

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Строительства, энергетики и транспорта

**Методические рекомендации к практическим работам**  
по дисциплине  
**«Моделирование информационных структур систем электроснабжения»**  
для всех форм обучения направления  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника (профиль Электроснабжение)

**Мурманск**  
**2021**

# ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

**Цель работы:** изучить и понять закономерности изменения показателей графиков электрических нагрузок в зависимости от режимов электропотребления.

### 1. Теоретические основы

#### 1.1. Общие сведения

В настоящее время для обработки информации в системах электроснабжения широкое распространение получают ПЭВМ. Они обладают широкими вычислительными возможностями, поэтому их применяют как для создания информационно-справочных систем и управления технологическими процессами, так и для индивидуального пользования, решения производственных, инженерных и учебных задач.

Главная задача ПЭВМ при решении задач систем электроснабжения сводится к автоматическому выполнению вычислительного процесса, т. к. ПЭВМ является лишь исполнителем алгоритма, записанного в виде программы на понятном для нее языке. Поэтому для решения любой задачи с использованием ПЭВМ необходимо подготовить алгоритм, выполнение которого привело бы к получению требуемых результатов. Заданная алгоритмом последовательность действий должна быть представлена в форме, доступной машине.

Графики нагрузки и способы их записи. Нагрузки, потребляемые из сети как отдельными ЭП, так и их группами, могут быть выражены в единицах мощности (P,Q,S) и тока.

Нагрузки подавляющего большинства электроприемников (ЭП) не остаются постоянными, они изменяются с течением времени. Ввиду очень большого разнообразия ЭП и бесконечного множества их комбинаций в группе эти изменения не могут быть выражены аналитически и обычно представляются в прямоугольной системе координат кривыми или ломаными линиями, называемыми **графиками нагрузки**. Из сказанного очевидно, что графики могут выражать изменение во времени активной, реактивной, полной мощности или тока. В зависимости от поставленной цели они могут быть сняты и построены для любого промежутка времени – часа, смены, суток, года. Применительно к отдельным ЭП, работающим в длительном режиме, наиболее распространены суточные или сменные графики, а в повторно-кратковременном режиме (ПКР) – цикловые (длительностью, равной одному или нескольким циклам). Режим работы групп ЭП лучше всего прослеживается по суточным или по сменным графикам.

Таким образом, общим математическим выражением любого графика нагрузки, например графика активной мощности  $P$ , будет  $P=f(t)$ , где  $t$  – время, отложенное по оси абсцисс.

В практике исследований режимов работы ЭП и их групп применяются различные способы измерений и построения графиков нагрузки: с помощью самопишущих приборов (амперметры, ваттметры, варметры), визуальный отсчет показаний стрелочных приборов через равные промежутки времени, отсчет показаний счетчиков активной и реактивной энергии через такие же интервалы времени. Выбор способа записи графика нагрузки зависит от цели исследования и ряда местных условий: требуемой мощности измерений, расположения ЭП, наличия щитовых приборов в его цепи, доступности ввода питающей ЭП линии для включения в нее измерительных трансформаторов тока, наличия места и т. п.

Значительная часть ЭП работает в ПКР. Если циклы имеют различную длительность, то в качестве осредненного можно принять график со средней длительностью цикла, равной  $t_{ц.с.}=T/N$ , где  $T$  – общая продолжительность  $N$  циклов.

Графики нагрузки, характеризующие режим работы отдельных ЭП, называют **индивидуальными**. Такие графики в условиях действующих установок снимают, как правило, лишь для крупных ЭП (мощностью в несколько десятков или сотен киловатт). Чаще приходится иметь дело с так называемыми **групповыми** графиками нагрузки, относящимися к группе ЭП, объединенных одной питающей линией (фидером).

Характер и форма индивидуального графика нагрузки ЭП определяются технологическим процессом. Групповой график представляет собой результат суммирования графиков отдельных ЭП, входящих в группу. Однако даже при одинаковых ЭП их групповой график может принимать различные очертания, в зависимости от ряда случайных факторов, обуславливающих сдвиги во времени работы отдельных ЭП.

При очень большом числе ЭП, входящих в группу, как это бывает в крупных цехах или на предприятиях в целом, суточный график активной мощности приобретает устойчивый характер. Длительные наблюдения за действующими предприятиями позволили составить характерные графики для различных отраслей промышленного производства. Такие графики обычно называют типовыми и строят их в относительных единицах, выражая нагрузки в разные часы суток в процентах от максимальной, принимаемой за 100%. Для пересчета ординат таких графиков в именованные единицы, например в киловатты, необходимо лишь определить абсолютную величину максимума.

Располагая ординаты суточного группового графика в порядке убывания и откладывая по оси абсцисс продолжительность работы при разных нагрузках, получим так называемую **упорядоченную диаграмму** группового графика. Упорядоченная диаграмма нагрузок, построенная по суточным графикам, характерным для рабочих и выходных дней различных сезонов (зимнего, весенне-осеннего и летнего) образует **годовой график**

**нагрузки по продолжительности.** Очевидно, что для суточных и годового графиков активной мощности их площадь выражает расход энергии в киловатт-часах за соответствующий период (сутки, год).

