ -м характерном суточном графике с  $i$ -м значением мощности;  $\Delta t_{ik}$  – длительность  $k$ -го интервала времени в суточном графике с  $i$ -м значением мощности.

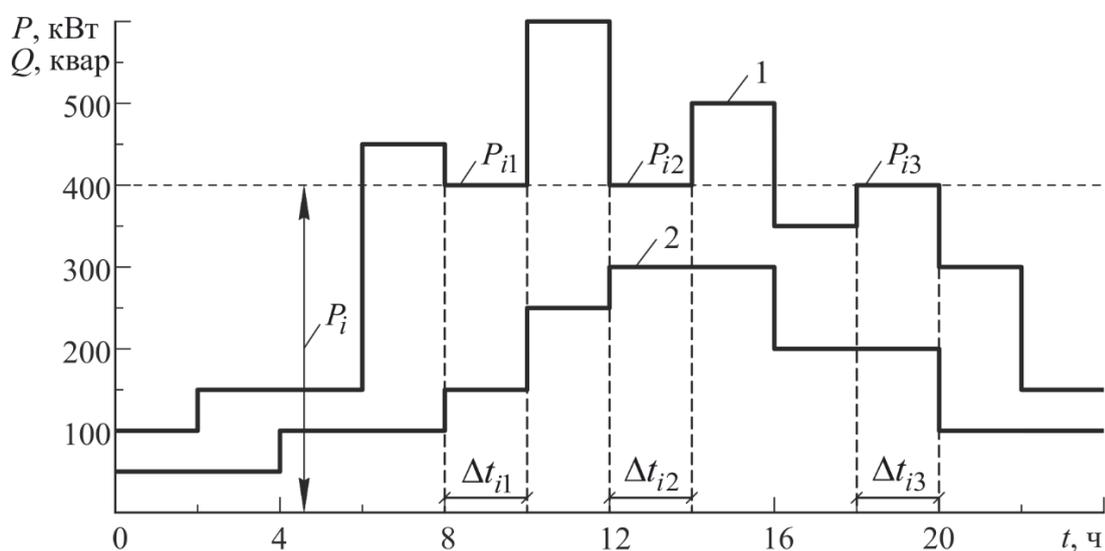


Рис. 2.1. Ступенчатые суточные графики нагрузки:  
1 – активная мощность; 2 – реактивная мощность

Учитывая то, что длительность интервалов времени между замерами в суточных графиках одинаковы, т. е.  $\Delta t_{ik} = \Delta t_{ин.сут} = const$ , выражение (2.1) можно записать в виде

$$\Delta t_{ji}^{сут} = \Delta t_{ин.сут} n_{ji}. \quad (2.2)$$

Полученные данные в результате формирования упорядоченных суточных графиков активной, реактивной и нагрузки занесите соответственно в табл. 2.4–2.6.

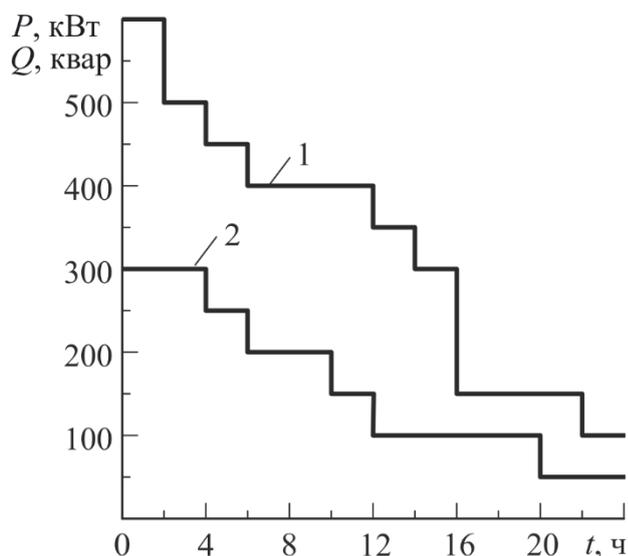


Рис. 2.2. Пример упорядоченных суточных графиков нагрузок: 1 – активная мощность; 2 – реактивная мощность

Суммарная продолжительность времени  $\Delta t_{год i}$  протекания через узел СЭС конкретных значений активной  $P_i$ , реактивной  $Q_i$  или полной  $S_i$  мощностей в течение периода наблюдения (в нашем случае одного года) определяются путём суммирования произведений интервалов времени их протекания в отдельных их характерных сутках  $\Delta t_{ji}$  на число таких суток  $n_j$

$$\Delta t_{год i} = \sum_{j=1}^m n_j \Delta t_{ji}, \quad (2.3)$$

где  $m$  – число характерных суточных графиков (в нашем случае  $m = 4$ ).

Количество дней в году для каждого вида характерного суточного графика следует принять по табл. П.14 согласно заданному преподавателем варианту.

Следует отметить, что количество ступеней в упорядоченных годовых графиках активной, реактивной и полной мощности в общем случае может быть различным. Следовательно, интервалы времени протекания через узел СЭС конкретных значений активной  $P_i$ , реактивной  $Q_i$  или полной  $S_i$  мощностей  $\Delta t_{год i}$  в общем случае могут не совпадать. В нашем случае они одинаковы.

Отметим, что структура выражений (2.2) и (2.3) являются одинаковой для всех видов мощностей (активной, реактивной и полной). Поэтому далее

их принадлежность указанным мощностям будет отмечена добавлением в подстрочные индексы соответственно знаков «*p*», «*q*» и «*s*».

Данные, приведенные в табл. 2.4–2.6, выражение (2.3) и изложенная выше методика позволяют относительно просто сформировать упорядоченные годовые графики активной, реактивной и полной нагрузок. Полученные при этом результаты занесите соответственно в табл. 2.7–2.9.

Таблица 2.4

Упорядоченные суточные графики активной нагрузки

№ интервала упорядоченного суточного графика	Зимние рабочие сутки		Летние рабочие сутки		Зимние выходные сутки		Летние выходные сутки	
	<i>P</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут	<i>P</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут	<i>P</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут	<i>P</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут
1								
2								
....								
....								
<i>n</i>								

Таблица 2.5

Упорядоченные суточные графики реактивной нагрузки

№ интервала упорядоченного суточного графика	Зимние рабочие сутки		Летние рабочие сутки		Зимние выходные сутки		Летние выходные сутки	
	<i>Q</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут	<i>Q</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут	<i>Q</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут	<i>Q</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут
1								
2								
....								
<i>n</i>								

Таблица 2.6

Упорядоченные суточные графики полной нагрузки

№ интервала упорядоченного суточного графика	Зимние рабочие сутки		Летние рабочие сутки		Зимние выходные сутки		Летние выходные сутки	
	<i>S</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут	<i>S</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут	<i>S</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут	<i>S</i> , кВт	$\Delta t_i^{сут}$ , ч/сут
1								
2								
....								
<i>n</i>								

Таблица 2.7

Упорядоченный годовой график активной нагрузки

№ ступени упорядоченного графика	1	2	3	4	...	$N_{г. а}$
Величина активной мощности ступени $P_i$ , кВт						
Продолжительность времени протекания мощности $P_i$ в течение года $\Delta t_{год. pi}$ , ч/год						

Таблица 2.8

Упорядоченный годовой график реактивной нагрузки

№ ступени упорядоченного графика	1	2	3	4	...	$N_{г. р}$
Величина активной мощности ступени $Q_i$ , кВт						
Продолжительность времени протекания мощности $Q_i$ в течение года $\Delta t_{год. qi}$ , ч/год						

Таблица 2.9

Упорядоченный годовой график полной нагрузки

№ ступени упорядоченного графика	1	2	3	4	...	$N_{г. s}$
Величина активной мощности ступени $S_i$ , кВт						
Продолжительность времени протекания мощности $S_i$ в течение года $\Delta t_{год. si}$ , ч/год						

8. Используя упорядоченные годовые графики нагрузок, определите следующие показатели:

– годовое потребление активной и реактивной энергии

$$W_{а. год} = \sum_{i=1}^{N_{г.а}} P_i \Delta t_{год. pi}; \quad W_{р. год} = \sum_{i=1}^{N_{г.р}} Q_i \Delta t_{год. pi},$$

где  $N_{г. а}$  и  $N_{г. р}$  – число ступеней в упорядоченных годовых графиках соответственно активной и реактивной нагрузки;

– среднегодовую активную и реактивную мощности

$$P_{\text{ср. год}} = \frac{W_{\text{а. год}}}{T_{\text{год}}}; \quad Q_{\text{ср. год}} = \frac{W_{\text{р. год}}}{T_{\text{год}}},$$

где  $T_{\text{год}}$  – годовое число часов, равное 8760 ч/год;

– среднеквадратичную за год активную и реактивную мощности

$$P_{\text{ср. кв. год}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{год}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{г. а}}} P_i^2 \Delta t_{\text{год. pi}}}, \quad Q_{\text{ср. кв. год}} = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{год}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{г. р}}} Q_i^2 \Delta t_{\text{год. qi}}};$$

– среднегодовой коэффициент реактивной мощности

$$\text{tg}\varphi_{\text{ср. год}} = \frac{Q_{\text{ср. год}}}{P_{\text{ср. год}}};$$

– коэффициенты заполнения годовых графиков активных и реактивных нагрузок

$$K_{\text{з. г. а}}^{\text{год}} = \frac{P_{\text{ср. год}}}{P_{\text{м. год}}}; \quad K_{\text{з. г. р}}^{\text{год}} = \frac{Q_{\text{ср. год}}}{Q_{\text{м. год}}},$$

где  $P_{\text{м. год}}$  и  $Q_{\text{м. год}}$  – максимальные значения активной и реактивной мощности, наблюдаемые в соответствующих годовых графиках;

– коэффициенты формы годовых графиков активных и реактивных нагрузок

$$K_{\text{ф. а. год}} = \frac{P_{\text{ср. кв. год}}}{P_{\text{ср. год}}}, \quad K_{\text{ф. р. год}} = \frac{Q_{\text{ср. кв. год}}}{Q_{\text{ср. год}}};$$

– годовое число часов использования максимума активной и реактивной нагрузок, ч/год

$$T_{\text{и. м. а}}^{\text{год}} = \frac{1}{P_{\text{м. год}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{г. а}}} P_i \Delta t_{\text{год. pi}}, \quad T_{\text{и. м. р}}^{\text{год}} = \frac{1}{Q_{\text{м. год}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{г. р}}} Q_i \Delta t_{\text{год. qi}};$$

– годовое число часов максимальных потерь, ч/год

$$\tau_{\text{год 1}} = \frac{P_{\text{м. год}}^2 \tau_{\text{год. р}} + Q_{\text{м. год}}^2 \tau_{\text{год. q}}}{S_{\text{м}}^2}, \quad (2.4)$$

где  $S_{\text{м}}$  – максимальное значение полной мощности, определяется по суточным графикам полной мощности;  $\tau_{\text{год. р}}$  и  $\tau_{\text{год. q}}$  – годовое число часов максимальных потерь, найденные с использованием упорядоченных годовых графиков соответственно активной и реактивной нагрузки по следующим выражениям

$$\tau_{\text{год. р}} = \frac{1}{P_{\text{м. год}}^2} \sum_{i=1}^{\text{а}} P_i^2 \Delta t_{\text{год. pi}}, \quad \tau_{\text{год. q}} = \frac{1}{Q_{\text{м. год}}^2} \sum_{i=1}^{\text{р}} Q_i^2 \Delta t_{\text{год. qi}}.$$

При наличии упорядоченных годовых графиков полной мощности годовое число часов максимальных потерь также можно найти по формуле

$$\tau_{\text{год}2} = \frac{1}{S_{\text{м.год}}^2} \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} S_i^2 \Delta t_{\text{год.}si}, \quad (2.5)$$

В работе требуется найти число часов максимальных потерь, используя обе вышеприведенные формулы (2.4) и (2.5) и сопоставить полученные результаты;

– коэффициент сменности по энергоиспользованию

$$\alpha_{\text{см}} = \frac{W_{\text{а.год}}}{n_{\text{см}}^{\text{сут}} n_{\text{год}} W_{\text{см. макс}}} = \frac{W_{\text{а.год}}}{n_{\text{см}}^{\text{сут}} n_{\text{год}} T_{\text{см}} P_{\text{ср. см. макс}}},$$

где  $n_{\text{см}}^{\text{сут}}$  – число смен в течение одних суток, см/сут;  $n_{\text{год}}$  – число дней в году, сут/год;  $T_{\text{см}}$  – продолжительность одной смены, ч/см.

Построить годовые упорядоченные графики нагрузок и показать на них среднегодовые активную и реактивную мощности, годовое число часов использования максимума активной и реактивной нагрузок, а также число часов максимальных потерь  $\tau_p$  и  $\tau_q$ .

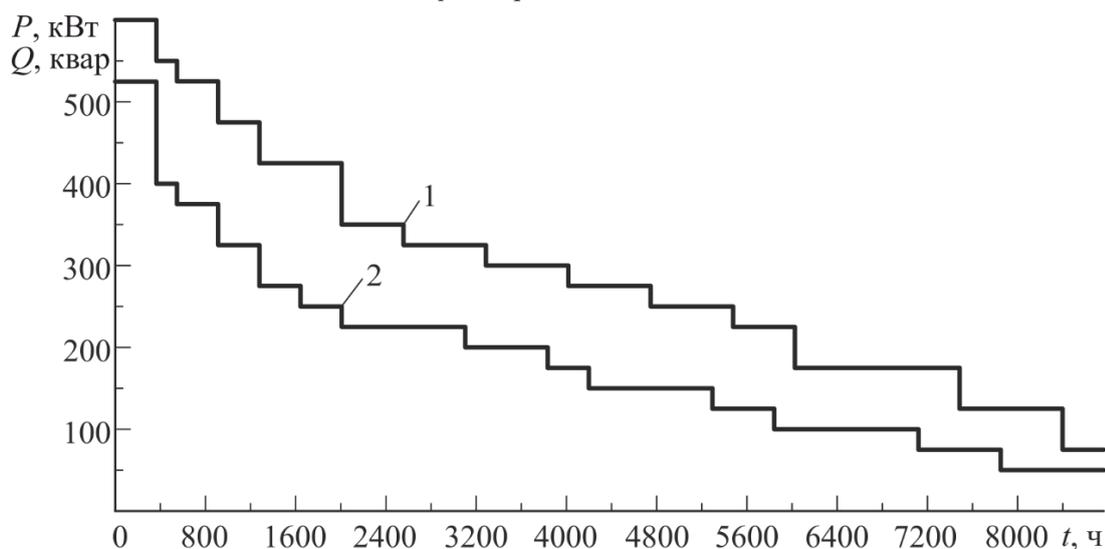


Рис. 2.3. Пример упорядоченных годовых графиков нагрузки:  
1 – активная мощность; 2 – реактивная мощность

9. Используя найденные в пункте 5 показатели суточных графиков и сведения об их повторяемости (см. табл. 2.3), рассчитать показатели годовых графиков по нижеприведенным выражениям и сопоставить их с такими же показателями, полученными в п. 8:

– годовое потребление активной и реактивной энергии

$$W_{\text{а. год}} = 24 \sum_j^m n_j P_{\text{ср. сут } j}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/год};$$

$$W_{\text{р. год}} = 24 \sum_j^m n_j Q_{\text{ср. сут } j}, \text{ квар}\cdot\text{ч/год};$$

где  $m$  – число характерных суточных графиков, в нашем случае  $m = 4$ ;

– средние за год активную и реактивную мощности

$$P_{\text{ср. год}} = \frac{\sum_{j=1}^m n_j P_{\text{ср } j}}{n_{\text{год}}}, \quad Q_{\text{ср. год}} = \frac{\sum_{j=1}^m n_j Q_{\text{ср } j}}{n_{\text{год}}};$$

– число часов использования максимума активной и реактивной мощности

$$T_{\text{и. м. а}}^{\text{год}} = \frac{24}{P_{\text{м. год}}} \sum_{j=1}^m n_j P_{\text{ср. сут } j}, \quad T_{\text{и. м. р}}^{\text{год}} = \frac{24}{Q_{\text{м. год}}} \sum_{j=1}^m n_j Q_{\text{ср. сут } j};$$

– среднеквадратичные значения за год активной, реактивной и полной мощности

$$P_{\text{ср. кв. год}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{год}}} \sum_{j=1}^m n_j P_{\text{ср. кв. сут } j}^2},$$

$$Q_{\text{ср. кв. год}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{год}}} \sum_{j=1}^m n_j Q_{\text{ср. кв. сут } j}^2},$$

$$S_{\text{ср. кв. год}} = \sqrt{\frac{1}{n_{\text{год}}} \sum_{j=1}^m n_j S_{\text{ср. кв. сут } j}^2}.$$

Здесь  $S_{\text{ср. кв. сут } j}$  – среднеквадратичное значение полной мощности в  $j$ -е характерные сутки, которые определяются по выражению

$$S_{\text{ср. кв. сут } j} = \sqrt{P_{\text{ср. кв. сут } j}^2 + Q_{\text{ср. кв. сут } j}^2};$$

– годовое число часов максимальных потерь

$$\tau_{\text{год}} = \frac{24}{S_{\text{м}}^2} \sum_{j=1}^m n_j S_{\text{ср. кв. сут } j}^2 = \frac{24}{S_{\text{м}}^2} \sum_{j=1}^m n_j (P_{\text{ср. кв. сут } j}^2 + Q_{\text{ср. кв. сут } j}^2)$$

Проведите сопоставление результатов, полученных в пп. 8 и 9, сделайте соответствующие выводы.

Оформите отчёт в соответствии с требованиями, изложенными в начале учебного пособия.

