

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

С. Г. Обухов

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД
Лабораторный практикум

Издательство
Томского политехнического университета
2018

УДК 532.5(076.5)+62–135(076.5)
ББК 22.253.3+31.363я73
О–266

Обухов С.Г.

О–266 Электроснабжение и электрический привод.

Лабораторный практикум: методические указания / С.Г.Обухов. Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. – 47 с.

Методические указания предназначены для подготовки к лабораторному практикуму студентов, изучающих дисциплину «Электроснабжение и электрический привод». Методические указания содержат необходимые теоретические сведения, описание методики проведения и обработки результатов экспериментов по 4 лабораторным работам из основных разделов изучаемой дисциплины.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроэнергетические системы и сети».

УДК 532.5(076.5)+62–135(076.5)
ББК 22.253.3+31.363я73

Рецензенты:

Заместитель генерального директора по техническим вопросам –
главный инженер ОАО «Томскнефтепродукт ВНК»
Шкарпетин Н.Н.

Ведущий инженер проектного офиса №1 ОАО «ТомскНИПИнефть»
Жуков М.А.

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2018
© Обухов С.Г., 2018
© Обложка. Издательство Томского
политехнического университета, 2018

Содержание:

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЦЕХА.....	4
1.1 Краткие теоретические сведения	4
1.2 Методические указания.....	9
1.3 Требования к отчету	13
1.4 Контрольные вопросы	13
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ВЫБОР СЕЧЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ И АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ДО 1000 В.....	17
2.1 Краткие теоретические сведения	17
2.1.1 Выбор автоматических выключателей.....	17
2.1.2 Определение пикового тока группы электроприемников.	20
2.1.3 Выбор сечений цеховых электрических сетей	21
2.2 Методические указания.....	23
2.3 Требования к отчету	24
2.4 Контрольные вопросы	24
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТИ ДО 1000 В	26
3.1 Краткие теоретические сведения	26
3.2 Методические указания	34
3.3 Требования к отчету.....	36
3.4 Контрольные вопросы.....	36
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ПОТЕРЮ НАПРЯЖЕНИЯ	37
4.1 Краткие теоретические сведения	37
4.2 Методические указания.....	44
4.3 Требования к отчету	45
4.4 Контрольные вопросы	46

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ЦЕХА

Цель работы – определение расчетной электрической нагрузки цеха методом коэффициента расчетной активной мощности.

1.1 Краткие теоретические сведения

С 1993 г. основным и обязательным нормативным документом по определению электрических нагрузок промышленных предприятий является РТМ 36.18.32.4-92.

В основу РТМ положен модифицированный статистический метод, базирующийся на нормальном законе распределения.

Расчет электрических нагрузок электроприемников напряжением до 1 кВ выполняется по форме Ф636-92 (рис. 1.1) и производится для каждого узла питания (распределительного пункта, распределительного или магистрального шинопровода, цеховой трансформаторной подстанции), а также по цеху, корпусу в целом.

Исходные данные					Расчетные величины			
по заданию технологов				по справочным данным				
Наименование ЭП	Количество ЭП, шт. n	Номинальная (установленная) мощность, кВт		Коэффициент использования K_n	Коэфф. реактивной мощности $\cos\varphi/\text{tg}\varphi$			
		одного ЭП p_n	общая $P_n = n \cdot p_n$			$K_n \cdot P_n$	$K_n \cdot P_n \text{tg}\varphi$	$n \cdot p_n^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Эффективное число ЭП, n_3	Коэффициент расчетной нагрузки K_p	Расчетная мощность			Расчетный ток, А
		активная, кВт $P_p = K_p \sum K_n P_n$	реактивная, квар. $Q_p = 1.1 \sum K_n P_n \text{tg}\varphi$ при $n_3 \leq 10$; $Q_p = \sum K_n P_n \text{tg}\varphi$ при $n_3 > 10$	полная, кВ·А	
10	11	12	13	14	15

Рис. 1.1 Форма Ф636-92 для расчета электрических нагрузок методом коэффициента расчетной активной мощности

Расчет электрических нагрузок методом коэффициента расчетной активной мощности выполняется в следующей последовательности:

1. Исходные данные для расчета заносятся в графы 1 – 6. Графы (1– 4) заполняются на основании полученного задания на проектирование (графы 5, 6) – согласно справочным материалам. Все электроприемники (ЭП) группируются по характерным категориям с одинаковыми коэффициентами использования $K_{и}$ и реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ ($\cos\varphi$). Значения коэффициентов использования $K_{и}$ и реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ ($\cos\varphi$) для характерных групп электроприемников определяются по справочникам. При наличии в справочных материалах интервальных значений $K_{и}$ следует для расчета принимать наибольшее значение. В каждой строке указываются ЭП одинаковой мощности. При этом резервные ЭП в расчете не учитываются, а номинальная мощность электродвигателей с повторно-кратковременным режимом работы не приводится к длительному режиму ($\text{ПВ} = 100 \%$).

2. Для каждой характерной группы электроприемников в графах 7 и 8 соответственно записываются построчно величины $K_{и}P_{н}$ и $K_{и}P_{н}\text{tg}\varphi$. В итоговой строке определяются суммы этих величин: $\sum K_{и}P_{н}$ и $\sum K_{и}P_{н}\text{tg}\varphi$.

Средневзвешенный (групповой) коэффициент использования для данного узла питания определяется по формуле:

$$K_{и.гр.} = \frac{\sum K_{и} \cdot P_{н}}{\sum P_{н}} \quad (1.1)$$

Значение $K_{и.гр.}$ заносится в графу 5 итоговой строки.

3. Для последующего определения эффективного числа электроприемников $n_{э}$ в графе 9 построчно определяются для каждой характерной группы электроприемников одинаковой мощности величины $nP_{н}^2$ и в итоговой строке – их суммарное значение $\sum nP_{н}^2$.

Эффективным числом электроприемников называется такое число однородных по режиму работы электроприемников одинаковой мощности, которое обуславливает те же значения расчетной нагрузки, что и группа различных по мощности электроприемников.

Эффективное число электроприемников определяется по формуле:

$$n_{э} = \frac{(\sum P_{н})^2}{\sum P_{н}^2 \cdot n} \quad (1.2)$$

Найденное по формуле (1.2) значение $n_э$ округляется до ближайшего меньшего целого числа.

При значительном числе ЭП (магистральные шинопроводы, шины цеховых трансформаторных подстанций, в целом по цеху, корпусу, предприятию) $n_э$ может определяться по упрощенной формуле:

$$n_э = \frac{2 \cdot \sum P_n}{P_{н.макс.}} \quad (1.3)$$

Если найденное по упрощенному выражению число $n_э$ окажется больше n , то следует принимать $n_э = n$. Если $p_{н.макс} / p_{н.мин} \leq 3$, где $p_{н.мин}$ - номинальная мощность наименее мощного ЭП группы, также принимается $n_э = n$. При $n_э \leq 4$ рекомендуется пользоваться номограммой (см. рисунок 1.2).