## 1.2. Основные физические величины, характеризующие графики нагрузки

Рассмотрим график электрических нагрузок, приведенный на рисунке 1.1. **Средняя нагрузка** за интервал заданной длительности  $\theta$  выражается формулой (применительно к групповому графику активной мощности)

$$P_{c\theta} = \frac{1}{\theta} \int P(t)dt,$$

где  $P(t)$  – текущее значение ординат группового графика нагрузки. Аналогичными формулами могут быть представлены полная и реактивная мощности, а также ток.

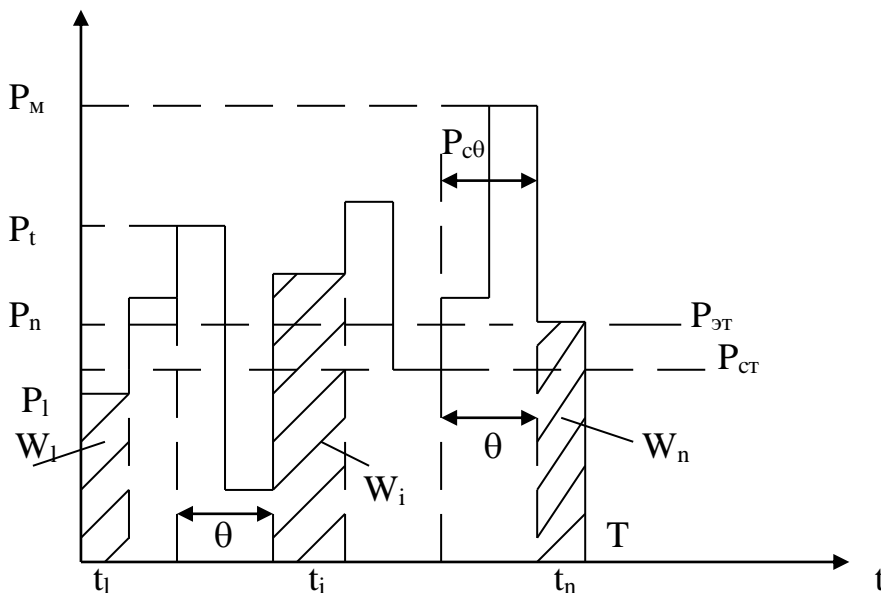


Рисунок - 1.1. Средняя нагрузка за скользящий интервал времени

**Среднеквадратическая нагрузка** за некоторый интервал времени определяется выражением

$$P_{эТ} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [P(t)]^2 dt} .$$

Среднеквадратическая нагрузка характеризует эффект нагрева проводника током. Поэтому ее часто называют **эффективной** нагрузкой (отсюда индекс “э” в символе среднеквадратичной нагрузки).

Под **максимальной нагрузкой** подразумевается абсолютный максимум фактического, индивидуального или группового графика. Представление о величине максимальной нагрузки неразрывно связано с

условной продолжительностью максимума, равной интервалу осреднения. Общим обозначением максимума активной нагрузки при интервале осреднения, равном  $\theta$ , будет  $P_{\theta 60}$  – так называемой  $\theta$ -максимум, например, тридцатиминутный  $P_{30}$  или часовой  $P_{60}$ . Максимумы, как и сами графики, могут выражать активную, реактивную, полную мощность или ток.

### 1.3. Показатели графиков электрических нагрузок

В теории электрических нагрузок и ее практических приложениях удобно пользоваться, кроме именованных значений физических величин нагрузок, максимальной, средней и среднеквадратичной, также некоторыми относительными показателями (коэффициентами), характеризующими режим работы отдельных ЭП и их групп. Как и для ранее рассмотренных величин, в обозначениях этих показателей используются буквы латинского алфавита: строчные – для отдельных ЭП и их индивидуальных графиков, прописные – применительно к групповым графикам.

1. Расход энергии (по рисунку 1.1.)

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n P_i t_i.$$

2. Средняя мощность

$$P_c = \sum_{i=1}^n W_i / \sum_{i=1}^n t_i.$$

3. Среднеквадратическая мощность

$$P_{ск} = P_{эТ} = \sqrt{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i / \sum_{i=1}^n t_i}.$$

4. Основным показателем режима работы одного или группы ЭП служит **коэффициент использования**, выражающий отношение средней нагрузки ( $p_c$  и  $P_c$ ) к номинальной ( $p_n$  и  $P_n$ ).

$$k_{и} = p_c / p_n; \quad K_{и} = P_c / P_n = \frac{\sum_{i=1}^n p_{ci}}{P_n} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ui} p_{ni}}{P_n},$$

где  $P_n$  – номинальная активная мощность группы ЭП.