## Контрольные вопросы

С целью подготовки к защите лабораторной работы дайте ответы на следующие контрольные вопросы:

1. Что собой представляют упорядоченные графики электрических нагрузок?
2. С какой целью строятся упорядоченные годовые графики нагрузок?
3. Опишите методику построения упорядоченных годовых графиков.
4. В какие характерные сутки года снимаются суточные графики нагрузок?
5. Что собой представляет коэффициент заполнения суточного графика нагрузок  $K_{3.Г}^{сут}$ ?
6. Что характеризует коэффициент сменности по энергоиспользованию?
7. Какая связь существует между числом часов использования максимума нагрузки  $T_{и.м}$  и числом часов максимальных потерь  $\tau$ ?
8. Что собой представляют коэффициенты формы графиков нагрузок  $K_{ф.г}$ , и какова область их использования?
9. При каком условии будут равными числа часов максимальных потерь  $\tau_p$ ,  $\tau_q$ , и  $\tau$ , найденные путём обработки графиков соответственно активной, реактивной и полной мощности.
10. Всегда ли можно ограничиться нахождением числа часов максимальных потерь, используя только график активной нагрузки? Обоснуйте свой ответ.
11. Докажите справедливость выражения

$$S_{\text{ср. кв. сут } j} = \sqrt{P_{\text{ср. кв. сут } j}^2 + Q_{\text{ср. кв. сут } j}^2} .$$

## Приложение к лабораторной работе №2

Таблица П.1

Показания счётчиков активной и реактивной энергии

Часы замер- ов	Зимние сутки				Летние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	30,00	60,00	25,00	40,00	40,00	15,00	10,00	35,00
1.00	30,43	60,37	25,23	40,27	40,35	15,31	10,25	35,24
2.00	30,85	60,74	25,45	40,54	40,70	15,62	10,50	35,48
3.00	31,28	61,10	25,68	40,80	41,05	15,92	10,75	35,72
4.00	31,73	61,49	25,90	41,07	41,40	16,23	11,00	35,96
5.00	32,18	61,87	26,13	41,34	41,75	16,54	11,25	36,20
6.00	32,65	62,26	26,35	41,61	42,13	16,86	11,53	36,46
7.00	33,13	62,65	26,58	41,88	42,50	17,17	11,80	36,72
8.00	33,60	63,04	26,80	42,14	42,88	17,49	12,08	36,98
9.00	34,10	63,44	27,00	42,40	43,25	17,80	12,35	37,22
10.00	34,60	63,84	27,20	42,65	43,63	18,12	12,63	37,46
11.00	35,10	64,24	27,40	42,90	44,00	18,44	12,90	37,70
12.00	35,58	64,62	27,60	43,15	44,43	18,78	13,20	37,98
13.00	36,05	65,01	27,80	43,40	44,85	19,12	13,50	38,26
14.00	36,50	65,39	28,00	43,66	45,28	19,47	13,80	38,54
15.00	36,95	65,77	28,20	43,91	45,70	19,81	14,10	38,82
16.00	37,44	66,16	28,40	44,16	46,09	20,13	14,38	39,08
17.00	37,92	66,56	28,60	44,41	46,47	20,45	14,65	39,34
18.00	38,41	66,95	28,80	44,66	46,86	20,77	14,93	39,60
19.00	38,88	67,33	29,03	44,93	47,31	21,13	15,28	39,92
20.00	39,36	67,72	29,25	45,20	47,76	21,49	15,63	40,24
21.00	39,81	68,10	29,48	45,47	48,21	21,85	15,98	40,56
22.00	40,26	68,48	29,70	45,74	48,61	22,18	16,30	40,84
23.00	40,68	68,84	29,93	46,00	49,01	22,51	16,63	41,12
24.00	41,11	69,20	30,15	46,27	49,36	22,82	16,88	41,36

Таблица П.2

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замер- ов	Зимние сутки				Летние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	15,00	20,00	40,00	70,00	10,00	20,00	45,00	75,00
1.00	15,60	20,63	40,24	70,39	10,27	20,23	45,22	75,19
2.00	16,08	21,18	40,48	70,77	10,54	20,45	45,44	75,37
3.00	16,44	21,65	40,72	71,16	10,81	20,68	45,67	75,56
4.00	16,80	22,11	40,96	71,54	11,08	20,90	45,89	75,74
5.00	17,12	22,56	41,20	71,93	11,38	21,13	46,11	75,93
6.00	17,50	23,02	41,44	72,31	11,68	21,35	46,33	76,11
7.00	17,84	23,47	41,68	72,70	12,16	21,75	46,55	76,30
8.00	18,46	24,12	41,92	73,08	12,70	22,18	46,78	76,48
9.00	19,17	24,80	42,12	73,43	13,30	22,63	46,94	76,62
10.00	19,94	25,45	42,32	73,78	13,90	23,13	47,10	76,75
11.00	20,62	26,06	42,52	74,13	14,44	23,58	47,26	76,89
12.00	21,24	26,71	42,72	74,48	14,92	23,98	47,42	77,02
13.00	21,90	27,37	42,92	74,83	15,46	24,38	47,59	77,16
14.00	22,63	28,05	43,12	75,18	16,00	24,83	47,75	77,29
15.00	23,39	28,68	43,32	75,53	16,60	25,33	47,91	77,43
16.00	24,03	29,23	43,52	75,88	17,20	25,83	48,07	77,56
17.00	24,53	29,81	43,72	76,23	17,74	26,28	48,23	77,70
18.00	25,10	30,41	43,92	76,58	18,22	26,65	48,46	77,88
19.00	25,72	31,00	44,14	76,94	18,58	27,03	48,68	78,07
20.00	26,34	31,59	44,37	77,31	18,94	27,43	48,90	78,25
21.00	26,92	32,17	44,61	77,69	19,24	27,83	49,12	78,44
22.00	27,54	32,76	44,85	78,08	19,54	28,23	49,34	78,62
23.00	28,19	33,38	45,09	78,46	19,84	28,58	49,57	78,81
24.00	28,78	33,97	45,33	78,85	20,11	28,93	49,79	78,99

Таблица П.3

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замер- ов	Летние сутки				Зимние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	45,00	85,00	65,00	25,00	30,00	55,00	45,00	85,00
1.00	45,46	85,44	65,30	25,35	30,20	55,30	45,20	85,28
2.00	45,91	85,87	65,60	25,70	30,40	55,60	45,40	85,56
3.00	46,33	86,30	65,90	26,05	30,60	55,90	45,60	85,84
4.00	46,81	86,73	66,20	26,40	30,80	56,20	45,80	86,12
5.00	47,32	87,19	66,50	26,75	31,05	56,54	46,00	86,40
6.00	47,80	87,64	66,80	27,10	31,30	56,88	46,20	86,68
7.00	48,30	88,10	67,10	27,45	31,64	57,30	46,40	86,96
8.00	48,82	88,58	67,34	27,77	32,01	57,72	46,56	87,21
9.00	49,30	89,04	67,58	28,08	32,38	58,16	46,72	87,46
10.00	49,77	89,48	67,82	28,40	32,72	58,57	46,88	87,72
11.00	50,33	89,96	68,06	28,71	33,08	58,99	47,04	87,97
12.00	50,87	90,44	68,30	29,03	33,40	59,39	47,20	88,22
13.00	51,47	90,94	68,54	29,34	33,68	59,77	47,36	88,47
14.00	52,00	91,40	68,78	29,66	33,96	60,13	47,52	88,72
15.00	52,60	91,90	69,02	29,97	34,29	60,55	47,68	88,98
16.00	53,20	92,40	69,26	30,29	34,67	60,98	47,84	89,23
17.00	53,65	92,85	69,50	30,60	35,05	61,42	48,00	89,48
18.00	54,19	93,32	69,80	30,92	35,42	61,85	48,20	89,73
19.00	54,75	93,81	70,10	31,27	35,77	62,27	48,40	90,01
20.00	55,32	94,30	70,40	31,62	36,11	62,68	48,60	90,29
21.00	55,74	94,72	70,70	31,97	36,41	63,06	48,80	90,57
22.00	56,33	95,21	71,00	32,32	36,73	63,45	49,00	90,85
23.00	56,87	95,68	71,30	32,67	37,03	63,80	49,20	91,13
24.00	57,36	96,13	71,60	33,02	37,28	64,15	49,40	91,41

Таблица П.4

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замер- ов	Летние сутки				Зимние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	10,00	30,00	50,00	70,00	20,00	40,00	60,00	80,00
1.00	10,68	30,72	50,46	70,56	20,53	40,60	60,33	80,45
2.00	11,36	31,44	50,91	71,12	21,05	41,19	60,66	80,90
3.00	12,04	32,16	51,37	71,68	21,54	41,76	60,99	81,35
4.00	12,72	32,88	51,82	72,24	22,03	42,34	61,32	81,80
5.00	13,40	33,60	52,28	72,80	22,52	42,91	61,65	82,25
6.00	14,08	34,32	52,73	73,36	23,01	43,49	61,98	82,70
7.00	14,76	35,04	53,19	73,92	23,50	44,06	62,31	83,15
8.00	15,44	35,76	53,64	74,48	23,99	44,63	62,64	83,60
9.00	16,24	36,56	54,03	75,01	24,69	45,33	63,03	84,08
10.00	17,04	37,36	54,41	75,53	25,39	46,03	63,42	84,56
11.00	17,84	38,16	54,80	76,06	26,09	46,73	63,81	85,04
12.00	18,52	38,88	55,18	76,58	26,79	47,43	64,20	85,52
13.00	19,20	39,60	55,57	77,11	27,28	48,01	64,59	86,00
14.00	20,00	40,40	55,95	77,63	27,98	48,71	64,98	86,48
15.00	20,80	41,20	56,34	78,16	28,68	49,41	65,37	86,96
16.00	21,60	42,00	56,72	78,68	29,38	50,11	65,76	87,44
17.00	22,30	42,74	57,11	79,21	30,08	50,81	66,09	87,89
18.00	23,02	43,49	57,49	79,77	30,57	51,38	66,42	88,34
19.00	23,74	44,23	57,95	80,33	31,13	52,01	66,75	88,79
20.00	24,46	44,98	58,40	80,89	31,69	52,64	67,08	89,24
21.00	25,18	45,72	58,86	81,45	32,25	53,27	67,41	89,69
22.00	25,90	46,46	59,31	82,01	32,81	53,90	67,74	90,14
23.00	26,58	47,18	59,77	82,57	33,34	54,51	68,07	90,59
24.00	27,26	47,90	60,22	83,13	33,86	55,12	68,40	91,04

Таблица П.5

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замер- ов	Летние сутки				Зимние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00
1.00	10,35	20,35	30,10	40,18	50,32	60,29	70,09	80,15
2.00	10,70	20,70	30,20	40,36	50,63	60,58	70,18	80,30
3.00	11,05	21,04	30,30	40,54	50,95	60,87	70,27	80,45
4.00	11,40	21,39	30,40	40,72	51,26	61,16	70,36	80,60
5.00	11,75	21,74	30,50	40,90	51,58	61,45	70,45	80,75
6.00	12,10	22,09	30,60	41,08	51,89	61,74	70,54	80,90
7.00	12,45	22,44	30,70	41,26	52,21	62,03	70,63	81,05
8.00	13,17	22,93	30,75	41,38	52,85	62,45	70,68	81,15
9.00	14,17	23,53	30,80	41,50	53,75	62,95	70,72	81,25
10.00	15,17	24,13	30,85	41,62	54,65	63,45	70,77	81,35
11.00	16,12	24,70	30,90	41,74	55,51	63,92	70,81	81,45
12.00	16,90	25,18	30,95	41,86	56,21	64,32	70,86	81,55
13.00	17,40	25,60	31,00	41,98	56,66	64,67	70,90	81,65
14.00	18,12	26,11	31,05	42,10	57,31	65,10	70,95	81,75
15.00	19,02	26,68	31,10	42,22	58,12	65,57	70,99	81,85
16.00	19,87	27,24	31,15	42,34	58,88	66,04	71,04	81,95
17.00	20,59	27,76	31,20	42,46	59,53	66,47	71,08	82,05
18.00	21,37	28,30	31,25	42,58	60,23	66,92	71,13	82,15
19.00	22,27	28,87	31,30	42,70	61,04	67,40	71,17	82,25
20.00	23,12	29,43	31,35	42,82	61,80	67,86	71,22	82,35
21.00	24,12	30,03	31,45	43,00	62,70	68,36	71,31	82,50
22.00	25,07	30,61	31,55	43,18	63,56	68,85	71,40	82,65
23.00	25,72	31,09	31,65	43,36	64,14	69,25	71,49	82,80
24.00	26,27	31,51	31,75	43,54	64,64	69,60	71,58	82,95

Таблица П.6

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замеров	Летние сутки				Зимние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	15,00	25,00	35,00	45,00	20,00	30,00	40,00	50,00
1.00	15,68	25,69	35,36	45,54	20,60	30,60	40,32	50,47
2.00	16,35	26,38	35,72	46,07	21,20	31,20	40,63	50,94
3.00	17,03	27,06	36,08	46,61	21,80	31,81	40,95	51,41
4.00	17,70	27,75	36,44	47,14	22,40	32,41	41,26	51,88
5.00	18,46	28,47	36,80	47,68	23,07	33,04	41,58	52,35
6.00	19,21	29,19	37,16	48,22	23,74	33,67	41,89	52,81
7.00	19,97	29,91	37,52	48,75	24,42	34,30	42,21	53,28
8.00	20,72	30,63	37,88	49,29	25,09	34,93	42,52	53,75
9.00	21,48	31,35	38,16	49,77	25,76	35,56	42,77	54,17
10.00	22,38	32,15	38,44	50,25	26,56	36,26	43,01	54,59
11.00	23,28	32,95	38,72	50,73	27,36	36,96	43,26	55,01
12.00	23,97	33,64	39,00	51,21	27,98	37,56	43,50	55,43
13.00	24,80	34,40	39,28	51,69	28,71	38,23	43,75	55,85
14.00	25,68	35,20	39,56	52,17	29,50	38,93	43,99	56,27
15.00	26,54	35,96	39,84	52,65	30,26	39,59	44,24	56,69
16.00	27,39	36,72	40,12	53,13	31,02	40,26	44,48	57,11
17.00	28,25	37,48	40,40	53,61	31,78	40,92	44,73	57,53
18.00	29,10	38,24	40,68	54,09	32,54	41,59	44,97	57,95
19.00	29,96	39,00	41,04	54,62	33,30	42,25	45,29	58,42
20.00	30,63	39,70	41,40	55,16	33,90	42,86	45,60	58,89
21.00	31,31	40,39	41,76	55,70	34,50	43,47	45,91	59,36
22.00	31,98	41,09	42,12	56,23	35,10	44,08	46,23	59,83
23.00	32,66	41,78	42,48	56,77	35,70	44,69	46,54	60,30
24.00	33,33	42,48	42,84	57,30	36,30	45,30	46,86	60,77

Таблица П.7

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замер- ов	Летние сутки				Зимние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	60,00	70,00	80,00	90,00	55,00	65,00	75,00	85,00
1.00	60,72	70,63	80,60	90,51	55,70	65,56	75,60	85,51
2.00	61,44	71,26	81,20	91,02	56,39	66,12	76,20	86,02
3.00	62,16	71,89	81,80	91,53	57,09	66,67	76,80	86,53
4.00	62,88	72,52	82,40	92,04	57,78	67,23	77,40	87,04
5.00	63,60	73,15	83,00	92,55	58,46	67,77	78,00	87,55
6.00	64,32	73,78	83,76	93,12	59,22	68,34	78,76	88,12
7.00	65,22	74,48	84,56	93,69	60,02	68,94	79,56	88,69
8.00	66,12	75,18	85,36	94,26	60,82	69,54	80,36	89,26
9.00	67,02	75,88	85,96	94,78	61,54	70,11	80,96	89,78
10.00	67,92	76,58	86,56	95,29	62,26	70,68	81,56	90,29
11.00	68,82	77,28	87,16	95,81	62,98	71,25	82,16	90,81
12.00	69,54	77,91	87,76	96,32	63,70	71,82	82,76	91,32
13.00	70,44	78,61	88,36	96,84	64,42	72,39	83,36	91,84
14.00	71,34	79,31	88,96	97,36	65,14	72,96	83,96	92,36
15.00	72,24	80,01	89,56	97,87	65,86	73,53	84,56	92,87
16.00	73,05	80,68	90,16	98,39	66,58	74,10	85,16	93,39
17.00	73,91	81,38	90,92	98,96	67,38	74,70	85,92	93,96
18.00	74,76	82,08	91,68	99,53	68,18	75,30	86,68	94,53
19.00	75,62	82,73	92,44	100,10	68,90	75,88	87,44	95,10
20.00	76,43	83,39	93,08	100,64	69,62	76,44	88,08	95,64
21.00	77,28	84,07	93,72	101,18	70,34	77,01	88,72	96,18
22.00	78,14	84,75	94,36	101,72	71,06	77,57	89,36	96,72
23.00	78,99	85,43	94,96	102,24	71,75	78,13	89,96	97,24
24.00	79,85	86,11	95,56	102,76	72,45	78,69	90,56	97,76

Таблица П.8

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замер- ов	Летние сутки				Зимние сутки			
	Рабочие		Выходные		Рабочие		Выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	15,00	25,00	35,00	45,00	55,00	65,00	75,00	85,00
1.00	15,54	25,53	35,14	45,27	55,45	65,36	75,09	85,15
2.00	16,08	26,06	35,27	45,53	55,90	65,72	75,18	85,30
3.00	16,62	26,60	35,41	45,80	56,35	66,08	75,27	85,46
4.00	17,16	27,13	35,68	46,18	56,80	66,44	75,45	85,68
5.00	17,70	27,66	35,99	46,60	57,25	66,80	75,66	85,92
6.00	18,24	28,19	36,26	46,99	57,70	67,16	75,84	86,14
7.00	18,92	28,79	36,44	47,30	58,15	67,52	75,96	86,32
8.00	19,73	29,45	36,62	47,62	58,60	67,88	76,08	86,50
9.00	20,58	30,13	36,71	47,84	59,08	68,27	76,14	86,62
10.00	21,48	30,83	36,80	48,07	59,58	68,67	76,20	86,75
11.00	22,38	31,53	36,89	48,29	60,08	69,07	76,26	86,88
12.00	23,01	32,11	36,98	48,51	60,58	69,47	76,32	87,01
13.00	23,87	32,81	37,07	48,74	61,05	69,86	76,38	87,14
14.00	24,72	33,51	37,16	48,96	61,53	70,24	76,44	87,26
15.00	25,62	34,21	37,25	49,19	62,03	70,64	76,50	87,39
16.00	26,52	34,91	37,34	49,41	62,53	71,04	76,56	87,52
17.00	27,24	35,54	37,43	49,63	63,03	71,44	76,62	87,65
18.00	28,14	36,24	37,52	49,86	63,53	71,84	76,68	87,78
19.00	29,04	36,94	37,61	50,08	64,03	72,24	76,74	87,90
20.00	29,94	37,64	37,70	50,31	64,50	72,63	76,80	88,03
21.00	30,84	38,34	37,79	50,53	64,98	73,02	76,86	88,16
22.00	31,52	38,94	37,93	50,80	65,45	73,41	76,95	88,31
23.00	32,06	39,48	38,06	51,06	65,93	73,80	77,04	88,46
24.00	32,60	40,02	38,24	51,38	66,40	74,18	77,16	88,64

Таблица П.9

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замеров	Зимние сутки				Летние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	10,00	20,00	30,00	40,00	15,00	25,00	35,00	45,00
1.00	10,75	20,38	93,90	40,35	15,56	25,42	35,47	45,37
2.00	11,52	20,77	94,55	40,70	16,14	25,87	35,97	45,77
3.00	12,27	21,14	95,19	41,04	16,75	26,32	36,48	46,16
4.00	12,99	21,50	95,81	41,37	17,33	26,74	36,98	46,54
5.00	13,78	21,90	96,47	41,73	17,90	27,16	37,46	46,91
6.00	14,47	22,27	97,06	42,06	18,47	27,58	37,95	47,29
7.00	15,20	22,64	97,68	42,40	19,04	28,00	38,43	47,66
8.00	15,94	23,03	98,32	42,75	19,72	28,47	39,01	48,07
9.00	16,75	23,48	99,01	43,16	20,35	28,92	39,54	48,47
10.00	17,62	23,94	99,75	43,57	21,10	29,41	40,19	48,90
11.00	18,46	24,37	100,47	43,97	21,62	29,86	40,63	49,30
12.00	19,27	24,78	101,15	44,33	22,19	30,31	41,11	49,70
13.00	20,01	25,20	101,78	44,71	22,79	30,78	41,62	50,11
14.00	20,83	25,64	102,48	45,11	23,34	31,23	42,09	50,51
15.00	21,67	26,04	103,20	45,48	23,88	31,68	42,55	50,90
16.00	22,47	26,43	103,87	45,83	24,48	32,14	43,06	51,31
17.00	23,24	26,83	104,53	46,19	25,16	32,64	43,64	51,75
18.00	24,04	27,22	105,21	46,54	25,85	33,14	44,23	52,19
19.00	24,81	27,89	105,87	47,14	26,50	33,60	44,78	52,59
20.00	25,53	28,28	106,48	47,49	27,14	34,06	45,32	53,00
21.00	26,28	28,72	107,12	47,89	27,75	34,52	45,84	53,40
22.00	27,09	29,17	107,81	48,30	28,41	35,00	46,40	53,83
23.00	27,85	29,62	108,45	48,71	29,05	35,48	46,94	54,25
24.00	28,50	30,03	109,01	49,07	29,56	35,87	47,38	54,60