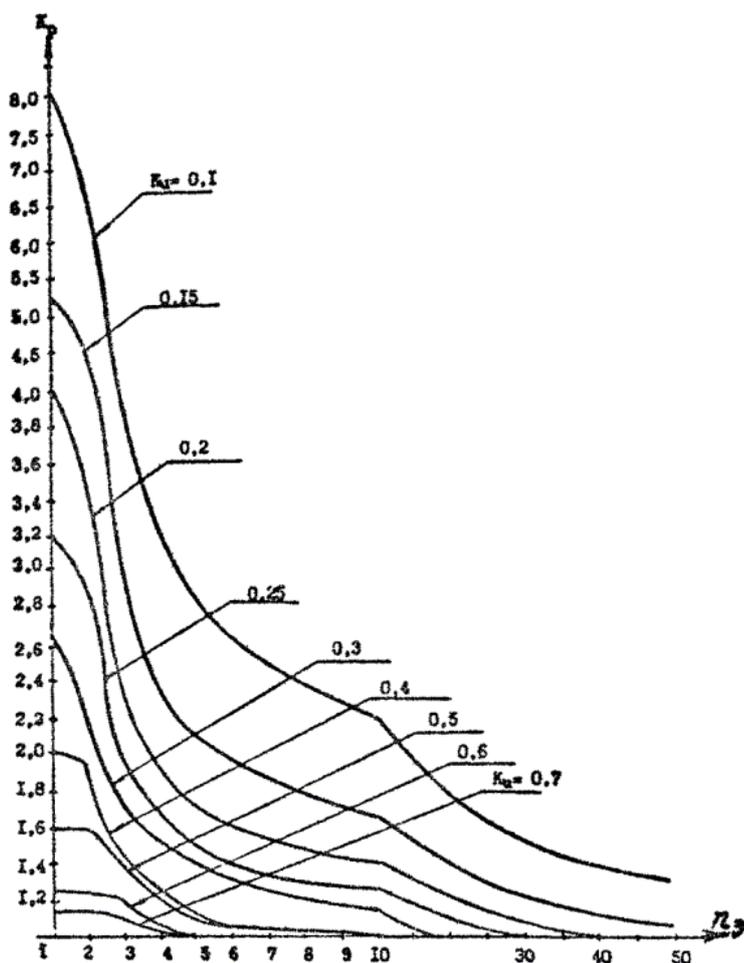


Рис. 1.2. Номограмма коэффициента расчетных нагрузок K_p для различных коэффициентов использования $K_{и}$ в зависимости от $n_э$ для постоянной времени нагрева $T_0=10$ мин)

4. В зависимости от средневзвешенного коэффициента использования, эффективного числа электроприемников и постоянной времени нагрева сети определяется и заносится в графу 11 коэффициент расчетной нагрузки K_p .

Принимаются следующие постоянные времени нагрева:

$T_0 = 10$ мин – для сетей напряжением до 1 кВ, питающих распределительные шинопроводы, пункты, сборки, щиты. Значения K_p для этих сетей принимаются по таблице 1.1.

$T_0 = 2,5$ ч – для магистральных шинопроводов и цеховых трансформаторов. Значения K_p для этих сетей принимаются по таблице 1.2.

5. Расчетная активная мощность подключенных к узлу питания электроприемников напряжением до 1 кВ (графа 12) определяется по формуле:

$$P_p = K_p \cdot \sum K_n \cdot P_n, \text{кВт} \quad (1.4)$$

В случае, когда P_p окажется меньше номинальной мощности наиболее мощного ЭП, следует принимать $P_p = P_{n.\text{max}}$.

6. Расчетная реактивная мощность подключенных к узлу питания электроприемников напряжением до 1 кВ (графа 13) определяется следующим образом. Для питающих сетей напряжением до 1 кВ в зависимости от n_3 :

$$\text{при } n_3 \leq 10 \quad Q_p = 1,1 \sum K_n \cdot P_n \cdot \text{tg} \varphi, \text{кВАр} ; \quad (1.5)$$

$$\text{при } n_3 > 10 \quad Q_p = \sum K_n \cdot P_n \cdot \text{tg} \varphi, \text{кВАр} . \quad (1.6)$$

Расчетная реактивная мощность для магистральных шинопроводов и на шинах цеховых трансформаторных подстанций независимо от n_3 определяется по формуле:

$$Q_p = K_p \sum K_n P_n \text{tg} \varphi, \text{кВАр} \quad (1.7)$$

7. Полная расчетная мощность (графа 14) определяется по формуле:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}, \text{кВ} \cdot \text{А} \quad (1.8)$$

К расчетной активной и реактивной мощности силовых электроприемников напряжением до 1 кВ при необходимости должны быть добавлены осветительные нагрузки $P_{p.o}$ и $Q_{p.o}$. Тогда полная расчетная мощность составит:

$$S_p = \sqrt{(P_p + P_{p.o})^2 + (Q_p + Q_{p.o})^2}, \text{кВ} \cdot \text{А} \quad (1.9)$$

8. Расчетный ток (графа 15) определяется по формуле:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3} \cdot U_H}, A. \quad (1.10)$$