5. Степень использования ЭП по времени характеризуется **коэффициентом включения**. Применительно к одному ЭП этот показатель аналогичен понятию продолжительности включения ПВ:

$$K_B = t_B / (t_B + t_{П}) = t_B / T_{ц} \leq 1.$$

**Групповым коэффициентом включения**  $K_B$  называется средневзвешенное по активной мощности значение индивидуальных коэффициентов включения электроприемников, входящих в группу, т.е.

$$K_B = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ei} P_{ni}}{\sum_{i=1}^n P_{ni}} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ei} P_{ni}}{P_n} \leq 1 .$$

В отличие от индивидуального, понятия группового коэффициента включения лишено четкого физического смысла и используется лишь в качестве расчетной величины.

6. **Коэффициент загрузки** отдельного ЭП определяется как отношение средних за время включения активной, реактивной мощности и тока и их номинальным величинам:

$$P_{c.v.} = p_c \frac{t_e}{T_u} = \frac{P_c}{k_e} .$$

Тогда коэффициент загрузки по активной мощности будет

$$k_z = p_{c.v.} / p_n = p_c / (k_e p_n) = k_u / k_e .$$

7. **Коэффициент формы графика нагрузки** – это отношение среднеквадратичной (эффективной) нагрузки к средней за данный период времени:

$$k_\phi = p_\phi / p_c; \quad K_\phi = P_\phi / P_c \geq 1 .$$

Аналогичные выражения могут быть написаны для графиков реактивной мощности и тока. Величина коэффициента формы характеризует неравномерность графика. Наименьшее значение этого коэффициента, равное единице, соответствует неизменной во времени нагрузке.

8. Важнейшими расчетными показателями групповых графиков являются **коэффициент максимума** по активной мощности  $K_M$ . Эти коэффициенты представляют собой отношение максимума той или иной продолжительности к соответствующей средней нагрузке той же продолжительности, т.е.

$$K_M = P_M / P_c, \quad P_M = K_M P_c .$$

9. Обратной величиной для коэффициента максимума  $K_M$  является коэффициент заполнения (коэффициент загрузки) группового графика

$$K_z = \frac{P_c}{P_M} \leq 1 \quad \rightarrow \quad K_z = \frac{1}{K_M}$$

Своего предельного значения, равного единице, этот показатель достигает лишь при не изменяющейся во времени нагрузке, чего практически не бывает.

10. Другой, не менее важной величиной, особенно при обследованиях действующих предприятий и групп потребителей, является коэффициент спроса по активной мощности  $K_c$ . Этот коэффициент связывает максимум той или иной продолжительности не по средней, а с номинальной мощностью группы ЭП.

$$P_M = K_c P_m \rightarrow K_M = K_c \frac{P_H}{P_c} = \frac{K_c}{K_i} \rightarrow K_c = K_i K_M.$$

11. Число часов использования максимума

$$T_{и} = \sum_{i=1}^n W_i / P_M.$$

Построение годовых графиков по продолжительности на основе суточных, анализ и расчет их показателей требуют внимания и тщательности при выполнении большого объема однотипных вычислений. Поэтому применение ПЭВМ для расчета показателей графиков электрических нагрузок дает значительный выигрыш во времени и обеспечивает более высокую надежность получаемых результатов по сравнению с ручным счетом.

## 2. Задание для самостоятельной работы

- 2.1. Рассчитать с помощью ПЭВМ по одному из заданных вариантов показатели обобщенных графиков электрических нагрузок.
- 2.2. На основе исследования различных графиков электрических нагрузок, приведенных ниже, определить параметры, от которых изменяются средняя мощность  $P_c$ , среднеквадратичная мощность  $P_{ск}$ , коэффициенты  $K_{зап}$ , максимума  $K_M$ , формы  $K_f$ .
- 2.3. Рассчитать показатели суточных графиков и обобщенных годовых графиков электрических нагрузок.
- 2.4. Распечатать с помощью принтера полученные результаты.
- 2.5. Оформить отчет, сделать выводы и ответить на контрольные вопросы.

## 3. Контрольные вопросы

1. Чем вызвана необходимость построения графиков электрических нагрузок
2. Что представляет собой график электрических нагрузок ?
3. Чем вызвана нелинейность графика электрических нагрузок ?
4. Каковы способы построения графика электрических нагрузок и в каких точках схемы электроснабжения устанавливают измерительные приборы ?
5. Для чего строят суточные графики электрических нагрузок ?

6. Что такое годовой график нагрузки по продолжительности ?
7. Перечислите основные показатели графиков электрических нагрузок.
8. Каков физический смысл основных показателей графика электрических нагрузок ?
9. Чем отличаются групповые показатели от индивидуальных ?
10. Укажите на годовом графике нагрузки по продолжительности число часов использования максимума.
11. Укажите диапазоны изменения основных показателей графиков электрических нагрузок. Какие из названных интервалов являются предпочтительными с точки зрения эффективности работы ЭП ?