Таблица П.10

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замеров	Зимние сутки				Летние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	60,00	70,00	80,00	90,00	55,00	65,00	75,00	85,00
1.00	61,10	70,76	80,81	90,60	55,98	65,68	75,72	85,58
2.00	62,18	71,51	81,59	91,23	56,94	66,35	76,42	86,17
3.00	63,31	72,30	82,36	91,85	57,94	67,06	77,10	86,77
4.00	64,42	73,07	83,08	92,46	58,93	67,74	77,74	87,35
5.00	65,51	73,84	83,78	93,07	59,90	68,43	78,36	87,93
6.00	66,62	74,61	84,54	93,67	60,89	69,12	79,03	88,51
7.00	67,70	75,36	85,32	94,28	61,85	69,79	79,73	89,09
8.00	68,87	76,17	86,22	94,91	62,89	70,51	80,53	89,70
9.00	70,07	77,00	87,14	95,61	63,95	71,26	81,34	90,36
10.00	71,23	77,82	87,95	96,35	64,98	71,98	82,06	91,06
11.00	72,39	78,68	88,76	97,03	66,02	72,75	82,78	91,72
12.00	73,46	79,50	89,48	97,70	66,96	73,49	83,42	92,36
13.00	74,58	80,30	90,24	98,35	67,96	74,20	84,10	92,98
14.00	75,72	81,14	90,97	99,03	68,98	74,95	84,75	93,63
15.00	76,85	81,98	91,71	99,73	69,98	75,70	85,41	94,30
16.00	77,99	82,84	92,54	100,41	70,99	76,47	86,14	94,95
17.00	79,18	83,64	93,35	101,11	72,05	77,19	86,86	95,62
18.00	80,35	84,43	94,25	101,63	73,09	77,89	87,66	96,11
19.00	81,56	85,22	95,14	102,11	74,17	78,60	88,46	96,57
20.00	82,75	86,02	96,09	102,61	75,22	79,31	89,30	97,05
21.00	83,95	86,82	96,93	103,14	76,29	80,03	90,05	97,55
22.00	85,16	87,63	97,83	103,72	77,37	80,75	90,85	98,09
23.00	86,33	88,42	98,57	104,28	78,40	81,45	91,51	98,62
24.00	87,29	89,15	99,35	104,81	79,26	82,11	92,20	99,12

Таблица П.11

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замеров	Зимние сутки				Летние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	10,00	20,00	30,00	40,00	15,00	25,00	35,00	45,00
1.00	10,40	20,32	30,40	40,35	15,27	25,17	35,35	45,29
2.00	10,80	20,63	30,80	40,70	15,54	25,35	35,70	45,58
3.00	11,19	20,95	31,20	41,05	15,79	25,53	36,05	45,87
4.00	11,57	21,26	31,60	41,40	16,04	25,70	36,40	46,16
5.00	11,96	21,58	32,00	41,75	16,28	25,87	36,75	46,45
6.00	12,37	21,90	32,40	42,10	16,53	26,04	37,10	46,74
7.00	12,78	22,22	32,80	42,45	16,81	26,21	37,45	47,03
8.00	13,32	22,65	33,12	42,77	17,30	26,50	37,73	47,34
9.00	14,06	23,23	33,44	43,08	17,99	26,93	38,01	47,68
10.00	14,85	23,85	33,76	43,40	18,78	27,40	38,29	48,02
11.00	15,62	24,47	34,08	43,71	19,51	27,85	38,57	48,36
12.00	16,27	25,00	34,40	44,03	20,10	28,24	38,85	48,70
13.00	16,96	25,55	34,72	44,34	20,65	28,64	39,13	49,03
14.00	17,68	26,16	35,04	44,66	21,39	29,11	39,41	49,37
15.00	18,39	26,76	35,36	44,97	22,06	29,54	39,69	49,71
16.00	19,05	27,30	35,68	45,29	22,67	29,94	39,97	50,05
17.00	19,73	27,84	36,00	45,60	23,25	30,35	40,25	50,39
18.00	20,41	28,37	36,40	45,92	23,90	30,75	40,60	50,73
19.00	21,06	28,89	36,80	46,27	24,55	31,13	40,95	51,09
20.00	21,66	29,35	37,20	46,62	25,10	31,50	41,30	51,42
21.00	22,28	29,85	37,60	46,97	25,66	31,87	41,65	51,75
22.00	22,87	30,36	38,00	47,32	26,28	32,25	42,00	52,08
23.00	23,37	30,79	38,40	47,67	26,72	32,54	42,35	52,41
24.00	23,79	31,15	38,80	48,02	27,02	32,81	42,70	52,74

Таблица П.12

## Показания счетчиков активной и реактивной энергии

Часы замеров	Зимние сутки				Летние сутки			
	рабочие		выходные		рабочие		выходные	
	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч	W, кВт·ч	V, квар·ч
0.00	60,00	70,00	80,00	90,00	55,00	65,00	75,00	85,00
1.00	60,81	70,56	80,65	90,48	55,69	65,45	75,55	85,41
2.00	61,65	71,10	81,32	90,95	56,41	65,88	76,12	85,81
3.00	62,51	71,71	82,00	91,48	57,13	66,37	76,70	86,25
4.00	63,34	72,28	82,67	91,96	57,84	66,82	77,27	86,67
5.00	64,19	72,85	83,35	92,45	58,56	67,27	77,85	87,09
6.00	64,98	73,39	83,99	92,93	59,24	67,71	78,39	87,49
7.00	65,81	73,95	84,64	93,41	59,94	68,15	78,95	87,90
8.00	66,72	74,54	85,37	93,92	60,71	68,62	79,57	88,33
9.00	67,72	75,21	86,17	94,48	61,56	69,16	80,25	88,81
10.00	68,69	75,86	86,95	95,04	62,39	69,69	80,91	89,29
11.00	69,66	76,54	87,73	95,62	63,21	70,23	81,57	89,77
12.00	70,56	77,17	88,45	96,16	63,98	70,74	82,18	90,24
13.00	71,51	77,83	89,20	96,72	64,78	71,27	82,82	90,71
14.00	72,45	78,49	89,96	97,29	65,58	71,80	83,46	91,20
15.00	73,35	79,16	90,68	97,86	66,35	72,34	84,08	91,68
16.00	74,25	79,78	91,40	98,39	67,11	72,83	84,69	92,13
17.00	75,19	80,42	92,16	98,94	67,92	73,35	85,33	92,60
18.00	76,14	81,05	92,91	99,48	68,72	73,86	85,98	93,06
19.00	77,05	81,65	93,64	99,99	69,50	74,34	86,60	93,49
20.00	77,96	82,28	94,37	100,53	70,27	74,84	87,22	93,95
21.00	78,90	82,89	95,12	101,06	71,07	75,33	87,85	94,40
22.00	79,78	83,51	95,83	101,58	71,82	75,82	88,45	94,84
23.00	80,62	84,10	96,49	102,09	72,53	76,30	89,02	95,28
24.00	81,41	84,66	97,13	102,58	73,20	76,75	89,56	95,69

Таблица П.13

Коэффициенты трансформации измерительных трансформаторов тока и напряжения

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$K_{\text{ТТ}}$	20	30	40	50	60	75	20	30	40	50	75	10	20	30	40	50
$K_{\text{ТН}}$	60					100					350					

Таблица П.14

Число характерных суток в году

Номер варианта	Зима		Лето	
	Рабочих	Выходных	Рабочих	Выходных
1	161	65	100	39
2	145	83	110	27
3	150	77	107	31
4	175	49	100	41
5	155	70	120	20
6	153	73	97	42
7	140	55	125	45
8	145	55	115	50
9	135	65	100	65
10	160	67	100	38
11	166	60	110	29
12	165	59	101	40
13	130	65	140	30
14	158	70	100	37
15	156	70	110	30
16	176	50	100	39

# **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ОДНОФАЗНОЙ НАГРУЗКИ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЁ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩИХ МЕЖДУ ФАЗАМИ**

### **Цель работы**

- проверка правомерности допущений, принимаемых в справочной литературе [2] при определении величины расчётных нагрузок в узлах совместного питания однофазных и трёхфазных электроприёмников;
- проверка правильности теоретических выводов по определению распределения потребляемой из сети мощности электроприёмником, подключённым на линейное напряжение, между соответствующими фазами сети и зависимости распределения от коэффициента мощности электроприёмника.

### **Общие положения и методические указания по выполнению работы**

Наличие однофазных электроприёмников (ЭП), как правило, приводит к несимметричной загрузке фаз сети, что вызывает ряд отрицательных последствий, таких как:

- появление токов и напряжений обратной и нулевой последовательности в четырёх и пятипроводных сетях и токов и напряжений обратной последовательности – в трёхпроводных сетях;
- увеличение потерь энергии в сетях по сравнению с их значением при симметричной нагрузке фаз;
- появление электромагнитных моментов у электродвигателей, действующих согласно с нагрузкой и приводящих к увеличению потребления ими электроэнергии и ускоренному износу изоляции.

Пренебрежение фазностью электроприёмников при определении расчётных нагрузок приводит к ускоренному износу изоляции одной из фаз сети.

С целью снижения указанных отрицательных последствий уже на стадии проектирования СЭС необходимо:

- нагрузку, обусловленную однофазными электроприёмниками, как можно равномерно распределить между фазами сети;
- определить нагрузку наиболее загруженной фазы и заменить однофазную нагрузку эквивалентной ей трёхфазной, равной утроенной величине нагрузки наиболее загруженной фазы.

По данным [2] допускается однофазные электроприёмники условно принимать как трёхфазные, если неравномерность распределения номинальной мощности однофазных электроприёмников по фазам, отнесённая к мощности наименее загруженной фазы, включая приходящуюся на одну фазу мощность трёхфазных электроприёмников, составляет 15 и менее %, т. е.

$$\begin{aligned}
\delta P_{\text{НОМ}} &= \frac{P_{\text{НОМ. ф. макс}} - P_{\text{НОМ. ф. мин}}}{P_{\text{НОМ. ф. мин}}} 100\% = \\
&= \frac{\left( P^*_{\text{НОМ. ф. макс}} + \frac{1}{3} P_{\text{НОМ. III}} \right) - \left( P^*_{\text{НОМ. ф. мин}} + \frac{1}{3} P_{\text{НОМ. III}} \right)}{\left( P^*_{\text{НОМ. ф. мин}} + \frac{1}{3} P_{\text{НОМ. III}} \right)} 100\% = \\
&= \frac{P^*_{\text{НОМ. ф. макс}} - P^*_{\text{НОМ. ф. мин}}}{\left( P^*_{\text{НОМ. ф. мин}} + \frac{1}{3} P_{\text{НОМ. III}} \right)} 100\% \leq 15\%, \tag{3.1}
\end{aligned}$$

где  $P^*_{\text{НОМ. ф. макс}}$  и  $P^*_{\text{НОМ. ф. мин}}$  – суммарные значения номинальных мощностей электроприёмников, подключённых к наиболее и наименее загруженным фазам, обусловленных только однофазными электроприёмниками;  $P_{\text{НОМ. III}}$  – суммарная номинальная мощность всех трёхфазных электроприёмников, подключённых к рассматриваемому узлу СЭС.

Согласно [1], средние активные и реактивные мощности фаз, обусловленные однофазными электроприёмниками, могут быть рассчитаны по следующим формулам:

– активные мощности фаз:

$$\begin{aligned}
P_{\text{ср. А}} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{АВ}}} k_{\text{и. а } i} P_{\text{НОМ. АВ } i} k_{(\text{АВ})\text{А } i} + \sum_{i=1}^{n_{\text{СА}}} k_{\text{и. а } i} P_{\text{НОМ. СА } i} k_{(\text{СА})\text{А } i} + \\
&\quad + \sum_{i=1}^{n_{\text{А0}}} k_{\text{и. а } i} P_{\text{НОМ. А0 } i};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{ср. В}} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{АВ}}} k_{\text{и. а } i} P_{\text{НОМ. АВ } i} k_{(\text{АВ})\text{В } i} + \sum_{i=1}^{n_{\text{ВС}}} k_{\text{и. а } i} P_{\text{НОМ. ВС } i} k_{(\text{ВС})\text{В } i} + \\
&\quad + \sum_{i=1}^{n_{\text{В0}}} k_{\text{и. а } i} P_{\text{НОМ. В0 } i};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_{\text{ср. С}} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{ВС}}} k_{\text{и. а } i} P_{\text{НОМ. ВС } i} k_{(\text{ВС})\text{С } i} + \sum_{i=1}^{n_{\text{СА}}} k_{\text{и. а } i} P_{\text{НОМ. СА } i} k_{(\text{СА})\text{С } i} + \\
&\quad + \sum_{i=1}^{n_{\text{С0}}} k_{\text{и. а } i} P_{\text{НОМ. С0 } i};
\end{aligned}$$

– реактивные мощности фаз:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{ср. А}} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{АВ}}} k_{\text{и. а}i} P_{\text{ном. АВ}i} q_{(\text{АВ})\text{А}i} + \sum_{i=1}^{n_{\text{СА}}} k_{\text{и. а}i} P_{\text{ном. СА}i} q_{(\text{СА})\text{А}i} + \\
 &\quad + \sum_{i=1}^{n_{\text{А0}}} k_{\text{и. а}i} P_{\text{ном. А0}i} \text{tg}\varphi_{\text{А0}i}; \\
 Q_{\text{ср. В}} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{АВ}}} k_{\text{и. а}i} P_{\text{ном. АВ}i} q_{(\text{АВ})\text{В}i} + \sum_{i=1}^{n_{\text{ВС}}} k_{\text{и. а}i} P_{\text{ном. ВС}i} q_{(\text{ВС})\text{В}i} + \\
 &\quad + \sum_{i=1}^{n_{\text{В0}}} k_{\text{и. а}i} P_{\text{ном. В0}i} \text{tg}\varphi_{\text{В0}i}; \\
 Q_{\text{ср. С}} &= \sum_{i=1}^{n_{\text{ВС}}} k_{\text{и. а}i} P_{\text{ном. ВС}i} q_{(\text{ВС})\text{С}i} + \sum_{i=1}^{n_{\text{СА}}} k_{\text{и. а}i} P_{\text{ном. СА}i} q_{(\text{СА})\text{С}i} + \\
 &\quad + \sum_{i=1}^{n_{\text{С0}}} k_{\text{и. а}i} P_{\text{ном. С0}i} \text{tg}\varphi_{\text{С0}i}.
 \end{aligned}$$

Здесь  $n_{\text{АВ}}, n_{\text{ВС}}, n_{\text{СА}}$  – число электроприёмников, подключённых соответственно на линейные напряжения  $U_{\text{АВ}}, U_{\text{ВС}}$  и  $U_{\text{СА}}$ ;  $n_{\text{А0}}, n_{\text{В0}}, n_{\text{С0}}$  – число электроприёмников, подключённых соответственно на фазные напряжения  $U_{\text{А0}}, U_{\text{В0}}$  и  $U_{\text{С0}}$ ;  $k_{\text{и. а}i}$  – коэффициент использования установленной активной мощности  $i$ -го электроприёмника;  $P_{\text{ном. АВ}i}, P_{\text{ном. ВС}i}, P_{\text{ном. СА}i}$  – номинальные активные мощности отдельных электроприёмников, подключённых соответственно на линейные напряжения  $U_{\text{АВ}}, U_{\text{ВС}}$  и  $U_{\text{СА}}$ ;  $P_{\text{ном. А0}i}, P_{\text{ном. В0}i}, P_{\text{ном. С0}i}$  – номинальные активные мощности отдельных электроприёмников, подключённых соответственно на фазные напряжения  $U_{\text{А0}}, U_{\text{В0}}$  и  $U_{\text{С0}}$ ;  $k_{(\text{АВ})\text{А}i}, k_{(\text{АВ})\text{В}i}, k_{(\text{ВС})\text{В}i}, k_{(\text{ВС})\text{С}i}, k_{(\text{СА})\text{С}i}, k_{(\text{СА})\text{А}i}$  – расчётные коэффициенты, представляющие собой доли потребляемых отдельно взятыми электроприёмниками, подключёнными на линейные напряжения  $U_{\text{АВ}}, U_{\text{ВС}}$  и  $U_{\text{СА}}$ , значений активных мощностей соответственно по фазам А, В и С, на что в подстрочных индексах указывают буквенные обозначения, стоящие после скобок;  $q_{(\text{АВ})\text{А}i}, q_{(\text{АВ})\text{В}i}, q_{(\text{ВС})\text{В}i}, q_{(\text{ВС})\text{С}i}, q_{(\text{СА})\text{С}i}, q_{(\text{СА})\text{А}i}$  – расчётные коэффициенты, представляющие собой доли потребляемых отдельно взятыми электроприёмниками, подключёнными на линейные напряжения  $U_{\text{АВ}}, U_{\text{ВС}}$  и  $U_{\text{СА}}$ , значений реактивных мощностей соответственно по фазам А, В и С, на что в подстрочных индексах указывают буквенные обозначения, стоящие после скобок.

Указанные выше расчётные коэффициенты в учебной и справочной литературе принято называть коэффициентами приведения однофазных нагрузок, включённых на междуфазные напряжения, к соответствующим фазам. Они зависят от коэффициентов реактивной мощности электроприёмников. Их численные значения в зависимости от  $\cos\varphi$  приводятся в учебной и справочной литературе [1–3], а также могут быть рассчитаны по ниже следующим формулам [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{(AB)Ai} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{tg}\varphi_{ABi} ; \\ k_{(BC)Bi} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{tg}\varphi_{BCi} ; \\ k_{(CA)Ci} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{tg}\varphi_{CAi} . \end{array} \right. \quad (3.2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{(AB)Bi} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{tg}\varphi_{ABi} ; \\ k_{(BC)Ci} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{tg}\varphi_{BCi} ; \\ k_{(CA)Ai} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}} \operatorname{tg}\varphi_{CAi} . \end{array} \right. \quad (3.3)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{(AB)Ai} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_{ABi}}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}} ; \\ q_{(BC)Bi} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_{BCi}}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}} ; \\ q_{(CA)Ci} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_{CAi}}{2} - \frac{1}{2\sqrt{3}} . \end{array} \right. \quad (3.4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} q_{(AB)Bi} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_{ABi}}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}} ; \\ q_{(BC)Ci} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_{BCi}}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}} ; \\ q_{(CA)Ai} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_{CAi}}{2} + \frac{1}{2\sqrt{3}} . \end{array} \right. \quad (3.5)$$

Следует отметить то, что при небольших значениях коэффициентов использования  $k_{и.а}$  и числа электроприёмников, питающихся от одного узла СЭС, наиболее загруженную фазу целесообразно определять по величине

средней активной мощности, а в остальных случаях ориентируясь на полную среднюю мощность фазы  $S_{\text{ср. ф}}$ , которая определяется по формуле

$$S_{\text{ср. ф}} = \sqrt{P_{\text{ср. ф}}^2 + Q_{\text{ср. ф}}^2}.$$

### Краткое описание компьютерной модели системы электроснабжения

Работа выполняется с применением ПЭВМ и программного пакета Matlab-Simulink с библиотекой SimPowerSystems. Численные эксперименты проводятся на компьютерной модели простейшей системы электроснабжения (см. рис. 3.1).