Таблица 1.1

Значения коэффициентов расчетной нагрузки K_p для сетей напряжением до 1 кВ, питающих распределительные шинопроводы, пункты, сборки, щиты

n_3	Коэффициент использования $K_{и}$								
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
1	8.00	5.33	4.00	2.67	2.00	1.60	1.33	1.14	1.0
2	6.22	4.33	3.39	2.45	1.98	1.60	1.33	1.14	1.0
3	4.05	2.89	2.31	1.74	1.45	1.34	1.22	1.14	1.0
4	3.24	2.35	1.91	1.47	1.25	1.21	1.12	1.06	1.0
5	2.84	2.09	1.72	1.35	1.16	1.16	1.08	1.03	1.0
6	2.64	1.96	1.62	1.28	1.11	1.13	1.06	1.01	1.0
7	2.49	1.86	1.54	1.23	1.12	1.10	1.04	1.0	1.0
8	2.37	1.78	1.48	1.19	1.10	1.08	1.02	1.0	1.0
9	2.27	1.71	1.43	1.16	1.09	1.07	1.01	1.0	1.0
10	2.18	1.65	1.39	1.13	1.07	1.05	1.0	1.0	1.0
11	2.11	1.61	1.35	1.1	1.06	1.04	1.0	1.0	1.0
12	2.04	1.56	1.32	1.08	1.05	1.03	1.0	1.0	1.0
50	1.3	1.07	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
60	1.25	1.03	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
70	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
80	1.16	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
90	1.13	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
100	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

Таблица 1.2

Значения коэффициентов расчетной нагрузки K_p на шинах НН цеховых трансформаторов и для магистральных шинопроводов напряжением до 1 кВ

n_3	Коэффициент использования $K_{и}$							
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7 и более
1	8.00	5.33	4.00	2.67	2.00	1.60	1.33	1.14
2	5.01	3.44	2.69	1.9	1.52	1.24	1.11	1.0
3	2.94	2.17	1.8	1.42	1.23	1.14	1.08	1.0
4	2.28	1.73	1.46	1.19	1.06	1.04	1.0	0.97
5	1.31	1.12	1.02	1.0	0.98	0.96	0.94	0.93
6-8	1.2	1.0	0.96	0.95	0.94	0.93	0.92	0.91
9-10	1.1	0.97	0.91	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
10 - 25	0.8	0.8	0.8	0.85	0.85	0.85	0.9	0.9
25 - 50	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	0.8	0.85	0.85
Более 50	0.65	0.65	0.65	0.7	0.7	0.75	0.8	0.8

1.2 Методические указания

Исходными данными для выполнения лабораторной работы являются однолинейная схема питания ЭП цеха (рис. 1.3), наименование ЭП данного цеха и их номинальные мощности $P_{ном_i}$. Исходные данные для выполнения работы приведены в таблице 1.3.