## 4. Варианты графиков нагрузок для самостоятельной работы

### 4.1 Суточные графики электрических нагрузок

*Таблица 1 – Исходные данные по вариантам*

№	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7
1	40	20	50	10	20	30	30	30	10	70	40	10	30	10
2	60	50	70	20	10	30	50	20	80	90	20	90	100	40
3	100	50	40	70	50	60	20	50	80	90	30	100	40	20
4	70	20	100	50	100	60	100	40	40	80	20	90	60	80
5	50	20	90	70	80	100	100	80	60	50	100	80	40	20
6	40	40	100	50	70	40	80	80	100	40	30	20	90	20
7	70	50	80	40	20	10	70	100	100	100	20	20	100	90
8	80	40	60	70	20	10	40	50	80	60	40	70	40	60
9	100	50	10	60	70	10	70	70	30	20	100	40	70	60
10	30	100	20	90	100	20	100	100	70	60	30	10	100	30
11	20	60	10	100	60	20	60	50	60	60	100	80	70	90
12	50	60	30	80	80	80	80	40	90	60	50	40	50	100
13	50	80	60	50	60	100	50	40	20	10	100	30	40	60
14	60	100	30	20	20	100	50	60	20	80	60	10	90	10
15	80	80	60	80	40	90	70	60	30	100	60	50	60	70
16	100	70	20	50	100	70	50	90	60	20	10	60	70	60
17	70	100	30	60	80	50	70	50	20	10	30	90	90	50
18	70	100	60	100	100	50	50	60	30	20	40	30	80	100
19	50	70	70	60	60	40	30	50	90	60	30	90	90	60
20	30	20	70	80	20	60	50	30	90	90	50	40	40	30
21	20	20	70	40	50	100	60	80	50	60	100	70	80	50
22	20	20	80	60	30	100	20	30	20	100	20	100	30	70
23	30	30	60	30	20	70	50	50	20	60	20	30	30	20
24	40	30	30	50	10	60	10	60	60	90	80	80	70	40

Примечание. Продолжительность каждой ступени графика – 1ч



## 4.2 Годовые графики электрических нагрузок предприятий

Таблица 2 (вариант1) - Предприятия черной металлургии

N	1	2	3	4	5	6	7
P, %	100	97	95	90	85	75	70
Q, %	100	97	95	90	87	85	83
t, ч	720	700	400	630	490	480	570

Таблица 3 (вариант2) - Предприятия цветной металлургии

N	1	2	3	4	5	6
P, %	100	97	95	100	93	84
Q, %	100	100	98	80	98	92
t, ч	450	350	630	550	600	530

Таблица 4 (вариант3) - Предприятия добычи угля

N	1	2	3	4	5	6
P, %	100	95	90	85	80	78
Q, %	100	97	95	94	90	85
t, ч	540	400	700	460	500	460

Таблица 5 (вариант4) - Торфяные предприятия

N	1	2	3	4	5	6	7
P, %	100	94	90	90	85	70	5
Q, %	100	96	95	93	92	92	15
t, ч	540	260	390	550	610	260	560

Таблица 6 (вариант5) - Предприятия тяжелого машиностроения

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P, %	100	97	80	75	73	72	70	68	67
Q, %	100	95	90	85	83	82	80	78	75
t, ч	680	350	350	565	610	610	420	615	680

Таблица 7 (вариант 6) - Предприятия станкостроительной промышленности

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P, %	100	100	100	90	90	80	62	50	50	50	45	45
Q, %	100	93	90	90	85	80	80	75	70	45	45	40
t, ч	525	260	350	230	350	950	525	610	610	350	350	440

Таблица 8 (вариант7) - Предприятия транспортного машиностроения

N	1	2	3	4	5	6	7
P, %	100	90	85	65	87	55	30
Q, %	100	95	90	80	70	65	35
t, ч	525	650	600	700	560	610	350

Таблица 9 (вариант 8) - Предприятия химической промышленности

N	1	2	3	4	5	6
P, %	100	95	85	75	45	37
Q, %	100	97	90	68	65	35
t, ч	600	650	550	680	700	520

Таблица 10 (вариант9) - Ремонтно – механические предприятия

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P, %	100	95	90	85	80	75	65	55	50	35	20	5
Q, %	100	97	95	93	90	85	85	75	70	57	30	22
t, ч	660	350	580	700	700	660	350	350	350	500	500	660

Таблица 11 (вариант 10) – Предприятий автомобильной промышленности

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P, %	100	96	94	88	82	78	74	77	75	60	78	90
Q, %	100	90	90	80	75	68	65	60	70	52	65	74
t, ч	475	440	560	610	580	450	650	700	350	450	600	540

Таблица 12 (вариант 11) –  
Предприятия целлюлозно–бумажной промышленности

N	1	2	3	4	5	6	7	8
P, %	90	65	100	75	80	45	65	70
Q, %	82	50	90	68	72	38	56	61
t, ч	400	560	450	560	620	480	670	450

Таблица 13 (вариант 12) – Прядильные и ткацкие фабрики

N	1	2	3	4	5	6	7	8
P, %	76	78	60	90	30	20	45	50
Q, %	65	67	52	81	22	16	36	44

t, ч	340	400	290	560	320	400	350	420
------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

### РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

**Цель работы:** освоить методику расчета токов короткого в промышленных электросетях.

### 1. Задание для самостоятельной работы

Промышленное предприятие получает электрическую энергию от энергосистемы ограниченной мощности и ТЭЦ с двумя турбогенераторами (рисунок 2). Требуется рассчитать:

- 1) периодическую составляющую тока  $I''$  в начальный момент трехфазного короткого замыкания (КЗ) в заданных точках схемы;
- 2) определить ударный ток  $\dot{I}_y$  и наибольшее действующее значение полного тока КЗ  $I_y$  в тех же точках.