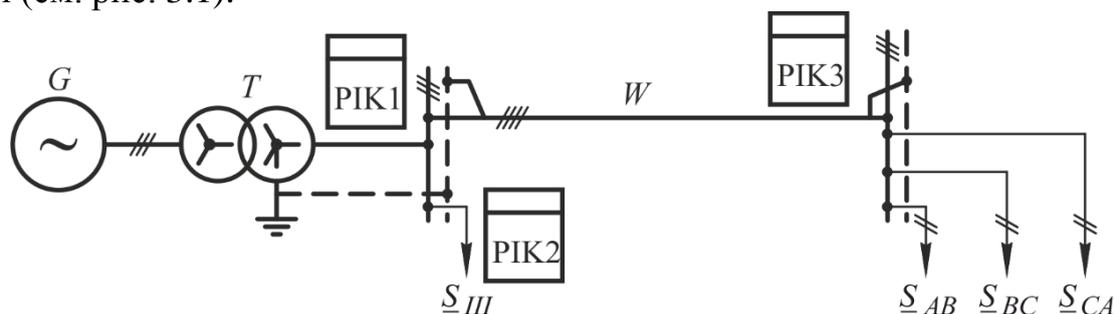


Рис. 3.1. Принципиальная электрическая схема системы электроснабжения:  $G$  – источник бесконечной мощности напряжением 10 кВ;  $T$  – силовой трансформатор напряжением 10/0,4 кВ;  $W$  – линия электропередачи; PIK1–PIK3 – измерительные блоки

Общий вид компьютерной модели представлен на рис. 3.2.

Модель состоит из последовательно соединённых блоков трёхфазного источника питания «*THREE-PHASE SOURCE*» и силового трансформатора «*TRANSFORMER*» со схемой соединения обмоток  $Y/Y_0$  или  $\Delta/Y_0$  (в варианте, приведенном на рис. 3.1 – со схемой соединения обмоток  $Y/Y_0$ ), к низковольтным выводам которого через измерительный блок PIK1 подключены:

1. Трёхфазная симметричная активно-индуктивная нагрузка (блок «*THREE-PHASE LOAD*»).
2. Линия электропередачи (ЛЭП) напряжением 380 В (блок «*TRANSMISSION LINE*»).
3. Группа однофазных электроприёмников «*Sab*», «*Sbc*» и «*Sca*», подключенных в конце ЛЭП 380 В на линейные напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$  соответственно.

Для контроля корректности введённых параметров блока трёхфазной симметричной активно-индуктивной нагрузки «*THREE-PHASE LOAD*» подключен измерительный блок PIK2, который показывает значение активной, реактивной и полной мощности.

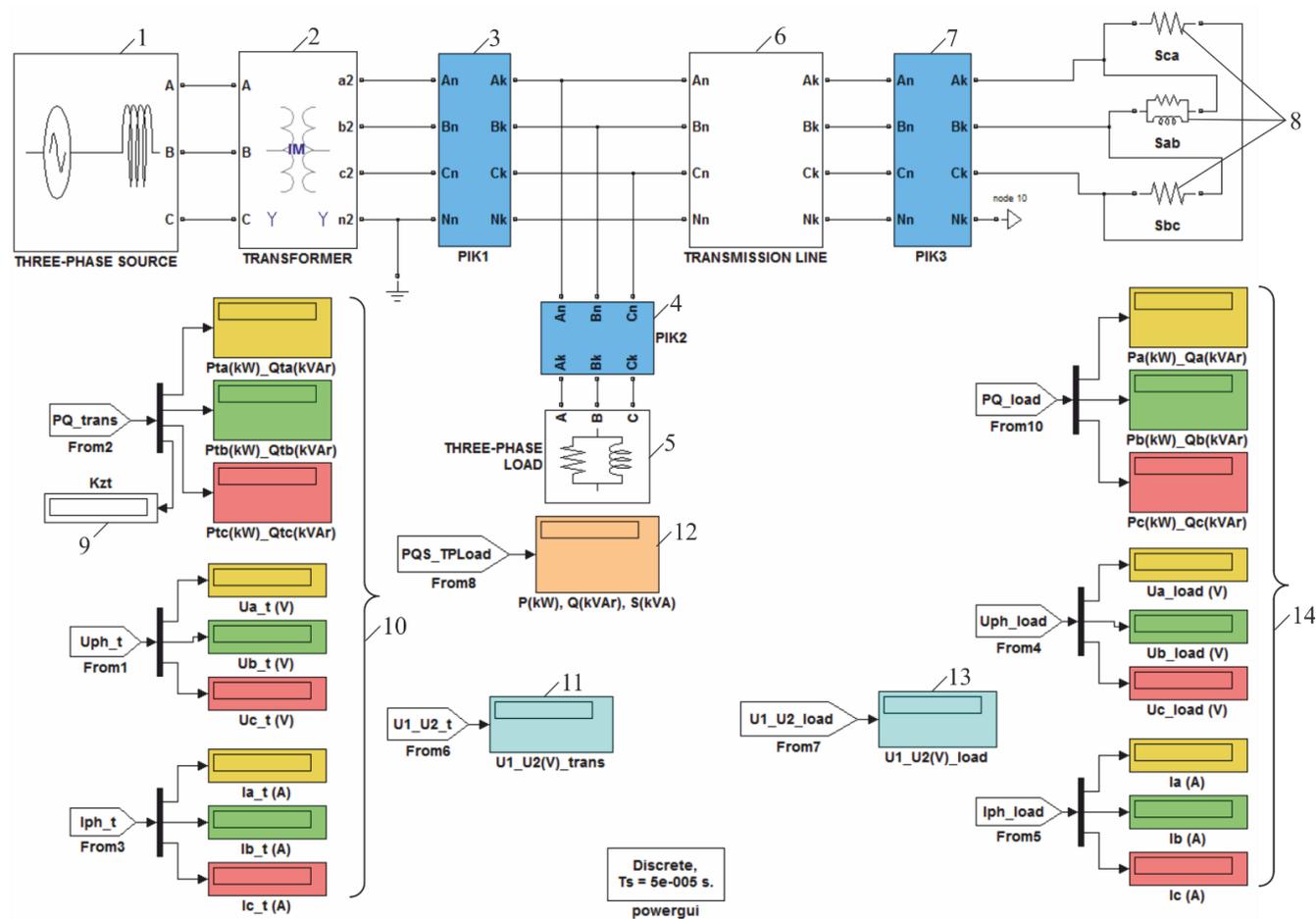


Рис. 3.2. Компьютерная модель СЭС: 1 – трехфазный источник напряжения 10 кВ; 2 – силовой трансформатор напряжением 10/0,4 кВ; 3, 4, 7 – измерительные блоки соответственно на вводах низкого напряжения трансформатора, трехфазной нагрузке и в конце ЛЭП; 5 – блок трехфазной нагрузки; 6 – блок ЛЭП; 8 – блоки однофазной нагрузки; 9 – дисплей, отображающий значение коэффициента загрузки трансформатора; 10, 14 – дисплеи отображающие значения режимных параметров на вводе трансформатора и в конце ЛЭП соответственно; 11, 13 – дисплеи, отображающие значение напряжения прямой и обратной последовательности на вводах низкого напряжения трансформатора и в конце ЛЭП соответственно; 12 – дисплей, отображающий параметры трёхфазной нагрузки

Блок «*THREE-PHASE LOAD*» представляется в виде параллельно соединённых пассивных элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$  и имеет следующие параметры (см. рис. 3.3):

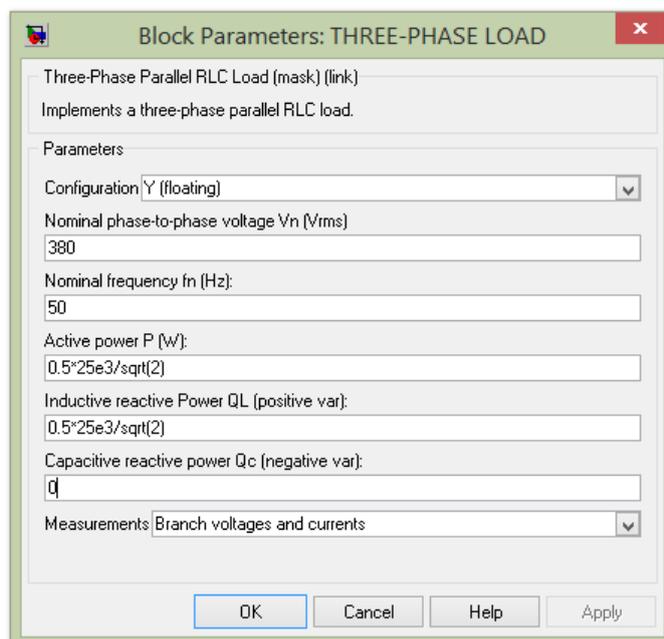


Рис. 3.3. Параметры блока «*THREE-PHASE LOAD*»

1. *Configuration* – схема соединения ветвей трехфазной нагрузки. По умолчанию задана схема соединения звезда.
2. *Nominal phase-to-phase voltage Vn* – действующее значение номинального линейного напряжения, равное 380 В.
3. *Nominal frequency fn* – номинальная частота, равная 50 Гц.
4. *Active power P* – активная нагрузка, Вт.
5. *Inductive reactive power QL* – индуктивная нагрузка, вар.
6. *Capacitive reactive power Qc* – ёмкостная нагрузка, вар, равная нулю.

Блоки однофазной нагрузки «*Sab*», «*Sbc*» и «*Sca*» представляются в виде параллельно соединённых пассивных элементов  $R$ ,  $L$  и  $C$  и имеют следующие параметры (см. рис. 3.4):

1. *Nominal voltage Vn* – действующее значение номинального напряжения, равное 380 В.
3. *Nominal frequency fn* – номинальная частота, равная 50 Гц.
4. *Active power P* – активная нагрузка, Вт.
5. *Inductive reactive power QL* – индуктивная нагрузка, вар.
6. *Capacitive reactive power Qc* – ёмкостная нагрузка, вар, равная нулю.
7. *Capacitor initial voltage (V)* – начальное значение напряжения на ёмкостной нагрузке, равно нулю.

8. *Inductor initial voltage (A)* – начальное значение тока индуктивной нагрузке, A, равно нулю.

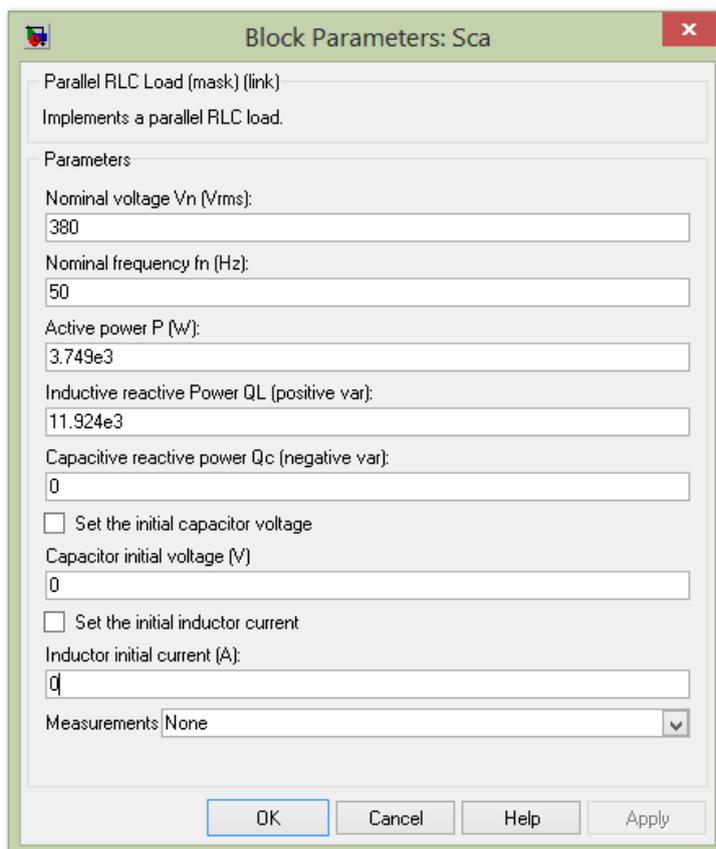


Рис. 3.4. Параметры блока однофазной нагрузки «Sca»

Сопротивления нагрузочных элементов можно менять независимо друг от друга, и тем самым создавать несимметрию нагрузок фаз.

Измерительный блок РИК1 позволяет измерить:

- активные и реактивные мощности в фазах трансформатора и среднее значение коэффициента загрузки фаз трансформатора – дисплеи, подключенные к выводам блока «From2»;

- действующие значения фазных напряжений на стороне низшего напряжения трансформатора – дисплеи, подключенные к выводам блока «From1»;

- действующие значения напряжения прямой U1 и обратной U2 последовательностей фазных напряжений на низковольтных выводах трансформатора – дисплеи, подключенные к выводам блока «From6»;

- действующие значения токов в фазах на стороне низшего напряжения трансформатора – дисплеи, подключенные к выводам блока «From3».

Измерительный блок РИК2 позволяет измерить:

- действующие значения фазных напряжений в конце ЛЭП – дисплеи, подключенные к выводам блока «From4»;

– действующие значения напряжения прямой U1 и обратной U2 последовательностей фазных напряжений в конце ЛЭП– дисплеи, подключенные к выводам блока «From7»;

– действующие значения токов в фазах ЛЭП – дисплеи, подключенные к выводам блока «From5»;

– активные и реактивные мощности в фазах ЛЭП – дисплеи, подключенные к выводам блока «From10».

**Внимание!** В компьютерной модели электрической сети напряжением 380 В будут меняться только активная и индуктивная мощности трёхфазной и однофазной нагрузок в соответствии с методическими указаниями. Остальные параметры при проведении работы остаются неизменными.

### Методические указания по проведению работы

Академическая группа делится на бригады, состоящие из двух человек.

Каждая бригада выбирает вариант компьютерной модели с заданными параметрами сети (LW3\_поXX) в соответствии с номером, указанным преподавателем, и путём нажатия на него левой клавишей мыши открывает модель сети. Далее работа проводится, следуя рекомендациям:

1. Курсор наведите на блок трёхфазной нагрузки «THREE-PHASE LOAD» и путём нажатия левой клавиши мыши откройте окно меню «Block Parameters: Three-Phase Parallel RLC Load» указанного блока. Задайтесь значениями активной и реактивной мощности таким образом, чтобы соблюдались следующие условия

$$S_{III} = \sqrt{P_{III}^2 + Q_{III}^2} = 0,5S_{т. ном} \text{ и } \operatorname{tg}\varphi_{III} = \frac{Q_{III}}{P_{III}} = 1,0.$$

При этих условиях активная и реактивная составляющие трёхфазной нагрузки определяется выражением

$$P_{III} = Q_{III} = \frac{0,5S_{т. ном}}{\sqrt{2}}$$

После установки указанных значений активной и реактивной мощности следует закрыть текущее окно, т. е. перейти к компьютерной модели сети.

2. Путём поочередного открывания окон меню однофазных активно-индуктивных нагрузочных элементов «Sab», «Sbc», «Sca», задайтесь мощностями однофазных электроприёмников, подключённых на линейные напряжения так, чтобы удовлетворялись условия:

$$P_{AB} = P_{BC} = P_{CA} = \frac{0,5S_{т. ном}}{3} \text{ и } Q_{AB} = Q_{BC} = Q_{CA} = 0, \quad (3.6)$$

в результате чего получите сеть с симметричной нагрузкой. При этом коэффициент загрузки трансформатора будет практически равен  $K_{3, т} = 1,0$ .

3. Путём нажатия левой клавишей курсора на затемнённый треугольник на панели инструментов (верхняя строчка окна с компьютерной моделью) запустите программу на проведение расчётов (см. рис. 3.5). В процессе расчётов затемнённый треугольник исчезает, а по окончании расчётов возвращается в исходное положение. Полученные результаты с экранов дисплеев перепишите в соответствующие ячейки первой строчки табл. 3.1.

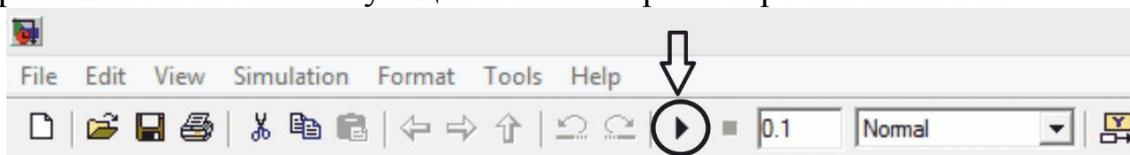


Рис. 3.5. Кнопка запуска расчёта компьютерной модели

4. С целью выявления влияния несимметрии нагрузок фаз ЛЭП и трансформатора повторите опыт по пунктам 2 и 3 при условиях:

$$P_{AB} = 0,5S_{T.НОМ}, \text{ кВт}; P_{BC} = P_{CA} = 0,001, \text{ кВт}$$

$$\text{и } Q_{AB} = Q_{BC} = Q_{CA} = 0. \quad (3.7)$$

Полученные результаты внесите во вторую строчку табл. 3.1.

Определите по ниже приведенным формулам отношения нагрузочных потерь активной мощности в трансформаторе, а также в ЛЭП, при работе их в режиме с несимметричной загрузкой фаз, соответствующей условиям (3.7), к потерям активной мощности в указанных элементах при работе их с симметричной нагрузкой фаз, т. е. соответствующей условиям (3.6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta P_{T.НЕСИМ}}{\Delta P_{T.СИМ}} = \frac{(I_{A.T}^2 + I_{B.T}^2 + I_{C.T}^2)R_T}{3I_{\phi.T}^2 R_T} = \frac{I_{A.T}^2 + I_{B.T}^2 + I_{C.T}^2}{3I_{\phi.T}^2}; \\ \frac{\Delta P_{Л.НЕСИМ}}{\Delta P_{Л.СИМ}} = \frac{(I_{A.Л}^2 + I_{B.Л}^2 + I_{C.Л}^2)R_{Л}}{3I_{\phi.Л}^2 R_{Л}} = \frac{I_{A.Л}^2 + I_{B.Л}^2 + I_{C.Л}^2}{3I_{\phi.Л}^2}. \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Здесь токи, указанные в числителях, принимаются из 2-й строки табл. 3.1, а в знаменателе – из 1-й строки.

По полученным данным сделайте выводы.

5. Путём поочередного открывания окон меню однофазных активно-индуктивных нагрузочных элементов «Sab», «Sbc» и «Sca», задайтесь мощностями однофазных электроприёмников, подключённых на линейные напряжения так, чтобы удовлетворялись условия:

– суммарная мощность однофазных электроприёмников

$$S_{\phi.\Sigma} = \sqrt{P_{\phi.\Sigma}^2 + Q_{\phi.\Sigma}^2} = 0,5S_{T.НОМ}; \quad (3.9)$$

– коэффициент мощности всех приёмников  $\cos\varphi_{\phi} = 0,3$  или  $\text{tg}\varphi_{\phi} = 3,18$ .