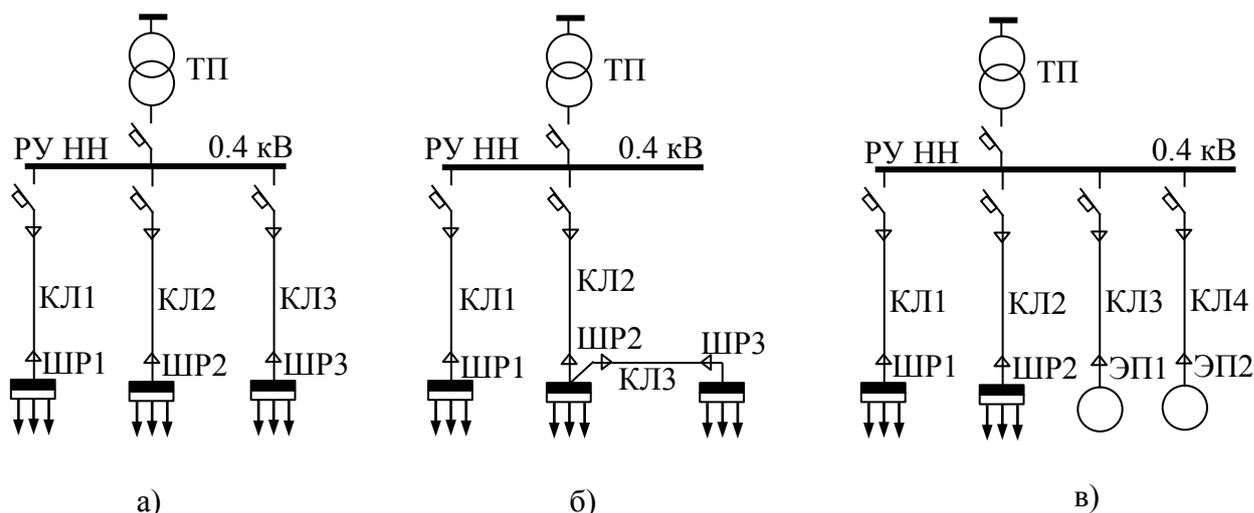


Рис. 1.3. Однолинейные схемы питания цеховых ЭП

Для выполнения лабораторной работы необходимо создать на листе MS Excel бланк расчета в соответствии с формой Ф636-92. Для повышения наглядности выполняемых вычислений рекомендуется использовать для ячеек с исходными и справочными данными, а также для ячеек с результатами вычислений разный цвет фона. Пример заполненного бланка для расчета электрических нагрузок цеха методом коэффициента расчетной активной мощности в среде MS Excel приведен на рисунке 1.4.

Все ЭП каждого расчетного узла нагрузки (распределительный щит, шинопровод) разбиваются на характерные группы с однородным режимом работы. Для характерных групп по таблице 1.4 находятся значения $K_{и_i}$ и $cos\phi_i$. Исходные данные и значения справочных коэффициентов заносятся в подготовленный бланк, и производится расчет электрических нагрузок цеха методом коэффициента расчетной активной мощности.

Таблица 1.3

Исходные данные для выполнения лабораторной работы

№ вар	№ схемы (рис.1.3)	Наименование цеха	Наименование ЭП, их количество и мощность	
Машиностроение				
1	а)	механический	ШР1	фрезерные карусельные станки 4 по 17 кВт; электрические печи сопротивления 2 по 20 кВт; конвейеры 2 по 12 кВт
			ШР2	автоматы 6 по 10 кВт; нагревательные приборы 4 по 20 кВт; зубофрезерные станки 2 по 22 кВт
			ШР3	мелкие токарные станки 6 по 14 кВт; компрессоры 6 по 30 кВт
2	б)	ремонтный	ШР1	долбежные станки 6 по 22 кВт; электропечи с периодической загрузкой 2 по 60 кВт; конвейеры 2 по 8 кВт
			ШР2	вентиляторы 2 по 55 кВт; нагревательные приборы 4 по 15 кВт; токарные станки 2 по 37 кВт
			ШР3	мелкие токарные станки 2 по 4 кВт; вентиляторы 1 по 3 кВт
3	в)	ремонтно-механический	ШР1	револьверные станки 6 по 12 кВт; долбежные станки 4 по 28 кВт; конвейеры 4 по 27 кВт
			ШР2	токарные станки 4 по 27 кВт; вентиляторы 2 по 37 кВт; транспортеры 4 по 18 кВт
			ЭП1	печь сопротивления 1 по 90 кВт
			ЭП2	двигатель привода насоса 1 по 110 кВт
4	а)	сборочный	ШР1	сварочные дуговые автоматы 4 по 16 кВт; электрические печи сопротивления 3 по 20 кВт; прессы 6 по 11 кВт
			ШР2	насосы 6 по 28 кВт; нагревательные приборы 4 по 20 кВт; автоматическая линия механообработки 4 по 8 кВт
			ШР3	конвейеры 6 по 28 кВт; компрессоры 2 по 30 кВт
5	б)	инструментальный	ШР1	зубонарезные станки 5 по 18 кВт; электропечи с периодической загрузкой 3 по 55 кВт; конвейеры 2 по 8 кВт
			ШР2	вентиляторы 2 по 45 кВт; закалочные установки 8 по 40 кВт; токарные станки 2 по 37 кВт
			ШР3	прессы 2 по 4 кВт; вентиляторы 2 по 2 кВт
6	в)	кузнечный	ШР1	токарные станки 4 по 16 кВт; приводы молотов 4 по 25 кВт; вентиляторы 3 по 10 кВт
			ШР2	прессы 3 по 37 кВт; транспортеры 3 по 22 кВт; вентиляторы 2 по 37 кВт
			ЭП1	печь сопротивления 1 по 80 кВт
			ЭП2	двигатель привода насоса 1 по 90 кВт