*Исходные данные по вариантам приведены в таблицах 14 – 18.*

Выключатели, номера которых для заданного варианта не указаны (по таблице 14) – выключены.

Точки короткого замыкания К2 и К4 считать расположенными в середине линии.

Удельное индуктивное сопротивление линий электропередачи принимается равным 0,4 Ом/км.

*По заданию преподавателя расчеты могут выполняться в относительных или именованных единицах.*

### 2. Методические указания к выполнению задания

Для выполнения задания, рекомендуется следующий порядок расчета токов при трехфазном замыкании:

- а) по расчетной схеме (рисунок 2) составить схему замещения;
- б) привести схему замещения к наиболее простому виду;
- в) по закону Ома определить начальное значение периодической составляющей тока КЗ  $I''$ , затем ударный ток  $\dot{I}_y$  и наибольшее действующее значение полного тока КЗ  $I_y$ .

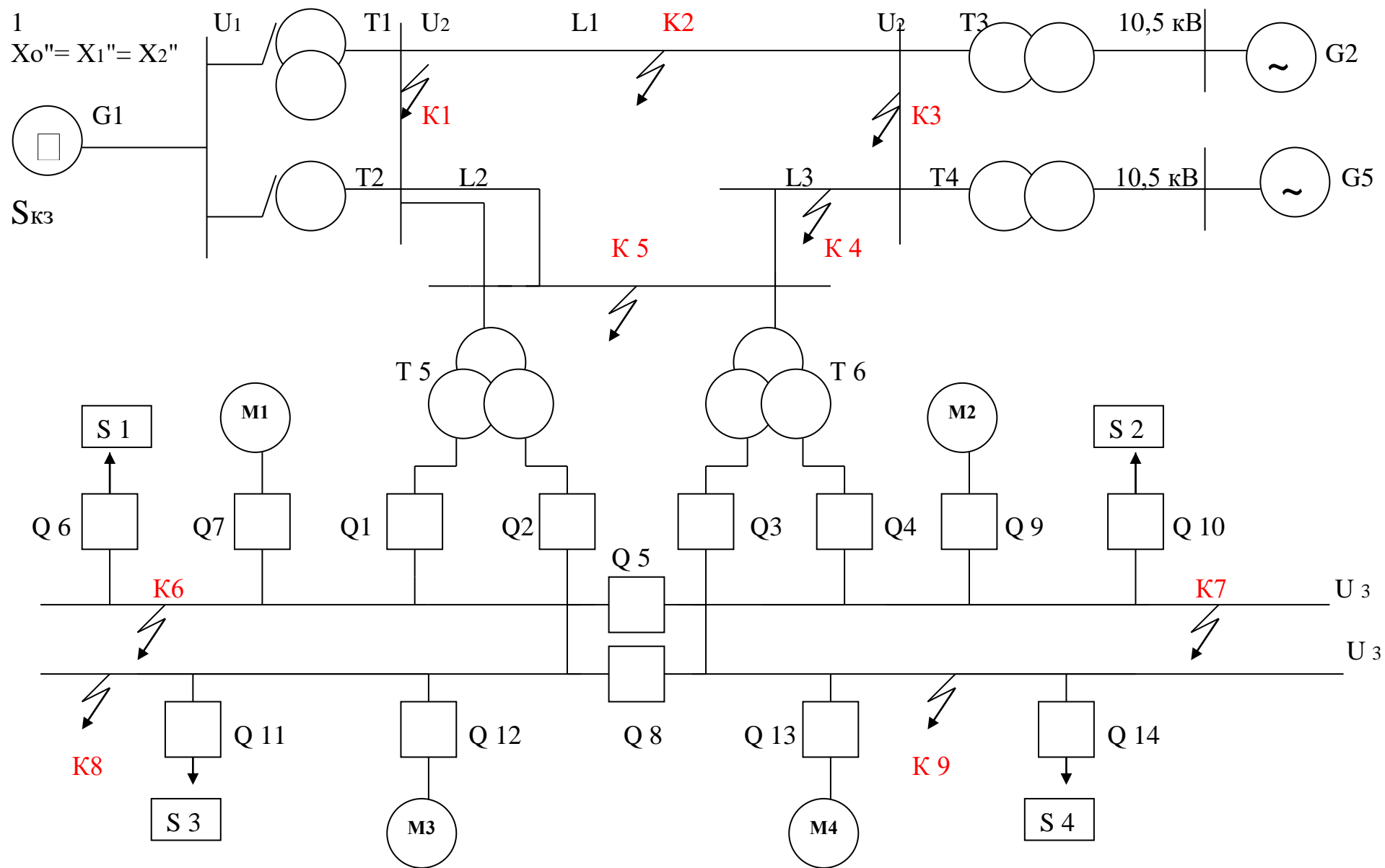


Рисунок 2 – Расчетная схема электроснабжения промышленного предприятия

## 2.1 Составление схемы замещения

Схема замещения составляется для каждой расчетной точки КЗ.