Таблица 3.1

Исходные данные и результаты, полученные на компьютерной модели сети

№ п/п	Параметры нагрузочных блоков										
	THREE-PHASE LOAD		Sab			Sbc			Sca		
	$P_{III}$ , кВт	$Q_{III}$ , квар	$P_{AB}$ , кВт	$Q_{AB}$ , квар	$\cos\varphi_{AB}$	$P_{BC}$ , кВт	$Q_{BC}$ , квар	$\cos\varphi_{BC}$	$P_{CA}$ , кВт	$Q_{CA}$ , квар	$\cos\varphi_{CA}$
1											
2											
...											
n											

Продолжение таблицы 3.1

№ п/п	Показания измерительного блока РИК1													
	Токи в фазах трансформатора, А			Активные (кВт) и реактивные (квар) мощности в фазах трансформатора						Линейные напряжения на выводах трансформатора и их симметричные составляющие, В				
	$I_{A.T}$	$I_{B.T}$	$I_{C.T}$	$P_{A.T}$	$P_{B.T}$	$P_{C.T}$	$Q_{A.T}$	$Q_{B.T}$	$Q_{C.T}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_{A1}$	$U_{A2}$
1														
2														
...														
n														

Окончание таблицы 3.1

№ п/п	Показания измерительного блока РИК3													
	Токи в фазах ЛЭП, А			Активные (кВт) и реактивные (квар) мощности в фазах ЛЭП						Линейные напряжения в конце ЛЭП и их симметричные составляющие, В				
	$I_{A.л}$	$I_{B.л}$	$I_{C.л}$	$P_{A.л}$	$P_{B.л}$	$P_{C.л}$	$Q_{A.л}$	$Q_{B.л}$	$Q_{C.л}$	$U_{AN}$	$U_{BN}$	$U_{CN}$	$U_{A1}$	$U_{A2}$
1														
2														
...														
n														

Тогда вышеприведенное условие (3.9) можно записать в виде

$$P_{\phi.\Sigma} \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_{\phi}} = 0,5 S_{T.\text{НОМ}},$$

откуда активная составляющая мощности однофазных электроприёмников

$$P_{\phi.\Sigma} = \frac{0,5 S_{T.\text{НОМ}}}{\sqrt{1 + (\operatorname{tg} \varphi_{\phi})^2}}. \quad (3.10)$$

С целью обеспечения чистоты эксперимента, направленного на определение коэффициентов приведения однофазных нагрузок, включённых на междуфазные напряжения, к соответствующим фазам, условимся о том, что:

– от расчётного узла питаются три однофазных электроприёмника, подключённых на разные линейные напряжения;

– активная мощность электроприёмника, подключённого на линейное напряжение  $U_{AB}$ ,  $P_{AB} = P_{\phi.\Sigma}$ , а мощности двух других, подключённых на линейные напряжения  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$ , ничтожно малы и составляют всего 0,001 кВт.

Реактивную составляющую мощности однофазных электроприёмников определим по выражению

$$Q_{\phi.\Sigma} = P_{\phi.\Sigma} \operatorname{tg} \varphi_{\phi}. \quad (3.11)$$

При вышепринятом условии, реактивная составляющая мощности электроприёмника, подключённого на линейное напряжение  $U_{AB}$ ,  $Q_{AB} = Q_{\phi.\Sigma}$ .

После задания новых значений мощностей однофазных электроприёмников запустите программу в режим вычислений. По завершению расчётов полученные результаты с экранов дисплеев перенесите в табл. 3.1.

6. Расчёты по пункту 5 повторите при значениях  $\cos \varphi_{\phi} = 0,4; 0,6; 0,8$  и  $0,9$ . При этом активная и реактивная мощности однофазного электроприёмника определяются по формулам (3.10) и (3.11). Полученные результаты занесите в табл. 3.1.

7. Используя полученные на компьютерной модели данные, сведённые в табл. 3.1, определите коэффициенты приведения однофазной нагрузки, включённой на междуфазное напряжение  $U_{AB}$ , к фазам А и В по формулам

$$k_{(AB)A} = \frac{P_{A.l}}{P_{AB}} = \frac{P_{A.l}}{P_{A.l} + P_{B.l}}; \quad k_{(AB)B} = \frac{P_{B.l}}{P_{AB}} = \frac{P_{B.l}}{P_{A.l} + P_{B.l}}; \quad (3.12)$$

$$q_{(AB)A} = \frac{Q_{A.l}}{P_{AB}} = \frac{Q_{A.l}}{P_{A.l} + P_{B.l}}; \quad q_{(AB)B} = \frac{Q_{B.l}}{P_{AB}} = \frac{Q_{B.l}}{P_{A.l} + P_{B.l}}. \quad (3.13)$$

Полученные результаты занесите в таблицу 3.2.

Определите эти же коэффициенты по формулам (3.2)–(3.5), и полученные результаты также внесите в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Зависимости коэффициентов приведения активной и реактивной составляющих однофазной нагрузки, питающейся на линейном напряжении, от коэффициента мощности  $\cos \varphi_\phi$

Коэффициенты приведения, найденные		Коэффициент мощности однофазной нагрузки $\cos \varphi_\phi$					
		0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
по данным табл. 3.1, формулы (3.13) и (3.14)	$k_{(AB)A}$						
	$k_{(AB)B}$						
	$q_{(AB)A}$						
	$q_{(AB)B}$						
по формулам (3.2)–(3.5)	$k_{(AB)A}$						
	$k_{(AB)B}$						
	$q_{(AB)A}$						
	$q_{(AB)B}$						

Используя данные табл. 3.1 во всех рассмотренных нагрузочных режимах работы сети определите коэффициенты несимметрии по напряжению обратной последовательностей на вводах низкого напряжения трансформатора и в конце ЛЭП 380 В:

$$K_{U2} = \frac{U_{A2}}{U_{A1}} 100 \% . \quad (3.14)$$

а также степень несимметрии нагрузок фаз трансформатора

$$\delta I_T = \frac{I_{\text{ф.т.макс}} - I_{\text{ф.т.мин}}}{I_{\text{ф.т.мин}}} 100 \% ; \quad (3.15)$$

Используя формулы (3.8) рассчитайте отношения нагрузочных потерь активной мощности в трансформаторе, а также в ЛЭП, при работе их в режиме с несимметричной загрузкой фаз, соответствующей условиям (3.7), к потерям активной мощности в указанных элементах при работе их с симметричной нагрузкой фаз, т. е. соответствующей условиям (3.6).

Полученные результаты расчётов по формулам (3.8), (3.14), (3.15) сведите в табл. 3.3.

8. С целью определения допустимой степени несимметрии нагрузок фаз с точки зрения обеспечения допустимого значения коэффициента несим-

метрии по напряжению обратной последовательности  $K_{U2, \text{доп}}$  примите значение коэффициента мощности однофазного электроприёмника  $\cos\varphi_\phi$ , подключённого между фазами А и В, при котором  $K_{U2} = \max$ . Для идентификации такого значения  $\cos\varphi_\phi$  примите его равным  $\cos\varphi_{\phi 1}$  и далее работу проведите в следующей последовательности:

Таблица 3.3

Коэффициент мощности однофазного электроприёмника		0,3	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0
Коэффициент несимметрии по напряжению обратной последовательности, $K_{U2}, \%$	Т						
	ЛЭП						
Степень несимметрии нагрузок фаз трансформатора, $\delta I_T, \%$							
$\frac{\Delta P_{\text{т.несим}}}{\Delta P_{\text{т.сим}}} 100 \%$							
$\frac{\Delta P_{\text{л.несим}}}{\Delta P_{\text{л.сим}}} 100 \%$							

8.1. Увеличивая в нагрузке трансформатора долю мощности, обусловленной трёхфазными электроприёмниками,  $\beta_{III} = S_{III} / S_{\text{т. ном}}$  от 0,5 до 0,9 с шагом  $\Delta\beta_{III} = 0,1$  и сохраняя при этом неизменными коэффициент мощности трёхфазной нагрузки  $\cos\varphi_{III}$ , коэффициент загрузки трансформатора  $K_{з. т}$  и коэффициент мощности однофазной нагрузки  $\cos\varphi_\phi = \cos\varphi_{\phi 1}$  по нижеприведенной формуле (3.16) для каждого значения  $\beta_{III}$  *рассчитайте величину активной мощности эквивалентного однофазного электроприёмника  $P_{\phi i}$ .*

Коэффициент мощности трёхфазной нагрузки  $\cos\varphi_{III}$  в соответствии с п.1 равен 0,707.

Отметим, что формула (3.16) получена путём решения уравнения

$$K_{з. т} S_{\text{т. ном}} = \sqrt{(P_{III} + P_\phi)^2 + (Q_{III} + Q_\phi)^2} = \\ = \sqrt{(\beta_{III} S_{\text{т. ном}} \cos\varphi_{III} + P_\phi)^2 + (\beta_{III} S_{\text{т. ном}} \sin\varphi_{III} + P_\phi \operatorname{tg}\varphi_{\phi 1})^2},$$

Откуда

$$P_{\phi} = -\frac{\beta_{III} S_{T. \text{НОМ}} (\cos\varphi_{III} + \sin\varphi_{III} \operatorname{tg}\varphi_{\phi 1})}{1 + \operatorname{tg}\varphi_{\phi 1}^2} + \sqrt{\left[ \frac{\beta_{III} S_{T. \text{НОМ}} (\cos\varphi_{III} + \sin\varphi_{III} \operatorname{tg}\varphi_{\phi 1})}{1 + \operatorname{tg}\varphi_{\phi 1}^2} \right]^2 + \frac{(K_{3. T} S_{T. \text{НОМ}})^2 - (\beta_{III} S_{T. \text{НОМ}})^2}{1 + \operatorname{tg}\varphi_{\phi 1}^2}}. \quad (3.16)$$

Полученные результаты занесите в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

Активные составляющие мощности  $P_{\phi}$  эквивалентного однофазного электроприёмника при различных значениях  $\beta_{III} = S_{III} / S_{T. \text{НОМ}}$

$S_{T. \text{НОМ}},$ кВ·А	$K_{3. T}$	$\cos\varphi_{III}$	$\cos\varphi_{\phi 1}$	Коэффициент загрузки трансформатора, обусловленный трёхфазной нагрузкой, $\beta_{III}$				
				0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

8.2. Воспользовавшись данными, приведенными в табл. 3.4, определите значения активной и реактивной составляющих трёхфазной нагрузки и реактивной составляющей однофазной при каждом заданном в табл. 3.4 значении коэффициента  $\beta_{III}$ , используя приведенные ниже выражения:

$$P_{III i} = \beta_{III i} S_{T. \text{НОМ}} \cos\varphi_{III};$$

$$Q_{III i} = \beta_{III i} S_{T. \text{НОМ}} \sin\varphi_{III};$$

$$Q_{\phi i} = P_{\phi i} \operatorname{tg}\varphi_{\phi 1}.$$

Полученные результаты занесите в таблицу 3.5.

8.3. Приняв коэффициент  $\beta_{III} = 0,5$ , задайтесь в нагрузочных блоках компьютерной модели сети соответствующими значениями активных и реактивных составляющих однофазной и трёхфазной нагрузок. Численные величины указанных мощностей приведены в табл. 3.5. Запустите программу на выполнение расчётов. Полученные результаты занесите в табл. 3.1.

Опыты проведите при всех значениях коэффициента  $\beta_{III}$ , указанных в табл. 3.5.

8.4. Используя полученные в п. 8.3 данные (см. табл. 3.1) рассчитайте по формулам (3.14)–(3.15) степень несимметрии нагрузок фаз трансформатора по токовой нагрузке  $\delta I_T$ , и по активной мощности  $\delta P_T$ , а также коэффициент несимметрии по напряжению обратной последовательности  $K_{U2}$ .

Таблица 3.5

Параметры однофазной и трёхфазной нагрузок при коэффициенте загрузки трансформатора  $K_{з.т} = 1$  и степени несимметрии нагрузок фаз ЛЭП и трансформатора

$\beta_{III}$	Параметры трёхфазной нагрузки				Параметры однофазной нагрузки, подключённой на линейное напряжение				Несимметрия загрузки фаз по		Коэффициенты несимметрии по напряжению обратной последовательности $K_{U2}$ , %	
									току	активной мощности		
	$\cos\varphi_{III}$	$\operatorname{tg}\varphi_{III}$	$P_{III}$ , кВт	$Q_{III}$ , квар	$\cos\varphi_{\phi 1}$	$\operatorname{tg}\varphi_{\phi 1}$	$P_{\phi}$ , кВт	$Q_{\phi}$ , квар	$\delta I_T$ , %	$\delta P_T$ , %	На вводах НН трансформатора	В конце ЛЭП
0,5												
0,6												
0,7												
0,8												
0,9												

Полученные результаты занесите в табл. 3.5.

8.5. По полученным в п. 8.4 данным постройте зависимость коэффициента несимметрии по напряжению обратной последовательности в конце ЛЭП  $K_{U2} = f(\delta P_T)$  и определите допустимое значение степени несимметрии нагрузок фаз с точки зрения обеспечения условия  $K_{U2} \leq K_{U2. доп} = 2 \%$ .

9. Оформите отчёт.

### Контрольные вопросы

С целью подготовки к защите лабораторной работы ответьте на следующие контрольные вопросы:

1. К каким нежелательным последствиям может привести наличие однофазных электроприёмников, подключённых к сети?

2. Какое воздействие оказывает на работу электродвигателей наличие в сети напряжение обратной последовательности?

3. Назовите основные пути снижения отрицательных последствий, которые могут быть вызваны однофазными электроприёмниками?

4. Почему при определении расчётных активной и реактивной мощностей в узлах совместного питания однофазных и трёхфазных электроприёмников следует определять наиболее загруженную однофазными электроприёмниками фазу?

5. Какими критериями следует руководствоваться при определении наиболее загруженной фазы?

6. Почему при несимметрии нагрузок фаз сети возрастают потери энергии? Докажите на конкретном примере.

7. Как принято оценивать степень несимметрии нагрузок фаз?

8. Каким условиям должны удовлетворять коэффициенты приведения, с помощью которых находятся распределения активной и реактивной составляющих нагрузки, обусловленной однофазным электроприёмником, подключённым на линейное напряжение, например, между фазами, А и В?

9. От чего зависят численные значения коэффициентов приведения?

10. От расчётного узла предполагается запитать однофазные электроприёмники, подключаемые как на фазные напряжения, так и на линейные напряжения. Мощность, каких из них следует распределять между фазами в первую очередь и почему?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА ВКЛЮЧЁННЫХ В РАБОТУ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМЕ ЦЕХОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ТРЕМЯ ВЗАИМНО РЕЗЕРВИРОВАННЫМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ В РАЗЛИЧНЫЕ СМЕНЫ СУТОК**

#### **Цель работы**

Привитие навыков по определению экономически выгодных эксплуатационных режимов работы системы цехового электроснабжения.

#### **Исходные данные**

В цехе машиностроительного завода установлены три однострансформаторные подстанции, взаимное резервирование которых осуществляется через низковольтные кабельные вставки. На рис. 4.1 представлена схема питания указанных подстанций с трансформаторами  $T1$ ,  $T2$  и  $T3$ . Расположение трансформаторных подстанций (ТП) на плане цеха, трассы высоковольтных кабельных линий  $W1$ ,  $W2$  и  $W3$ , а также низковольтных кабельных вставок  $W4$  и  $W5$  показаны на рис. 4.2. Номинальные мощности трансформаторов всех ТП одинаковы и равняются. Суточные графики нагрузок цеха, выраженные в относительных единицах (в долях от номинальной мощности одного трансформатора),  $S_{н.ц}^* = S_{н.ц} / S_{т.ном} = f(t)$  представлены на рис. 4.3–4.8. Коэффициент мощности нагрузки цеха в течение суток остаётся неизменным и равным  $\cos\varphi_n = P_{н.ц} / S_{н.ц} = 0,9$ .

С целью упрощения расчётов примем условие о том, что нагрузка цеха на каждом интервале времени суток распределена между трансформаторами равномерно. В реальности выполнение такого условия маловероятно.

Паспортные данные цеховых силовых трансформаторов представлены в табл. 4.1.

Сведения о величинах токов трёхфазных коротких замыканий на шинах 10 кВ ГПП и протяжённостях высоковольтных и низковольтных кабельных линий, привязанных к различным вариантам суточных графиков, приведены в табл. 4.2.

Марка принятых в работе высоковольтных и низковольтных кабелей – ААШв.

#### **Порядок выполнения работы**

Для заданного преподавателем варианта исходных данных (номера суточного графика нагрузки цеха, типа и номинальной мощности силового трансформатора) требуется выполнить следующие расчёты:

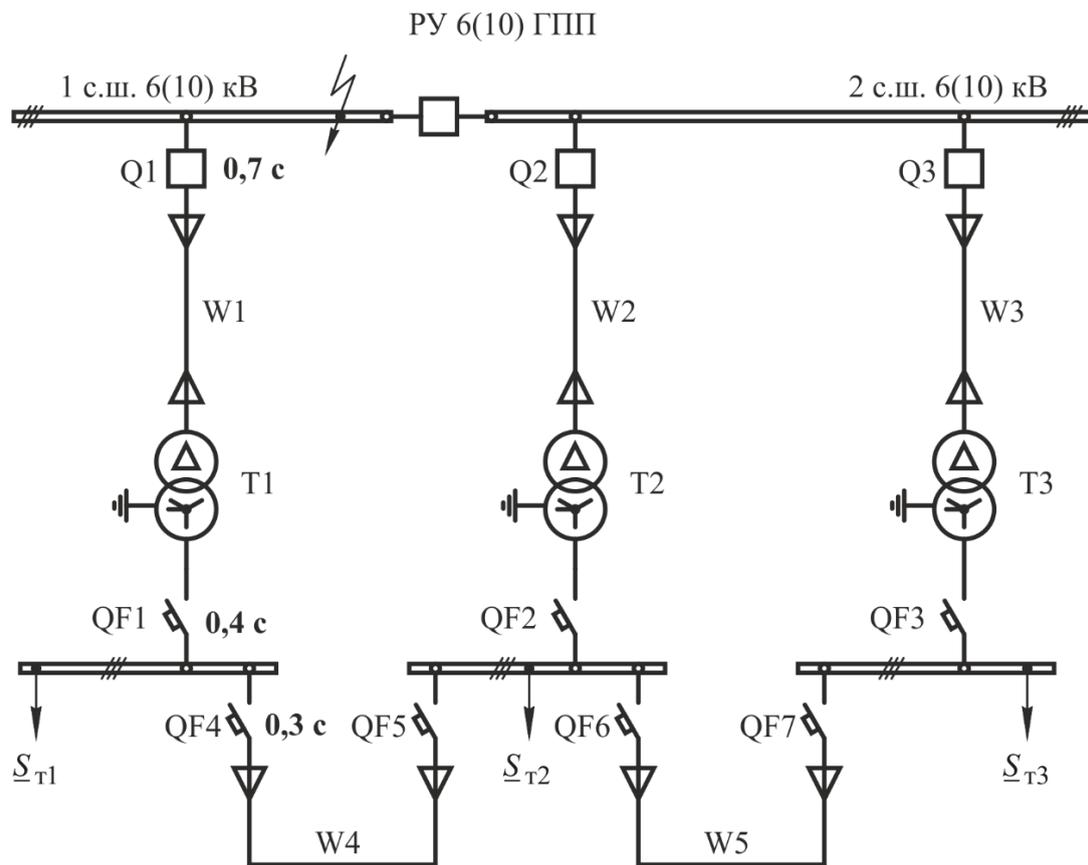


Рис. 4.1. Принципиальная электрическая схема электроснабжения цеха

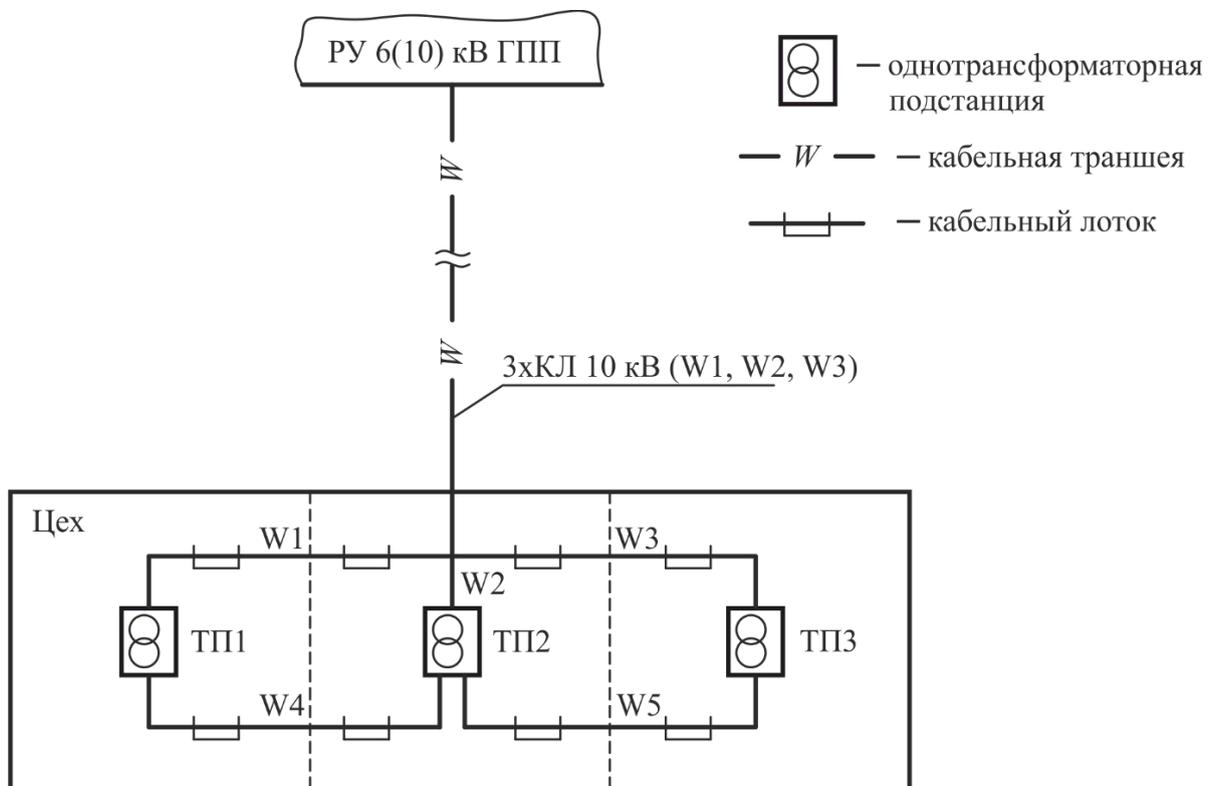


Рис. 4.2. Трассы кабельных линий на плане

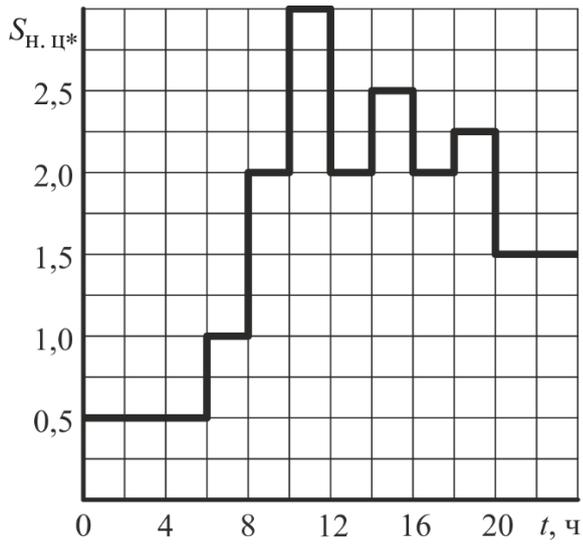


Рис. 4.3. График нагрузки №1

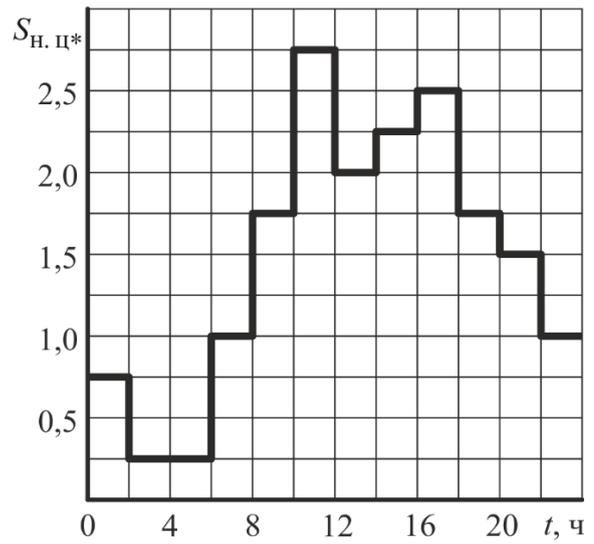


Рис. 4.4. График нагрузки №2

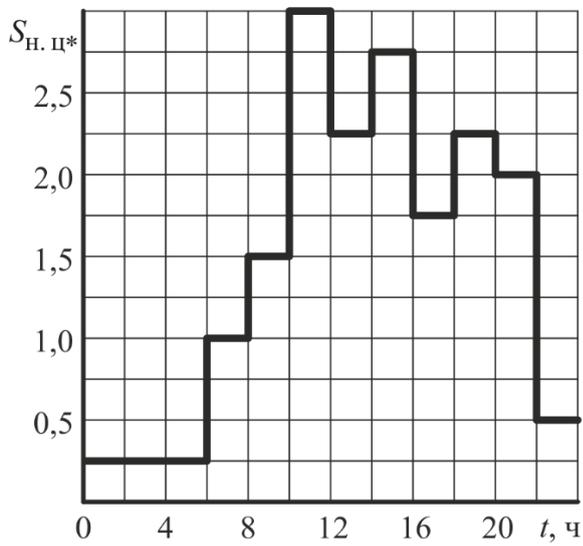


Рис. 4.5. График нагрузки №3

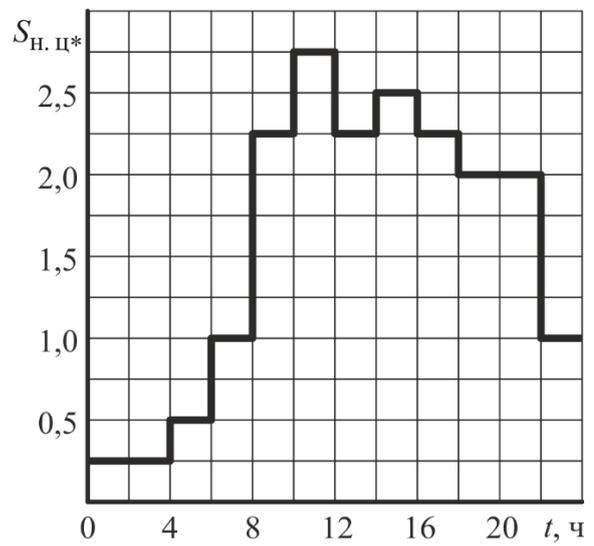


Рис. 4.6. График нагрузки №4

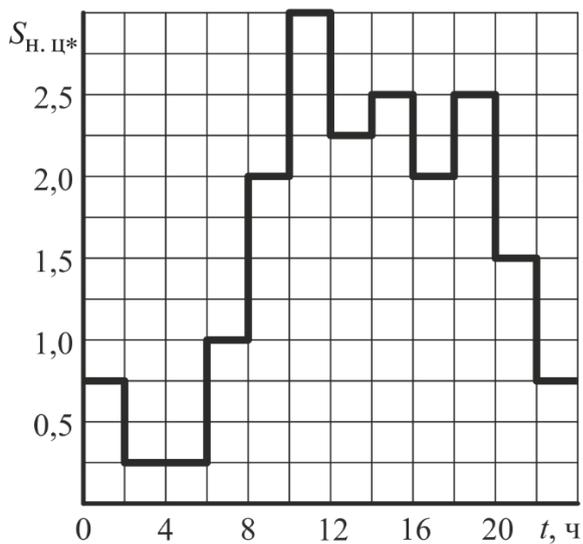


Рис. 4.7. График нагрузки №5

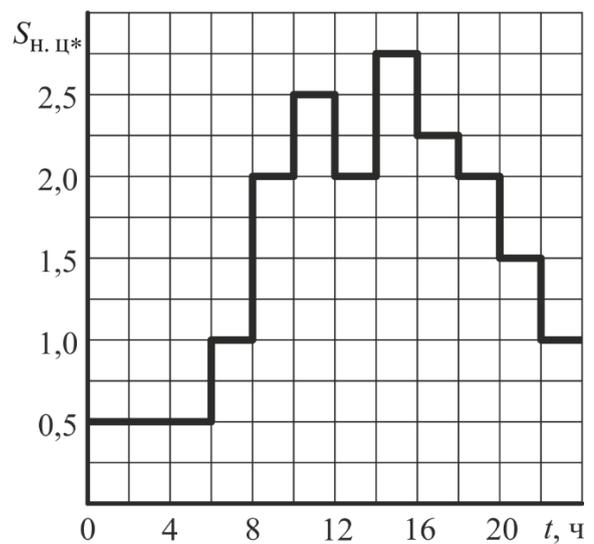


Рис. 4.8. График нагрузки №6

Таблица 4.1

## Технические параметры силовых трансформаторов

№ п/п	Тип трансформатора	$S_{T. ном}$ , кВ·А	$U_{вн}$ , кВ	$U_{нн}$ , кВ	$P_{х. х}$ , кВт	$P_{к. з}$ , кВт	$I_{х. х}$ , %	$U_{к. з}$ , %
1	ТМГ-100	100	6	0,4	0,27	1,97	1,5	4,5
2	ТМГ-160	160	6	0,4	0,41	2,7	1,2	4,5
3	ТМГ-250	250	10	0,4	0,53	3,7	1,2	4,5
4	ТМГ-400	400	10	0,4	0,87	5,6	1,2	4,5
5	ТМГ-630	630	10	0,4	1,24	7,6	1,2	5,5
6	ТМГ-800	800	10	0,4	1,37	9,6	1,0	5,5
7	ТМГ-1000	1000	10	0,4	1,6	10,8	1,0	5,5
8	ТМГ-1250	1250	10	0,4	1,8	12,4	1,0	6,0
9	ТМГ12-250	250	6	0,4	0,425	3,25	1,2	4,5
10	ТМГ12-400	400	6	0,4	0,61	4,6	0,8	4,5
11	ТМГ12-630	630	10	0,4	0,8	6,6	1,2	5,5
12	ТМГ12-800	800	10	0,4	0,93	7,9	0,9	5,5
13	ТМГ12-1000	1000	6	0,4	1,1	9,8	0,6	5,5
14	ТМГ12-1250	1250	10	0,4	1,35	11,0	0,6	6,0
15	АТМГ-100	100	6	0,4	0,066	1,62	0,2	4,5
16	АТМГ-250	250	6	0,4	0,15	3,13	0,1	4,5
17	АТМГ-400	400	10	0,4	0,21	4,5	0,08	4,5
18	АТМГ-630	630	10	0,4	0,28	6,35	0,075	5,5
19	АТМГ-800	800	6	0,4	0,315	8,0	0,07	5,5
20	АТМГ-1000	1000	10	0,4	0,35	9,0	0,06	5,5
21	АТМГ-1250	1250	10	0,4	0,38	10,3	0,05	6,0

Таблица 4.2

## Сведения о токах трёхфазного короткого замыкания на шинах 6(10) кВ ГПП и протяжённостях кабельных линий

№ суточного графика		1	2	3	4	5	6
Ток короткого замыкания, кА		5	6	8	10	12	14
Длина кабельных линий, м	W1	350	270	340	510	430	600
	W2	300	200	250	400	350	500
	W3	350	270	340	510	430	600
	W4	50	70	90	110	80	100
	W5	50	70	90	110	80	100

1. Определить минимально допустимое число трансформаторов, которые можно оставить в работе в различные смены суток с учётом их допустимых систематических перегрузок.

2. Восстановить суточный график нагрузки цеха, выразив мощность в именованных единицах.

3. Определить расчётную нагрузку цеха и выбрать сечения низковольтных и высоковольтных кабелей.

4. Рассчитать потери активной энергии в трансформаторах и кабельных линиях за периоды работы в ночную смену (с 0 до 8 часов), дневную (с 8 до 16 часов) и вечернюю (с 16 до 24 часов).

5. С целью нахождения оптимального варианта схемы передачи электроэнергии к шинам 0,4 кВ распределительных устройств цеховых ТП в указанные смены суток расчёты потерь энергии следует провести для всех возможных вариантов нахождения в работе трансформаторов в каждой смене суток.

6. По условию минимума потерь активной энергии в системе цехового электроснабжения определить количество трансформаторов, которые целесообразно оставлять в работе в течение каждой из указанных рабочих смен суток.

7. Определить годовую экономию электроэнергии, которую удалось получить в результате принятых технических решений.

### Методические указания по выполнению работы

Работа выполняется с применением ЭВМ. При выполнении расчётов по отмеченным выше пунктам работы следует руководствоваться следующими указаниями:

*1. Определение минимально допустимого числа трансформаторов, которые можно оставить в работе в различные смены суток*

Вопрос об определении минимально допустимого числа трансформаторов, которые можно оставлять в работе без ограничения потребителей в электроэнергии, должен решаться с учётом их допустимых систематических перегрузок.

Максимально допустимые кратности перегрузок трансформаторов в периоды прохождения максимумов нагрузок  $K_{п. т. доп}$  с учётом их допустимых систематических перегрузок в общем случае могут быть определены по методике, предложенной в ГОСТ 14209-85 [7]. В основу этой методики заложено преобразование суточного графика нагрузок трансформатора в эквивалентный, по условиям теплового износа изоляции, двухступенчатый прямоугольный график. В данной работе значения  $K_{п. т. доп}$  предлагается определять с использованием семейства кривых рис. 4.9, заимствованных из [8]. Они представляют собой зависимости систематических допустимых кратностей перегрузок трансформаторов с масляным охлаждением от коэффициента заполнения графика нагрузки  $K_{зап. гр}$  и продолжительности перегрузки  $T_{пер}^{сут}$  в течение суток, т. е.  $K_{п. т. доп} = f(K_{зап. гр}, T_{пер}^{сут})$ .

При принятом ранее условии о равномерности распределения нагрузки цеха между трансформаторами на каждом интервале времени суток численное значение  $K_{\text{зап. гр}}$  можно рассчитать по формуле

$$K_{\text{зап. гр}} = \frac{S_{\text{ср. сут}}}{S_{\text{н. ц* макс}}} = \frac{1}{S_{\text{н. ц* макс}}} \frac{1}{24} \sum_{i=1}^{n_{\text{сут}}} S_{\text{н. ц*i}} \Delta t_i,$$

где  $S_{\text{ср. сут}}$  – средняя мощность за сутки;  $n_{\text{сут}}$  – число интервалов наблюдения в суточном графике;  $S_{\text{н. ц*i}}$  – значение нагрузки цеха на  $i$ -м интервале времени;  $S_{\text{н. ц* макс}}$  – максимальное значение нагрузки цеха;  $\Delta t_i$  – длительность  $i$ -го интервала времени в суточном графике.

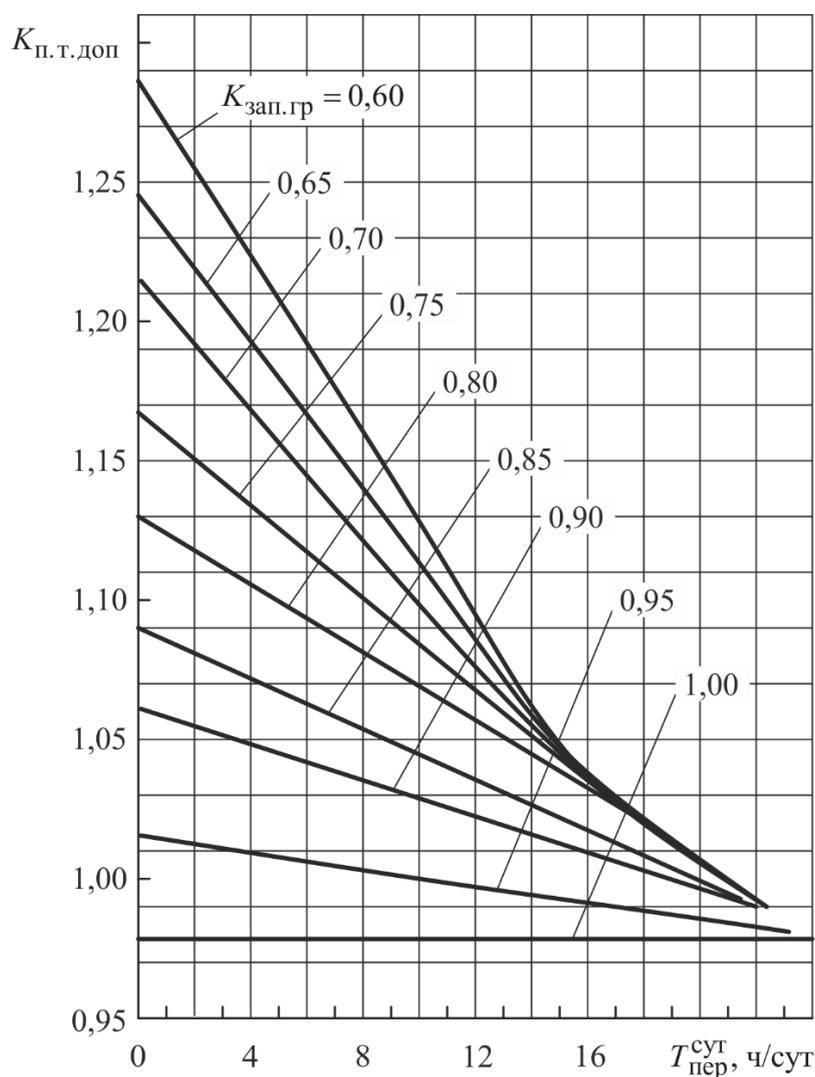


Рис. 4.9. Зависимости систематических допустимых кратностей перегрузок трансформаторов с масляным охлаждением от коэффициента заполнения графика нагрузки  $K_{\text{зап. гр}}$  и продолжительности перегрузки  $T_{\text{пер}}^{\text{сут}}$  в течение суток

Анализируя суточный график нагрузки нетрудно прийти к выводу о том, что работа с двумя отключёнными трансформаторами возможна только в ночную смену (от 0 до 8 часов). Для определения продолжительности перегрузки трансформаторов  $T_{пер}^{сут}$  при условии нахождения в работе двух трансформаторов необходимо на суточном графике нагрузки провести горизонтальную линию с ординатой  $S_{н.ц*} = 2$  и сложить все интервалы времени, при которых  $S_{н.ц*} > 2$ .

Далее по зависимостям, приведенным на рис. 4.9, следует найти допустимую кратность систематических перегрузок трансформаторов, находящихся в работе, и определить суммарную допустимую нагрузку  $S_{т.Σ*}^{доп}$  на них на интервалах времени, когда  $S_{н.ц*} > 2$

$$S_{т.Σ*}^{доп} = \frac{N_{т. раб} S_{м. доп. т}}{S_{т. ном}} = N_{т. раб} K_{п. т. доп} \cdot$$

Если на всех интервалах перегрузок дневной и вечерней смены  $S_{н.ц*} \leq S_{т.Σ*}^{доп}$ , то можно оставить в работе два трансформатора. Если это условие выполняется только в течение одной из указанных смен, например в вечерней смене (от 16 до 24 часов), то в другой (дневной) смене следует оставить в работе все три трансформатора.