Автомобильная промышленность				
7	а)	механосборочный	ШР1	закалочные машины 8 по 15 кВт; прессы 3 по 11 кВт; вентиляторы 3 по 14 кВт
			ШР2	насосы 2 по 28 кВт; нагревательные приборы 2 по 30 кВт; автоматы холодной штамповки 4 по 17 кВт; фрезерные станки 4 по 25 кВт
			ШР3	конвейеры 4 по 20 кВт; компрессоры 2 по 25 кВт; нагревательные шкафы 6 по 30 кВт
8	б)	сборочный	ШР1	сварочные дуговые автоматы 6 по 28 кВт; прессы 2 по 15 кВт; насосы 2 по 28 кВт; вентиляторы 2 по 25 кВт
			ШР2	вентиляторы 2 по 45 кВт; сушильные шкафы 2 по 30 кВт; автоматическая линия механообработки 4 по 8 кВт
			ШР3	вентиляторы 3 по 2 кВт
9	в)	инструментальный	ШР1	закалочные установки 5 по 45 кВт; конвейеры 2 по 17 кВт; насосы 2 по 14 кВт; кран-балки 2 по 16 кВт
			ШР2	прессы 2 по 27 кВт; конвейеры 3 по 16 кВт; станки-автоматы 2 по 10 кВт; вентиляторы 2 по 8 кВт
			ЭП1	двигатель привода компрессора 1 по 75 кВт
			ЭП2	двигатель привода насоса 1 по 65 кВт
10	а)	кузнечный	ШР1	закалочные машины 6 по 12 кВт; прессы 4 по 16 кВт; вентиляторы 2 по 14 кВт
			ШР2	насосы 2 по 28 кВт; нагревательные приборы 2 по 30 кВт; автоматы холодной штамповки 4 по 17 кВт; транспортеры 2 по 18 кВт
			ШР3	конвейеры 4 по 16 кВт; компрессоры 2 по 25 кВт; вентиляторы 4 по 18 кВт
11	б)	литейный	ШР1	сварочные дуговые автоматы 6 по 28 кВт; формовочные машины 2 по 14 кВт; вентиляторы 4 по 25 кВт
			ШР2	вентиляторы 2 по 45 кВт; сушильные шкафы 2 по 30 кВт; грохоты 2 по 45 кВт; машины обжига 2 по 25 кВт
			ШР3	насосы 2 по 4 кВт
12	в)	термический	ШР1	закалочные установки 3 по 45 кВт; конвейеры 4 по 12 кВт; насосы 2 по 14 кВт; вентиляторы 2 по 16 кВт
			ШР2	электрические печи закалочные 2 по 40 кВт; вентиляторы 6 по 4 кВт; насосы 2 по 16 кВт;
			ЭП1	печь индукционная 1 по 120 кВт
			ЭП2	двигатель привода насоса 1 по 95 кВт