В схеме замещения, составленной по расчетной схеме, трансформаторные связи заменяются электрическими. Элементы расчетной схемы, связывающие систему и генераторы, с местом КЗ, вводят в схему замещения сопротивлениями, а саму систему и генераторы - сопротивлениями и ЭДС. Сопротивления и ЭДС схемы замещения должны быть приведены к одной расчетной ступени напряжения в точке КЗ

$$\dot{E}'' = E'' (U_{\text{ср}} / U_б) ; \quad X'' = X'' (U_{\text{ср}} / U_б)^2,$$

где  $\dot{E}''$  и  $X''$  – соответственно приведенные значения ЭДС и сопротивления,  $U_{\text{ср}}$  – среднее напряжение ступени, с которой производится пересчет на базовое напряжение  $U_б$ .

## 2.2 Определение сопротивлений элементов схемы замещения

Сопротивления всех элементов схемы замещения следует привести к базовым единицам, за базовую мощность  $S_б$  рекомендуется принять 100 или 1000 МВ • А. За базовое напряжение  $U_б$  принимается среднее напряжение  $U_{\text{ср}}$  в соответствующей точке КЗ по шкале 6,3; 10,5; 37; 115; 230; 340 кВ.

Расчетные выражения сопротивление приведены в таблице 19.

## 2.3 Преобразование схемы замещения

С помощью преобразований схема замещения упрощается и приводится к наиболее простому виду (рисунок № 3).

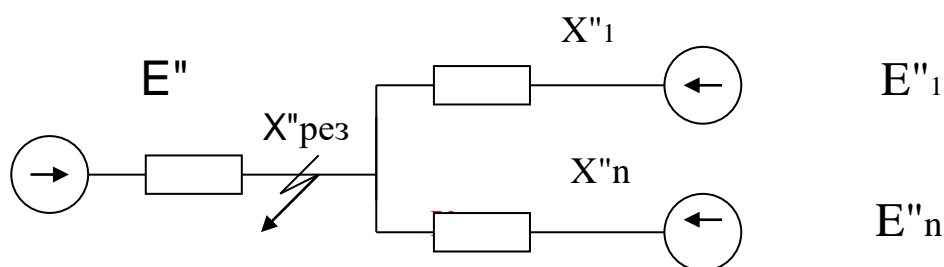


Рисунок – 3 Окончательная схема замещения для расчета токов КЗ

### **Основные пути упрощения схемы замещения:**

а) замена параллельно, последовательно или смешанно включенных сопротивлений элементов одним эквивалентным;

б) преобразование «треугольника» в эквивалентную «звезду» и наоборот;

в) замена двух или нескольких источников питания одним эквивалентным.

При упрощении схемы замещения следует придерживаться определенной последовательности операций. Преобразование схемы замещения выполняется в направлении от источников питания к месту КЗ.

Каждому сопротивлению схемы замещения присваивается определенный номер, который сохраняется до конца расчета. Номер сопротивления и его численной значение проставляются около соответствующего символа в виде дроби: числитель – номер сопротивления, знаменатель – его численной значение в относительных или именованных единицах.

Полученная путем окончательного преобразования схема замещения (рисунок 3) содержит несколько генерирующих ветвей: от системы, от ТЭЦ, от синхронных и асинхронных двигателей, от общей нагрузки.

## 2.4 Определение начального значения периодической составляющей тока КЗ

Начальное значение периодической составляющей тока КЗ определяют отдельно для каждой генерирующей ветви по формулам:

$$I''_i = (E''_i / X''_i) I_б, \text{ кА}$$

где  $E''_i$  – начальное значение ЭДС генерирующей ветви;  $X''_i$  – индуктивное сопротивление генерирующей ветви;  $I_б$  – базовый ток, кА:

$$I_б = \bar{S}_б / \sqrt{3} U_б,$$

где  $\bar{S}_б$  – базовая мощность, МВ·А;  $U_б$  – базовое напряжение, кВ.

При этом принимают следующие значения ЭДС  $E''_{отн}$ , выраженные в относительных единицах, приведенных к номинальным условиям:

- а) для системы  $E''_{отн} = 1,0$ ;
- б) для турбогенераторов  $E''_{отн} = 1,08$ ;
- в) для синхронных двигателей  $E''_{отн} = 1,1$ ;
- г) для асинхронных двигателей  $E''_{отн} = 0,9$ ;
- д) для обобщенной нагрузки  $E''_{отн} = 0,85$ .

Результирующая ЭДС  $E''_{отн \text{ рез}}$  отдельных источников питания находят по формуле:

$$E''_{\text{отн рез}} = \left( \sum_{i=1}^n E''_{\text{отн } i} / X_{i \text{ отн}} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n 1 / X_{i \text{ отн}} \right),$$

где  $X_{i \text{ отн}}$  - приведенное сопротивление генерирующей ветви.