## 2. Восстановление суточного графика нагрузки цеха в именованных единицах

При представлении заданного суточного графика нагрузки цеха, выраженной в именованных единицах, численные значения полной мощности  $S_{н.ц}$  (кВ·А) на  $i$ -м интервале времени суток определяется по выражению

$$S_{н.цi} = S_{н.ц*i} S_{т. ном} \cdot$$

Исходные данные и полученные результаты следует занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Суточный график нагрузки цеха и его показатели

№ интервала времени	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$S_{н.ц*}$ , о. е.											
$S_{н.ц}$ , кВ·А											
Длительность интервала, ч											
Расчётная мощность цеха $S_{р.ц} = \underline{\hspace{2cm}}$ , кВ·А						Число часов использования максимума нагрузки $T_{и.м.сут} = \underline{\hspace{2cm}}$ , ч.					

### 3. Определение расчётной нагрузки цеха и выбор сечения низковольтных и высоковольтных кабелей

#### 3.1. Определение расчётной нагрузки

Поскольку под расчётной мощностью принято понимать получасовой максимум нагрузки, а длительности отдельных интервалов времени в суточных графиках нагрузки составляют 2 и более часа, то в качестве расчётной мощности следует принимать максимальное значение, указанное на графике, т. е.  $S_{р.ц} = S_{м.ц}$ .

#### 3.2. Определение сечения кабелей

Сечение кабелей напряжением выше 1000 В сетях длительного пользования принято определять по экономической плотности тока  $j_э$ , численные значения которых зависят от марки кабеля и числа часов использования максимума нагрузки  $T_{и.м.год}$  в течение года. Для принятой в работе марки кабеля зависимость  $j_э$  от  $T_{и.м.год}$ , заимствованная из ПУЭ [4], приведена в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Экономическая плотность тока для кабелей  
с алюминиевыми жилами и бумажной изоляцией, А/мм<sup>2</sup>

$T_{и.м.год}$ , ч/год	1000–3000	3000–5000	Более 5000
$j_э$	1,6	1,4	1,2

Поскольку задан всего один суточный график нагрузки, то при определении годового числа часов максимума нагрузки можно принять условие о том, что он повторится 365 раз в году, то есть воспользоваться выражением

$$T_{и.м.год} = 365T_{и.м.сут}, \quad (4.1)$$

где  $T_{и.м.сут}$  – число часов использования максимума нагрузки за одни сутки, которое рассчитывается по выражению

$$T_{и.м.сут} = \frac{1}{S_{м.ц}} \sum_{i=1}^{n_{сут}} S_{н.цi} \Delta t_i. \quad (4.2)$$

Здесь  $n_{сут}$  – число интервалов в суточном графике;  $\Delta t_i$  – длительность  $i$ -го интервала времени суточного графика нагрузки.

Полученное численное значение  $T_{и.м.сут}$  занесите в табл. 4.3.

Используя полученное значение  $T_{и.м.год}$  по табл. 4.4 следует найти экономическую плотность тока, и по нижеследующей формуле определить искомое экономически целесообразное сечение

$$F_3 = \frac{I_{\text{р.к.л}}}{j_3} = \frac{\sqrt{\left(P_{\text{р.т}} + \Delta P_{\text{т}}\right)^2 + \left(Q_{\text{р.т}} + \Delta Q_{\text{т}}\right)^2}}{\sqrt{3} U_{\text{ном.с}} j_3}, \quad (4.3)$$

где  $I_{\text{р.к.л}}$  – расчётный ток одной кабельной линии;  $U_{\text{ном.с}}$  – номинальное напряжение сети, кВ;  $P_{\text{р.т}}$  и  $Q_{\text{р.т}}$  – активная и реактивная составляющие расчётной мощности одного трансформатора;  $\Delta P_{\text{т}}$  и  $\Delta Q_{\text{т}}$  – активная и реактивная составляющие потерь мощности в цеховом трансформаторе в нормальном режиме его работы.

Активная и реактивная составляющие расчётной мощности одного трансформатора и потерь мощности в них рассчитываются по следующим формулам

$$P_{\text{р.т}} = \frac{1}{3} S_{\text{р.ц}} \cos \varphi_{\text{н}}; \quad Q_{\text{р.т}} = \frac{1}{3} S_{\text{р.ц}} \sin \varphi_{\text{н}};$$

$$\Delta P_{\text{т}} = \Delta P_{\text{х.х}} + K_{\text{з.т}}^2 \Delta P_{\text{к.з}}; \quad \Delta Q_{\text{т}} = \frac{S_{\text{т.ном}}}{100\%} \left( I_{\text{х.х}} \% + K_{\text{з.т}}^2 U_{\text{к.з}} \% \right),$$

где  $K_{\text{з.т}}$  – коэффициент загрузки трансформатора в нормальном режиме работы, находится по выражению

$$K_{\text{з.т}} = \frac{S_{\text{р.ц}}}{3S_{\text{т.ном}}}.$$

Полученное значение сечения следует округлить до ближайшего стандартного сечения  $F_{\text{ст}}$ .

Выбранное сечение кабеля необходимо проверить по длительно допустимому нагреву в послеаварийном режиме, т. е. проверить выполнение условия

$$I_{\text{к.л.п/ав}} \leq K_{\text{п.доп}} I'_N, \quad (4.4)$$

где  $I_{\text{к.л.п/ав}}$  – ток, протекаемый по кабелю в послеаварийном режиме;  $K_{\text{п.доп}}$  – допустимый коэффициент перегрузки кабеля в послеаварийном режиме;  $I'_N$  – длительно допустимый ток, приведенный к реальным условиям охлаждения, А.

В данной работе будем считать, что условия окружающей среды, в которых находятся кабели, совпадают с принятыми условиями при определении длительно допустимых токов  $I_N$ , приводимых в справочной литературе и в ПУЭ.

Согласно требованиям пункта 1.3.17 ПУЭ [4] при смешанной прокладке кабелей (одна часть в траншее, а другая внутри цеха) проверка их по допустимому нагреву должна осуществляться для участка с худшими условиями

охлаждения. В нашем случае таким участком является часть, проложенная в цехе, где охлаждающей средой является воздух.

Ниже в табл. 4.5 приведены длительно допустимые токи для кабелей типа ААШв, прокладываемых в воздухе, в зависимости от их сечения, которые заимствованы из [5].

Таблица 4.5

Длительно допустимые токи для кабелей типа ААШв, прокладываемых в воздухе, А

Сечение $F$ , мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
3-х жильный кабель напряжением 10 кВ	–	67	87	106	132	161	194	234	264	298	347
3-х жильный кабель напряжением 6 кВ	55	73	95	117	146	178	214	248	285	333	369
4-х жильный кабель напряжением до 1 кВ	55	72	95	118	146	180	218	261	300	342	402

Допустимый коэффициент перегрузки кабеля в послеаварийном режиме приводится в ПУЭ [4, табл. 1.3.2] в зависимости от коэффициента загрузки кабеля в предшествующем режиме  $K_{з.к.нор}$  и продолжительности перегрузки  $T_{пер}$ . Продолжительности перегрузки последовательно соединённых элементов системы электроснабжения (в нашем случае трансформаторов и кабелей) должны быть согласованы. Так как цеховые силовые трансформаторы в периоды послеаварийных режимов допускают перегрузки на 40 % в течение 6 часов 5 суток подряд, то для кабеля следует принять те же условия. Согласно данным [4, табл. 1.3.2], при прокладке кабеля в воздухе и продолжительности перегрузки  $T_{пер} = 6$  ч, допустимый коэффициент перегрузки кабеля в послеаварийном режиме  $K_{п.доп}$  равняется 1,25.

Значение тока в кабельной линии напряжением выше 1000 В в послеаварийном режиме при условии питания трансформаторов по радиальным линиям можно принять приблизительно равным

$$I_{к.л.п/ав} \approx 1,4I_{т.ном} = \frac{1,4S_{т.ном}}{\sqrt{3}U_{ном.вн}}$$

В случае невыполнения условия (4.4) следует увеличить сечение кабеля до следующего стандартного значения.

Согласно положениям, указанным в пункте 1.3.28 ПУЭ, сечения кабелей напряжением до 1000 В подлежат проверке (выбору) по экономической плотности тока только при  $T_{и.м.год} > (4000-5000)$  часов в год. При меньших значениях  $T_{и.м.год}$  и принятых ранее условиях охлаждения кабелей сечения низковольтных кабелей рекомендуется выбирать по условию

$$I_{р.к.л} \leq I_N n_{каб},$$

где  $I_{р.к.л}$  – значение получасового максимума тока в кабельных линиях  $W4$  и  $W5$ ;  $n_{каб}$  – число параллельно работающих кабелей, проложенных в одной плоскости с требуемым просветом между ними.

Значение получасового максимума тока в кабельных линиях  $W4$  и  $W5$  в нормальном режиме их работы (трансформатор Т2 отключён) находится по выражению

$$I_{р.к.л} = \frac{S_{р.ц}}{6\sqrt{3}U_{ном.НН}}$$

Следует отметить то, что в решаемой задаче в низковольтных кабелях послеаварийный режим будет иметь место при аварийном отключении трансформатора Т1 или Т3 в дневную смену, т.е. когда по ним будет передаваться нагрузка одного трансформатора в нормальном режиме.

Следовательно

$$I_{к.л.п/ав} = \frac{S_{р.ц}}{3\sqrt{3}U_{ном.НН}}.$$

Проверка низковольтного кабеля по допустимому нагреву в послеаварийном режиме выполняется по условию (4.4).

Выбранные сечения кабелей должны быть проверены на термическую стойкость к токам короткого замыкания по условию

$$B_{к.р} \leq B_{к.доп}, \quad (4.5)$$

где  $B_{к.р}$  – расчётное значение теплового импульса, вызываемое расчётным током трёхфазного короткого замыкания в начале кабельной линии;  $B_{к.доп}$  – допустимое значение теплового импульса, определяемое через каталожные данные завода-изготовителя кабельной продукции.

При питании СЭС от источника бесконечной мощности, что соответствует нашим условиям, расчётное значение теплового импульса, вызываемое током трёхфазного короткого замыкания (КЗ) рассчитывается по выражению

$$B_{к.р} = \left( I_{к.п|0|р}^{(3)} \right)^2 t_{кз.эКВ},$$

где  $I_{к.п|0|р}^{(3)}$  – величина периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания при  $t = 0$  в расчётной точке сети (начале кабельной линии). Численное значение  $I_{к.п|0|р}^{(3)}$  в сети высокого напряжения для каждого варианта приведена в табл. 4.2;  $t_{кз.эКВ}$  – эквивалентное время (с) протекания тока КЗ, учитывающее долю теплового импульса, обусловленную аperiodической составляющей тока КЗ.

В общем случае численное значение  $t_{\text{кз. экв}}$  рассчитывается по формуле

$$t_{\text{кз. экв}} = t_{\text{кз}} + T_{\text{а}} \left( 1 - e^{-\frac{2t_{\text{кз}}}{T_{\text{а}}}} \right),$$

где  $t_{\text{кз}}$  – время протекания тока короткого замыкания до момента разрыва контактов выключателя и гашения дуги в нём;  $T_{\text{а}}$  – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания.

Следует отметить, что вторым слагаемым в данной формуле учитывается доля теплового импульса, обусловленная апериодической составляющей тока КЗ. Численные значения  $t_{\text{кз. экв}}$  приведены на рис. 4.1

При проверке на термическую стойкость кабелей напряжением 0,4 кВ значение периодической составляющей тока трёхфазного короткого замыкания при  $t = 0$  может быть принято равным

$$I_{\text{к. п. |0|. р}}^{(3)} \approx \frac{100\%}{U_{\text{к. з}}} I_{\text{т. ном}} = \frac{100\%}{U_{\text{к. з}}} \frac{S_{\text{т. ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном. нн}}}, \text{ кА.} \quad (4.6)$$

В эту формулу номинальную мощность трансформатора  $S_{\text{т. ном}}$  следует подставлять в МВ·А, а номинальное напряжение в кВ, т. е. 0,4 кВ. Отметим и то, что значение тока, найденное по формуле (4.6), является максимально возможным.

Допустимое значение теплового импульса  $B_{\text{к. доп}}$  для выбранного сечения кабеля, определяемое через каталожные данные завода-изготовителя кабельной продукции, рассчитывается по выражению

$$B_{\text{к. доп}} = k_1^2 I_{\text{т. ст. кат}}^2 t_{\text{т. ст. кат}}, \quad (4.7)$$

где  $k_1$  – поправочный коэффициент, учитывающий степень загрузки кабеля в предшествующем КЗ режиме;  $I_{\text{т. ст. кат}}$  и  $t_{\text{т. ст. кат}}$  – соответственно величина термически стойкого тока и его допустимая продолжительность протекания, как правило – одна секунда, указываемые заводом-изготовителем в каталогах кабельной продукции при условии полной загрузки кабеля в режиме, предшествующем короткому замыканию.

Численные значения допустимого тока односекундного короткого замыкания для кабелей с алюминиевыми жилами и бумажной изоляцией, заимствованные из [5] приведены в табл. 4.6.

Если условие (4.5) не выполняется, следует увеличить сечение кабеля до следующего большего стандартного значения, затем проверить выполнение условия 4.5.

Таблица 4.6

Допустимые токи односекундного трёхфазного короткого замыкания для кабелей с алюминиевыми жилами и бумажной изоляцией при полной их загрузке в предшествующем режиме, кА

Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>		6	10	16	25	35	50
Номинальное напряжение кабеля, кВ	1–6	0,47	0,79	1,28	2,02	2,79	3,78
	10	0,49	0,82	1,33	2,12	2,93	3,96

Окончание табл. 4.6

Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>		70	95	120	150	185	240
Номинальное напряжение кабеля, кВ	1–6	5,52	7,66	9,68	11,88	14,94	19,62
	10	5,79	8,04	10,16	12,46	15,66	20,56

Численные значения коэффициента  $k_1$  приводятся в [5] в зависимости от вида прокладки кабелей и степени их загрузки перед коротким замыканием  $k_{з.к} = I_{р.к} / I'_N$ . В нижеследующей табл. 4.7 приведены значения коэффициентов  $k_1$  для условий прокладки кабелей в воздухе.

Таблица 4.7

Номинальное напряжение кабеля, кВ	Значение коэффициента $k_1$ в зависимости от коэффициента их загрузки перед коротким замыканием						
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1–6	1,22	1,2	1,17	1,14	1,1	1,05	1,0
10	1,17	1,15	1,13	1,11	1,07	1,04	1,0

Исходные данные и результаты расчётов по выбору сечений кабелей внесите в табл. 4.8.

Таблица 4.8

Результаты расчётов по выбору сечений кабелей

$I_{р.к.л.}$ , А	$T_{и.м.год}$ , ч/год	$j_э$ , А/мм <sup>2</sup>	$F_э$ , мм <sup>2</sup>	$n_{каб}$ , шт	$F_{ст}$ , мм <sup>2</sup>	$I_N$ , А	$I_{к.л.п/ав}$ , А	$k_{з.к}$ , о. е.
Высоковольтные кабели								
Низковольтные кабели								

$K_{п. доп},$ о. е.	$K_{п. доп} I_N,$ А	$I_{к. п 0 . р}^{(3)},$ кА	$t_{кз. экв},$ с	$B_{к. расч},$ кА <sup>2</sup> ·с	$k_1,$ о. е.	$I_{т. ст. кат},$ кА	$B_{к. доп},$ кА <sup>2</sup> ·с	$F_{кл},$ мм <sup>2</sup>
Высоковольтные кабели								
Низковольтные кабели								

4. Расчёт потерь активной энергии в элементах СЭС, приведенной на рис. 4.1 в ночную, дневную и вечернюю смены при различных значениях числа трансформаторов, находящихся в работе

#### 4.1. Режим № 1.

В этом режиме низковольтные кабели отключены, поэтому потерь мощности энергии в них нет. Все три трансформатора находятся в работе.

##### 4.1.1. Потери активной энергии в трансформаторах.

Суммарные потери активной энергии в трансформаторах в  $j$ -ю смену рассчитываются по формуле

$$\Delta W_{тj}^I = n_{тj}^I \sum_{i=1}^{n_j} \Delta P_{тji}^I \Delta t_{ji}, \quad (4.8)$$

где  $n_{тj}^I$  – число включённых в работу трансформаторов в первом режиме работы сети;  $n_j$  – число ступеней в графике нагрузки в  $j$ -ю смену;  $\Delta P_{тji}^I$  – потери активной мощности в одном трансформаторе на  $i$ -м интервале времени  $j$ -й смены суток, кВт;  $\Delta t_{ji}$  – длительность интервала с  $i$ -й нагрузкой в  $j$ -ю смену суток, часов.

Отметим то, что здесь и далее надстрочные индексы, обозначенные римскими цифрами, указывают на принадлежность параметра к номеру режима работы системы цехового электроснабжения.

Численное значение потерь активной мощности  $\Delta P_{тji}^I$  определяется по выражению

$$\Delta P_{тji}^I = P_{х.х} + (K_{з.тj}^I)^2 P_{к.з} = P_{х.х} + \left( \frac{S_{н.цj}}{n_{тj}^I S_{т.ном}} \right)^2 P_{к.з}, \quad (4.9)$$

Здесь  $S_{н.цj}$  – номинальная мощность трансформатора, кВ·А;  $P_{х.х}$  и  $P_{к.з}$  – паспортные значения активных составляющих потерь соответственно хо-

лостого хода и короткого замыкания (см. табл. 4.1), кВт;  $K_{3.т.ји}^I$  – коэффициент загрузки трансформатора на  $i$ -м интервале времени  $j$ -й смены суток;  $S_{н.ц.ји}$  – нагрузка цеха на  $i$ -м интервале времени  $j$ -й смены суток.

Для расчёта потерь активной энергии в высоковольтных кабелях необходимо знать и потери реактивной мощности в трансформаторе на каждом интервале времени суток, которые рассчитываются по формуле

$$\begin{aligned} \Delta Q_{т.ји}^I &= \frac{S_{т.н.ом}}{100\%} \left[ I_{х.х} + (K_{3.т.ји}^I)^2 U_{к.з} \right] = \\ &= \frac{S_{т.н.ом}}{100\%} \left[ I_{х.х} + \left( \frac{S_{н.ц.ји}}{n_T S_{т.н.ом}} \right)^2 U_{к.з} \right], \end{aligned} \quad (4.10)$$

где  $I_{х.х}$  и  $U_{к.з}$  – паспортные значения тока холостого и напряжения короткого замыкания в %, (см. табл. 4.1).

#### 4.1.2. Потери активной энергии в высоковольтных кабельных линиях

Поскольку трансформаторные подстанции питаются по радиальным линиям, то потери энергии в кабелях в  $j$ -ю смену можно рассчитать, используя следующую формулу

$$\Delta W_{к.л. в/в. j}^I = \sum_{i=1}^{n_j} \frac{R_{уд.к}}{U_{ji}^2} \left[ \left( \frac{P_{н.ц.ји} + \Delta P_{т.ји}^I}{n_T^I} \right)^2 + \left( \frac{Q_{н.ц.ји} + \Delta Q_{т.ји}^I}{n_T^I} \right)^2 \right] \Delta t_{ji} 10^{-3}$$

Так как в нормальном режиме работы СЭС отклонение напряжения на шинах 6(10) кВ ГПП не должно превышать  $\pm 5\%$ , с целью упрощения расчётов можно принять  $U_{ji} = U_{ном}$  сети. Тогда последнее выражение можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Delta W_{к.л. в/в. j}^I &= \frac{R_{уд.к} (2L_1 + L_2)}{U_{ном}^2} 10^{-3} \times \\ &\times \sum_{i=1}^{n_j} \left[ \left( \frac{P_{н.ц.ји} + \Delta P_{т.ји}^I}{n_T^I} \right)^2 + \left( \frac{Q_{н.ц.ји} + \Delta Q_{т.ји}^I}{n_T^I} \right)^2 \right] \Delta t_{ji} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Здесь  $R_{уд.к}$  – удельное (погонное) сопротивление кабеля, Ом/км, выбирается по данным табл. 4.9.  $P_{н.ц.ји}$  и  $Q_{н.ц.ји}$  – соответственно активная и реактивная составляющие нагрузки цеха на  $i$ -м интервале времени  $j$ -й смены, которые рассчитываются по формулам:  $P_{н.ц.ји} = S_{н.ц.ји} \cos \varphi_{н}$  и  $Q_{н.ц.ји} = S_{н.ц.ји} \sin \varphi_{н}$ .