Черная металлургия				
13	а)	коксохимический	ШР1	дробилки 2 по 55 кВт; вентиляторы 2 по 16 кВт; скиповые подъемники 6 по 75 кВт
			ШР2	насосы 2 по 15 кВт; питатели 4 по 7 кВт; вентиляторы 6 по 25 кВт
			ШР3	транспортеры 4 по 16 кВт; штабелеры 2 по 60 кВт; вентиляторы 4 по 18 кВт
14	б)	обогащительный	ШР1	мельницы шаровые 4 по 75 кВт; конвейеры ленточные 2 по 17 кВт; насосы масляные 4 по 28 кВт
			ШР2	дробилки 4 по 55 кВт; вагоно-опрокидыватели 4 по 40 кВт; питатели 4 по 10 кВт
			ШР3	кран-балки 2 по 2 кВт
15	в)	конвертерный	ШР1	магнитные краны 2 по 45 кВт; краны заливочные 6 по 40 кВт; вентиляторы 2 по 16 кВт
			ШР2	магнитные краны 4 по 45 кВт; вентиляторы 6 по 4 кВт; насосы 2 по 16 кВт
			ЭП1	печь сопротивления 1 по 90 кВт
			ЭП2	двигатель привода насоса 1 по 80 кВт
16	а)	мартеновский	ШР1	вентиляторы 2 по 18 кВт; завалочные машины 8 по 32 кВт
			ШР2	насосы 2 по 16 кВт; краны разливочные 6 по 10 кВт; вентиляторы 2 по 25 кВт
			ШР3	транспортеры 2 по 16 кВт; дымососы 4 по 50 кВт; вентиляторы 4 по 18 кВт
17	б)	ферросплавный	ШР1	дробилки 2 по 75 кВт; конвейеры 2 по 40 кВт; очистные барабаны 4 по 18 кВт
			ШР2	дробилки 4 по 55 кВт; грохоты 2 по 40 кВт; элеваторы 6 по 12 кВт
			ШР3	кран-балки 3 по 1 кВт
18	в)	прокатный	ШР1	ножницы 2 по 45 кВт; рольганги 2 по 40 кВт; вентиляторы 4 по 16 кВт
			ШР2	клещевые краны 2 по 45 кВт; вентиляторы 6 по 4 кВт; кантователи 2 по 18 кВт
			ЭП1	двигатель привода насоса 1 по 90 кВт
			ЭП2	двигатель привода крана 1 по 80 кВт
19	а)	огнеупорный	ШР1	вентиляторы 2 по 18 кВт; питатели 6 по 32 кВт; дробилки конусные 4 по 45 кВт
			ШР2	дробилки молотковые 4 по 45 кВт; грохоты 4 по 20 кВт; элеваторы 2 по 28 кВт; дымососы 2 по 30 кВт
			ШР3	транспортеры 2 по 16 кВт; дымососы 4 по 50 кВт; прессы 6 по 17 кВт
20	б)	доменный	ШР1	грохоты кокса 3 по 45 кВт; разливочные машины 6 по 30 кВт; бегуны 2 по 40 кВт
			ШР2	газоочистка 2 по 37 кВт; грейферные краны 2 по 75 кВт; разливочные машины 6 по 40 кВт; вентиляторы 2 по 16 кВт
			ШР3	кран-балки 2 по 3 кВт

1.3 Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель работы
2. Заполненный бланк расчета электрических нагрузок цеха методом коэффициента расчетной активной мощности в среде MS Excel
3. Выводы

1.4 Контрольные вопросы

1. Перечислите основные коэффициенты графиков электрических нагрузок, характеризующие режим работы электроприемников.
2. Дайте определение понятию «расчетная электрическая нагрузка».
3. Чем определяется необходимая степень точности расчета электрических нагрузок.
4. По какому воздействию на элементы схемы электроснабжения определяется расчетная нагрузка ?
5. Почему расчетная нагрузка не равна сумме номинальных мощностей отдельных электроприемников ?
6. Чему равна расчетная нагрузка одного электроприемника, двух, трех, четырех и более ?
7. Почему за расчетную нагрузку принимается максимальная из средних нагрузок за 30-минутный интервал осреднения ?
8. Для чего вводится понятие эффективного числа электроприемников ?
9. Перечислите основные методы расчета электрических нагрузок и приведите основные формулы для их расчета.
10. Что такое время использования максимума нагрузки ?
11. Какие данные являются исходными для проектирования системы электроснабжения промышленного предприятия ?
12. На какие категории делятся электроприемники по надежности электроснабжения ?