Суммарное значение периодической составляющей определяют по формуле:

$$I'' = \sum_{i=1}^n I''_i$$

## 2.5 Определение ударного тока КЗ

В разветвленной схеме с несколькими генерирующими ветвями ударный ток КЗ определяют по выражению:

$$\dot{i}_y = \sum_{i=1}^n \dot{i}_{y i},$$

где  $\dot{i}_{y i}$  – ударный ток КЗ в отдельной генерирующей ветви.

Для каждой генерирующей ветви ударный ток КЗ находят из условия:

$$\dot{i}_y = \overline{K}_y \sqrt{2} I'',$$

- 0,01/Ta

где  $K_y$  – ударный коэффициент,  $\overline{K}_y = 1 + e^{-0,01/Ta}$ ,

где  $T_a$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ, с.

Для генерирующих ветвей от асинхронных двигателей  $K_y$  определяют по выражению:

$$\overline{K}_y = 1 + e^{-0,01/Tn} + e^{-0,01/Ta},$$

где  $T_n$  – постоянная времени затухания периодической составляющей силы тока, с.

## 2.6 Определение наибольшего действующего значения тока КЗ

В разветвленной схеме наибольшее действующее значение тока КЗ  $I_y$  определяется арифметической суммой в отдельных ветвях  $I_{y i}$ :

$$I_y = \sum_{i=1}^n I_{yi} .$$

Общее выражение для отдельной генерирующей ветви:

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2 (K_y - 1) } .$$

Для генерирующих ветвей от асинхронных двигателей:

$$I_y = I'' \sqrt{\left( e^{-0,01/Tn} \right)^2 + \left( e^{-0,01/Ta} \right)^2}$$

### *Литература*

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – М.: КноРус, 2013. – 278 с. ил.
2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии. – М.: КноРус, 2015. – 724 с. ил.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013. – 672 с. ил.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013. – 672 с. ил.
5. Шаров Ю.В. Электроэнергетика. – М.: Инфра-М, 2015. – 384 с. ил.
6. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: Учебное пособие. – М.: Инфра-М, 2015. – 376 с. ил.
7. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. – М.: Инфра-М, 2013. – 271 с. ил.
8. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: Учебник. – М.: Инфра-М, 2015. – 416 с. ил.
9. Сибикин Ю.Д. Технология энергоснабжения: Учебник – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Форум, 2015. – 352 с. ил.
10. Сибикин Ю.Д. Электрические подстанции. – М.: РадиоСофт, 2014. – 141 с. ил.
11. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии/ под ред. В.В. Денисова. – М.: Феникс, 2015. – 382 с. ил.
12. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: Академия, 2013. – 193 с. ил.
13. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.: КноРус, 2015. – 240 с. ил.
14. Важов В.Ф. Техника высоких напряжений: Учебник. – М.: Инфра-М, 2015. – 264 с. ил.



15. Ушаков В.Я. Электроэнергетические системы и сети. – М.:Юрайт, 2015. – 446 с. ил.
16. Климова Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. 2-е изд. – М.:Юрайт, 2015. – 179 с. ил.
17. Бачаров Ю.Н. Техника высоких напряжений. – М.:Юрайт, 2015. – 264 с. ил.
18. Хрущев Ю.В. Электроэнергетические системы и сети. Электрические переходные процессы. – М.:Юрайт, 2015. – 153 с. ил.
19. Исмагилов Ф.Р. Основные вопросы проектирования воздушных линий электропередач: Учебное пособие. – М.:Машиностроение, 2015. – 211 с. ил.
20. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения. – СПб.:Лань, 2013. – 432 с. ил.
21. Почаевец В.С. Электрические подстанции: Учебник. – М.:Маршрут, 2012. – 492 с. ил.

## Приложение 1

Таблица 14 – Исходные данные

№ варианта	Точки КЗ	$S_{кз},$ МВ•А	$U_1 / U_2 / U_3,$ кВ	$L_1 / L_2 / L_3,$ кМ	Номера выключателей Q, находящихся во включенном состоянии
1	1 4 6	4500	330 / 220 / 10	120 / 140 / 100	1, 4, 5, 6, 7, 9
2	2 5 7				
3	3 2 6				
4	4 3 7				
5	5 1 6				
6	1 5 8	2500	220 / 110 / 6	40 / 60 / 50	2, 5, 8, 11, 12, 13, 14
7	2 4 8				
8	3 1 9				
9	4 2 8				
10	5 3 9				
11	1 2 6	4000	330 / 220 / 6	100 / 170 / 80	1, 4, 5, 7, 9, 10
12	2 3 7				
13	3 4 6				
14	4 5 7				
15	5 1 6				
16	1 2 8	2000	220 / 110 / 10	60 / 50 / 30	2, 3, 8, 12, 13, 14
17	2 3 9				
18	3 4 8				
19	4 5 8				
20	5 1 9				
21	1 3 6	3500	330 / 110 / 6	70 / 80 / 40	1, 4, 5, 6, 7, 9, 10
22	2 4 7				
23	3 5 6				
24	4 1 7				
25	5 2 6				
26	1 4 9	3000	330 / 110 / 10	40 / 60 / 50	2, 3, 8, 11, 12, 13
27	1 4 8				
28	3 2 9				
29	4 5 9				
30	5 1 8				