Потери активной энергии на участке цехового электроснабжения между сборными шинами 6(10) кВ ГПП и 0,4 кВ цеховых ТП в  $j$ -ю смену находятся

суммирования всех составляющих. Так в рассматриваемом режиме работы системы цехового электроснабжения искомые потери энергии в  $j$ -ю смену

$$\Delta W_j^I = \Delta W_{Tj}^I + \Delta W_{\text{кл. в/в } j}^I \quad (4.12)$$

Таблица 4.9

Удельное активное сопротивление кабелей с алюминиевыми жилами, Ом/км

Сечение кабеля, мм <sup>2</sup>	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
$R_{\text{уд. к}}$ , Ом/км	3,05	1,91	1,22	0,87	0,61	0,44	0,32	0,25	0,20	0,16	0,13

Технические параметры выбранных кабелей и паспортные данные трансформаторов занесите в табл. 4.10. Суточные графики активной, реактивно и полной нагрузки, а также результаты расчётов потерь энергии для всех трёх смен занесите в табл. 4.11.

Таблица 4.10

Технические данные трансформаторов и кабелей

Трансформаторы					Кабели низковольтные				Кабели высоковольтные		
$S_{\text{T. ном}}$ , кВ·А	$P_{\text{х. х}}$ , кВт	$P_{\text{к. з}}$ , кВт	$I_{\text{х. х}}$ , %	$U_{\text{к. з}}$ , %	$F_{\text{каб}}$ , мм <sup>2</sup>	$R_{\text{уд. к. н/в}}$ , Ом/км	$n_{\text{каб}}$ , шт	$L_{\text{кл. н/в}}$ , км	$F_{\text{каб}}$ , мм <sup>2</sup>	$R_{\text{уд. к. в/в}}$ , Ом/км	$L_{\text{кΣ}}$ , км

## 4.2 Режим № 2

Трансформатор Т2 выведен из работы. Его нагрузку принимают на себя трансформаторы Т1 и Т3. Так как параметры цеховых трансформаторов Т1 и Т3, а также кабельных линий  $L_1$  и  $L_3$  одинаковы, по каждой из низковольтных кабельных линий  $L_4$  и  $L_5$  передаётся половина нагрузки трансформатора Т2, т. е. 1/6 часть нагрузки цеха.

4.2.1 При вышеуказанных условиях потери активной энергии в  $j$ -ю смену в двух низковольтных кабельных линиях рассчитываются по формуле

$$\Delta W_{\text{кл. н/в } j}^{II} = 2 \sum_{i=1}^{n_j} \Delta P_{\text{кл. н/в } ji}^{II} \Delta t_{ji}, \quad (4.13)$$

где  $\Delta P_{\text{кл. н/в } ji}^{II}$  – потери активной мощности в одной из низковольтных кабельных линий на  $i$ -м интервале времени  $j$ -й смены суток.

Таблица 4.11

Исходные данные и результаты расчётов потерь энергии в различные смены суток

Суточный график нагрузки, $\cos\varphi = 0,9$						Расчёт потерь мощности и энергии		
Номер смены	Номер интервала времени наблюдения	Длительность интервала времени	$S_{н.ц},$ кВ·А	$P_{н.ц},$ кВт	$Q_{н.ц},$ квар	Режим 1 (в работе 3 трансформатора)		
						В трансформаторах		
		$\Delta t_{ji},$ ч				$\Delta P'_{tji},$ кВт	$\Delta Q'_{tji},$ квар	$\Delta W'_{tj},$ кВт·ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Первая (дневная)	1							
	2							
	...							
	$n_1$							
Вторая (вечерняя)	1							
	2							
	...							
	$n_2$							
Третья (ночная)	1							
	2							
	...							
	$n_2$							

Номер смены	Номер интервала наблюдения	Расчёт потерь мощности и энергии								
		Режим 1		Режим 2 (В работе 2 трансформатора Т1 и Т3)						
		Потери энергии в высоковольтных кабелях	Полные потери энергии за смену	Потери мощности и энергии в низковольтных кабелях		Потери мощности и энергии в и энергии в трансформаторах				
		$\Delta W_{\text{кл. в/в}j}^I$ , кВт·ч	$\Delta W_j^I$ , кВт·ч	$\Delta P_{\text{кл. н/в}ji}^{II}$ , кВт	$\Delta W_{\text{кл. н/в}j}^{II}$ , кВт·ч	$K_{з. \text{т}ji}^{II}$	$\Delta P_{\text{т}ji}^{II}$ , кВт	$\Delta Q_{\text{т}ji}^{II}$ , квар	$\Delta W_{\text{т}j}^{II}$ , кВт·ч	
1	2	10	11	12	13	14	15	16	17	
Первая (дневная)	1									
	2									
	...									
	$n_1$									
Вторая (вечерняя)	1									
	2									
	...									
	$n_2$									
Третья (ночная)	1									
	2									
	...									
	$n_2$									

Номер смены	Номер интервала наблюдения	Расчёт потерь мощности и энергии							
		Режим 2		Режим 3 (В работе один трансформатор Т2)					
		Потери энергии в высоковольтных кабелях	Полные потери энергии за смену	Потери мощности и энергии в низковольтных кабелях		Потери мощности и энергии в трансформаторах			
		$\Delta W_{\text{кл. в/в}j}^{II}$ , кВт·ч	$\Delta W_j^{II}$ , кВт·ч	$\Delta P_{\text{кл. н/в}ji}^{III}$ , кВт	$\Delta W_{\text{кл. н/в}j}^{III}$ , кВт·ч	$K_{3. \text{т}ji}^{III}$	$\Delta P_{\text{т}ji}^{III}$ , кВт	$\Delta Q_{\text{т}ji}^{III}$ , квар	$\Delta W_{\text{т}j}^{III}$ , кВт·ч
1	2	18	19	20	21	22	23	24	25
Третья (ночная)	1								
	2								
	...								
	$n_2$								

Номер смены	Номер интервала времени наблюдения	Расчёт потерь мощности и энергии	
		Режим 3 (В работе один трансформатор Т2)	
		Потери энергии в высоковольтных кабелях	Полные потери энергии за смену
		$\Delta W_{\text{кл. В/В}j}^{\text{III}}$ , кВт·ч	$\Delta W_j^{\text{III}}$ , кВт·ч
1	2	26	27
Третья (ночная)	1		
	2		
	...		
	$n_2$		

Численное значение  $\Delta P_{\text{кл. н/в } ji}^{\text{II}}$  определяется по следующему расчётному выражению

$$\Delta P_{\text{кл. н/в } ji}^{\text{II}} = 3 \left( \frac{S_{\text{н. ц } ji}}{6\sqrt{3}U_{\text{ном}}} \right)^2 R_{\text{кл. н/в}} 10^{-3}, \text{ кВт.}$$

В данное выражение мощность следует подставлять в кВ·А, напряжение в киловольтах, сопротивление в Омах. Активное сопротивление кабельной линии следует рассчитать по формуле

$$R_{\text{кл. н/в}} = \frac{R_{\text{уд. к. н/в}} L_{\text{кл. н/в}}}{n_{\text{к}}}.$$

Численное значение  $R_{\text{уд. к. н/в}}$  выбирается в зависимости от сечения по данным табл. 4.9, а длина низковольтной кабельной линии берётся в зависимости от варианта задания из табл. 4.2.

#### 4.2.2 Потери активной энергии в трансформаторах

Потери активной энергии в трансформаторах в  $j$ -ю смену суток рассчитываются по формуле, аналогичной (4.8)

$$\Delta W_{\text{т } j}^{\text{II}} = n_{\text{т}}^{\text{II}} \sum_{i=1}^{n_j} \Delta P_{\text{т } ji}^{\text{II}} \Delta t_{ji},$$

где  $n_{\text{т}}^{\text{II}}$  – число трансформаторов, находящихся в работе.

Потери активной и реактивной мощности в одном цеховом трансформаторе на отдельных интервалах времени  $j$ -й смены суток рассчитываются по выражениям, аналогичным (4.9) и (4.10)

$$\Delta P_{\text{т } ji}^{\text{II}} = P_{\text{х. х}} + \left( K_{\text{з. т } ji}^{\text{II}} \right)^2 P_{\text{к. з}}; \quad (4.14)$$

$$\Delta Q_{\text{т } ji}^{\text{II}} = \frac{S_{\text{т. ном}}}{100\%} \left[ I_{\text{х. х}} + \left( K_{\text{з. т } ji}^{\text{II}} \right)^2 U_{\text{к. з}} \right]; \quad (4.15)$$

где  $K_{\text{з. т } ji}^{\text{II}}$  – коэффициент загрузки трансформатора на  $i$ -м интервале времени  $j$ -й смены суток, который рассчитывается по нижеследующему расчётному выражению

$$K_{\text{з. т } ji}^{\text{II}} = \frac{\sqrt{\left( P_{\text{н. ц } ji} + 2\Delta P_{\text{кл. н/в } ji}^{\text{II}} \right)^2 + Q_{\text{н. ц } ji}^2}}{n_{\text{т}}^{\text{II}} S_{\text{т. ном}}}. \quad (4.16)$$

Отметим то, что при расчёте потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе не учитываются потери реактивной мощности в низковольтных кабелях в силу малости их индуктивных сопротивлений.

#### 4.2.3 Потери активной энергии в высоковольтных кабелях

Потери активной энергии в высоковольтных кабелях рассчитываются по формуле, аналогичной (4.11)

$$\Delta W_{\text{кл. в/в } j}^I = \frac{R_{\text{уд. к}} 2L_1}{U_{\text{НОМ}}^2} 10^{-3} \times \sum_{i=1}^{n_j} \left[ \left( \frac{P_{\text{н. ц } ji}}{n_{\text{T}}^{II}} + \Delta P_{\text{кл. н/в } ji}^{II} + \Delta P_{\text{T } ji}^{II} \right)^2 + \left( \frac{Q_{\text{н. ц } ji}}{n_{\text{T}}^{II}} + \Delta Q_{\text{T } ji}^{II} \right)^2 \right] \Delta t_{ji}. \quad (4.17)$$

Суммарные потери активной энергии в  $j$ -ю смену суток находим по выражению

$$\Delta W_j^{II} = \Delta W_{\text{кл. н/в } j}^{II} + \Delta W_{\text{T } j}^{II} + \Delta W_{\text{кл. в/в } j}^{II}.$$

Результаты расчётов занесите в табл. 4.11.

### 4.3 Режим № 3

Трансформаторы Т1 и Т3 выведены из работы. В этом режиме вся нагрузка цеха передаётся по кабельной линии W2, трансформатору Т2, а к сборным шинам 0,4 кВ ТП1 и ТП3 по низковольтным кабельным линиям, по каждой из которых пропускается 1/3 нагрузки цеха. Учитывая выводы, сделанные в п.1, где рассмотрен вопрос определения минимально допустимого числа трансформаторов, которые должны находиться в работе, потери активной энергии в этом режиме следует определить только в **ночную** смену, т. е. на интервале времени от 0 до 8 часов утра.

4.3.1 При вышеуказанных условиях потери активной энергии в ночную смену в двух низковольтных кабельных линиях рассчитываются по формуле аналогичной (4.13)

$$\Delta W_{\text{кл. н/в } j}^{III} = 2 \sum_{i=1}^{n_j} \Delta P_{\text{кл. н/в } ji}^{III} \Delta t_{ji}.$$

Значения потерь активной мощности в одной из двух низковольтных кабельных линий связи между ТП2 и ТП1 или ТП2 и ТП3 на  $i$ -м интервале времени наблюдения определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{кл. н/в } ji}^{III} = 3 \left( \frac{S_{\text{н. ц } ji}}{\sqrt{3} U_{\text{НОМ}}} \right)^2 R_{\text{кл. н/в}} 10^{-3} = \frac{S_{\text{н. ц } ji}^2}{9 U_{\text{НОМ}}^2} R_{\text{кл. н/в}} 10^{-3}, \text{ кВт.}$$

### 4.3.2 Потери активной энергии в трансформаторе Т2

Потери активной энергии в трансформаторе Т2 в **ночную** смену суток определяются по следующему расчётному выражению

$$\Delta W_{\text{T } j}^{III} = n_{\text{T}}^{III} \sum_{i=1}^{n_j} \Delta P_{\text{T } ji}^{III} \Delta t_{ji}.$$

Численные значения потерь активной и реактивной мощности в трансформаторе на  $i$ -м интервале времени наблюдения определяются по формулам аналогичным (4.14) и (4.15)

$$\Delta P_{Tji}^{III} = P_{x.x} + \left( K_{3.Tji}^{III} \right)^2 P_{к.з};$$

$$\Delta Q_{Tji}^{III} = \frac{S_{T.НОМ}}{100\%} \left[ I_{x.x} + \left( K_{3.Tji}^{III} \right)^2 U_{к.з} \right].$$

Коэффициент загрузки трансформатора  $K_{3.Tji}^{III}$  на  $i$ -м интервале времени наблюдения в **ночную** смену суток находится по выражению, подобному (4.16)

$$K_{3.Tji}^{III} = \frac{\sqrt{\left( P_{н.цji} + 2\Delta P_{кл.н/вji}^{III} \right)^2 + Q_{н.цji}^2}}{S_{T.НОМ}}.$$

#### 4.3.3 Потери активной энергии в высоковольтной кабельной линии

Потери энергии в высоковольтном кабеле в рассматриваемом режиме работы системы цехового электроснабжения рассчитываются по формуле подобной (4.17)

$$\Delta W_{кл.в/вj}^{III} = \frac{R_{уд.к} L_2}{U_{НОМ}^2} 10^{-3} \times$$

$$\times \sum_{i=1}^j \left[ \left( P_{н.цji} + 2\Delta P_{кл.н/вji}^{III} + \Delta P_{Tji}^{III} \right)^2 + \left( Q_{н.цji} + \Delta Q_{Tji}^{III} \right)^2 \right] \Delta t_{ji}.$$

Потери активной энергии в системе цехового электроснабжения в **ночную** смену суток

$$\Delta W_j^{III} = \Delta W_{кл.н/вj}^{III} + \Delta W_{Tj}^{III} + \Delta W_{кл.в/вj}^{III}.$$

Полученные в рассматриваемом варианте схемы питания результаты расчётов потерь активной энергии на участке системы цехового электроснабжения между сборными шинами 10 кВ ГПП и 0,4 кВ цеховых ТП в течение ночной смены суток занесите в табл. 4.11.

#### 5. Определение рациональной схемы передачи энергии к сборным шинам 0,4 кВ цеховых ТП.

Наиболее рациональные схемы передачи электроэнергии до сборных шин 0,4 кВ цеховых ТП в каждую отдельно взятую смену суток определяются по условию минимума потерь активной энергии в соответствующей смене.

С целью правильного решения данного вопроса и придания наглядности составьте сводную таблицу 4.12, форма которой приведена ниже и заполните её с использованием данных, приведенных в табл. 4.11.

### 6. Определение годовой экономии электроэнергии

Достигнутую экономию электроэнергии в течение года в результате принятых технических решений рассчитаем по формуле

$$\delta W_{\text{год}} = n_{\text{год}} \sum_{j=1}^3 (\Delta W_j^I - \Delta W_j^{\text{опт}}),$$

где  $n_{\text{год}}$  – число дней в году;  $\Delta W_j^I$  – потери активной энергии в  $j$ -ю смену суток при работе всех трёх трансформаторов;  $\Delta W_j^{\text{опт}}$  – потери активной энергии в  $j$ -ю смену, соответствующие оптимальной схеме передачи энергии.

Таблица 4. 12

Сводные данные о потерях активной энергии на участке системы электроснабжения между шинами 10 кВ ГПП и 0,4 кВ цеховых ТП

Число находящихся в работе трансформаторов	Потери активной энергии кВт·ч в интервалах времени суток		
	с 0 до 8 часов	с 8 до 16 часов	16 до 24 часов
1		–	–
2			
3			
Рекомендуемое к работе число трансформаторов			

### 7. Оформите отчёт.

#### Контрольные вопросы

С целью подготовки к защите лабораторной работы ответьте на следующие контрольные вопросы:

1. Что вы понимаете под экономической плотностью тока, и от чего она зависит?
2. Как определяются допустимые токи проводников в условиях, отличающихся от расчётных условий, учтённых при определении их значений, приводимых в ПУЭ и справочниках?
3. Кабель предполагается проложить в одной траншее с другими кабелями, находящимися под нагрузкой. Как этот фактор учитывается при выборе сечения кабелей?
4. Как определяется допустимый коэффициент перегрузки кабеля в послеаварийных режимах?

5. Как при выборе сечений кабелей учитывается реальный температурный режим окружающей среды?

6. Одна часть кабеля проложена в траншее, а другая – в лотках внутри цеха. Какой участок кабеля должен быть принят для проверки по допустимому нагреву и почему?

7. Какими факторами определяется минимальное термически стойкое сечение кабелей?

8. Как при проверке выбранного сечения кабеля на термическую стойкость учитывается температура его нагрева в предшествующем короткому замыканию режиме?

9. Запишите расчётные выражения, используя которые можно определить потери активной энергии в силовом трансформаторе при наличии графиков активной и реактивной нагрузок.

10. Какие факторы влияют на потери энергии в кабелях и почему? Обоснуйте свой ответ.

11. Как при проверке выбранного сечения кабеля на термическую стойкость учитывается часть теплового импульса, обусловленная апериодической составляющей тока короткого замыкания?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электротехника: Учебное пособие для вузов. – В 3-х книгах. Книга III. Электроприводы. Электроснабжение / Под ред. П.А. Бутырина, Р.Х. Гафиятуллина, А.Л. Шестакова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2005. – 639 с.
2. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. Ю.Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
3. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С.Д. Волобринский, Г.М. Каялов, П.Н. Клейн, Б.С. Мешель. – М.-Л.: Изд-во «Энергия», 1964. – 304 с.
4. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд., перераб. И доп. – М.: БЮРО ДИЗАЙН, 2003. – 726 с.
5. ГОСТ 18410-73. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 23 с.
6. Фёдоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
7. ГОСТ 14209-85. Трансформаторы силовые масляные общего назначения. Допустимые нагрузки (с изменением № 1). – М.: Стандартиформ, 2009.
8. Справочник по электроснабжению промышленных предприятий. В 2-х кн. Кн.1. Проектно-расчётные сведения. / Под общ. ред. А.А. Фёдорова и Г.В. Сербиновского. – М.: «Энергия», 1973. – 520 с.

# ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению лабораторных работ  
по дисциплине «Энергоснабжение»  
для студентов очного и заочного отделения,  
направления 27.03.02 Управление качеством

Составители:

Полуказаков Алексей Викторович

В авторской редакции

Подписано к изданию 03.06. 2021.

Объем данных

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, Московский проспект 14