Таблица 15 – Автотрансформаторы Т1 и Т2

№ варианта	$S_H$ обмоток, МВ·А			$U_H$ обмоток, кВ			$U_K$ между обмотками, %		
	В	С	Н	В	С	Н	В - С	В - Н	С - Н
1 – 5	240	240	-	330	242	11	9,6	74	60
6 – 10	200	200	-	230	121	6,6	11	32	20
11 – 15	240	240	-	330	242	11	7,3	70	60
16 – 20	125	125	-	230	121	6,6	11	45	28
21 – 25	200	200	-	330	115	10,5	10	34	22,5
26 – 30	125	125	-	330	115	6,3	10	35	24

Таблица – 16 Генераторы G2 и G3, трансформаторы Т3 и Т4

№ варианта	Генераторы G2 и G3			Трансформаторы Т3и Т4	
	$P_H$ , МВт	$\cos \varphi$	$X''d$ , %	$S_H$ , МВ·А	$U_K$ , %
1 – 10	60	0,8	19,5	63	10,5
11 – 20	63	0,8	18	63	10,5
21 - 30	100	0,8	19,1	125	10,5

Таблица 17 – Трансформаторы Т5 и Т6

№ варианта	$S_H$ , МВ·А	$U_K$ , %	№ варианта	$S_H$ , МВ·А	$U_K$ , %
1 – 5	40	12	16 – 20	40	10, 5
6 – 10	125	10,5	21 – 25	63	10, 5
11 - 15	63	12	26 - 30	80	10, 5

Таблица 18 – Электрические нагрузки

№ варианта	Асинхронные двигатели М1 и М3			Синхронные двигатели М2 и М4			Обобщенная нагрузка, МВ·А			
	$P_H$ , МВт	$\cos \varphi$	$I_p / I_H$	$P_H$ , МВт	$\cos \varphi$	$X''d$ , %	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
1 – 5	3,2	0,86	5,2	4	0,9	14,3	10	20	20	10
6 – 10	8	0,92	5,6	10	0,93	12,6	50	60	40	50
11 – 15	4	0,87	5,3	6,3	0,89	15,2	20	30	10	40
16 – 20	2,5	0,85	5	4	0,95	14,3	20	10	10	20
21 – 25	3,2	0,86	5,2	5	0,87	13,7	30	10	20	20
26 - 30	5	0,9	5,4	8	0,92	14,5	40	50	20	30

Таблица 19 – Расчетные выражения для определения сопротивлений схемы замещения

Элемент схемы	Исходный параметр	Именованные единицы, Ом	Относительные единицы
Система	$S_{кз}$	$X'' = U_{б}^2 / S_{кз}$	$X''_{отн} = S_{б} / S_{кз}$
Генератор	$S_H, X''_d, \%$	$X'' = (X''_d \% / 100) \cdot (U_{б}^2 / S_H)$	$X''_{отн} = (X''_d \% / 100) \cdot (S_{б} / S_H)$
Автотрансформатор	$U_{к\text{ в-с}}, \%, S_H$	$X'' = (U_{к\text{ в-с}} \% / 100) \cdot (U_{б}^2 / S_H)$	$X''_{отн} = (U_{к\text{ в-с}} \% / 100) \cdot (S_{б} / S_H)$
Трансформатор	$U_{к}, \%, S_H$	$X'' = (U_{к} \% / 100) \cdot (U_{б}^2 / S_H)$	$X''_{отн} = (U_{к} \% / 100) \cdot (S_{б} / S_H)$
Трансформатор с расщепленной обмоткой	$U_{кВ}, \%, U_{кН1}, \%, U_{кН2}, \%, S_H$	$X'' = (U_{кВ} \% + U_{кН} \% ) / 100) \cdot (U_{б}^2 / S_H)$	$X''_{отн} = (U_{кВ} \% + U_{кН} \% ) / 100) \cdot (S_{б} / S_H)$
ЛЭП	$X_o, L$	$X'' = (X_o L) \cdot (U_{б}^2 / U_{ср}^2)$	$X''_{отн} = (X_o L) \cdot (S_{б} / U_{ср}^2)$
Асинхронный двигатель	$I_{п} / I_{н}, S_H$	$X'' = (I_{п} / I_{н}) \cdot (U_{б}^2 / S_H)$	$X''_{отн} = (I_{п} / I_{н}) \cdot (S_{б} / S_H)$
Синхронный двигатель	$X''_d, \%, S_H$	$X'' = (X''_d \% / 100) \cdot (U_{б}^2 / S_H)$	$X''_{отн} = (X''_d \% / 100) \cdot (S_{б} / S_H)$
Обобщенная нагрузка	$S_H$	$X'' = 0,35 (U_{б}^2 / S_H)$	$X''_{отн} = 0,35 (S_{б} / S_H)$