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Наименование ЭП	кол-во, n	Номинальная мощность		Коефф. исп., $K_{и}$	Коефф. реактивной мощности		$K_{и} \cdot P_{н}$	$K_{и} \cdot P_{н} \cdot \text{tgf}$	$P_{н}^2 \cdot n$	Эффек. число ЭП, $n_{э}$	Коефф. расч. нагрузки, K_p	Расчетная мощность			Расч. ток, I_p , А
2			1 ЭП, $P_{н}$	общая, $P_{н} = n \cdot P_{н}$		cosf	tgf						P_p , кВт	Q_p , кВар	S_p , кВА	
3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
4	Распределительный пункт ШР1															
5	Печи сопротивления	2	10	20	0.5	0.95	0.33	10.00	3.29	200						
6	Вентиляторы	2	7	14	0.65	0.8	0.75	9.10	6.83	98						
7	Станки	2	2.8	5.6	0.14	0.5	1.73	0.78	1.36	15.68						
8		2	4	8	0.14	0.5	1.73	1.12	1.94	32						
9		1	3	3	0.14	0.5	1.73	0.42	0.73	9						
10		1	14	14	0.14	0.5	1.73	1.96	3.39	196						
11		2	1.7	3.4	0.14	0.5	1.73	0.48	0.82	5.78						
12	Итого:	12		68	0.35			23.86	18.36	556.46	8.31	1.15	27.44	20.19	34.07	51.76
13	Распределительный пункт ШР3															
14	Прессы штамповочные	3	28	84	0.17	0.65	1.17	14.28	16.70	2352.00						
15	Итого:	3		84	0.17			14.28	16.70	2352.00	3	2.65	37.84	18.36	42.06	63.91
16	ШР1+ШР3															
17	ШР1	12		68	0.35			23.86	18.36	556.46						
18	ШР3	3		84	0.17			14.28	16.70	2352						
19	Итого:	15		152	0.25			38.14	35.05	2908.46	7.94	1.37	52.25	38.56	64.94	98.66

Рис. 1.4 Пример бланка расчета электрических нагрузок цеха методом коэффициента расчетной активной мощности в среде MS Excel

Таблица 1.4

Справочные коэффициенты для расчета электрических нагрузок

Наименование электроприемника	K_{Σ}	$\cos\varphi$
Станочное оборудование		
Металлорежущие станки мелкосерийного производства с нормальным режимом работы: мелкие токарные, фрезерные, строгальные, долбежные; ножницы листовые, сортовые, фасонные, scrapные, арматурные станки	0.12-0.14	0.5
Металлорежущие станки крупносерийного производства	0.14-0.16	0.5
Металлорежущие станки при тяжелом режиме работы: штамповые прессы, автоматы, револьверные, зубофрезерные, обдирочные, крупные токарные, строгальные, фрезерные карусельные и расточные станки	0.14-0.17	0.65
Станки механической обработки древесины	0.2	0.65
Машины для литья под давлением, формовки, обжига, заливки, охлаждения и выбивки отливок для литья в моделях, для изготовления оболочковых форм, для удаления литников и прибылей	0.16	0.5
Сварочное оборудование		
Сварочные трансформаторы для дуговой сварки	0.35	0.5
Сварочные трансформаторы, преобразователи автоматической дуговой сварки	0.4	0.5
Сварочные машины сварки трением	0.4	0.65
Установки электронно-лучевой сварки и резки лазерным лучом	0.35	0.5
Сварочные аппараты	0.05	0.6
Сварочные автоматы	0.2-0.3	0.65
Сварочные машины шовные	0.2-0.5	0.7
Подъемно-транспортные механизмы		
Элеваторы, шнеки, транспортеры, конвейеры несблокированные	0.4	0.75
Конвейеры сблокированные	0.55	0.75
Краны, тельферы (при ПВ=25%)	0.05	0.5
Краны мостовые, козловые, лифты при ПВ=25 %	0.05	0.45
Краны мостовые, козловые, лифты при ПВ=40 %	0.1	0.5
Электротермические электроприемники		
Электрические печи сопротивления с непрерывной загрузкой	0.7	0.95
Электрические печи сопротивления с периодической загрузкой	0.5	0.85
Индукционные печи низкой частоты (50 Гц)	0.7	0.8
Индукционные печи повышенной частоты (0.1 – 10 кГц)	0.6	0.7
Сушильные шкафы	0.75-0.8	1.0
Насосы, вентиляторы, компрессоры		
Вентиляторы, насосы технологические, компрессоры	0.55	0.8
Вентиляторы сантехнические (вытяжная вентиляция)	0.5	0.8
Насосы водоснабжения (1-й, 2-й подъем)	0.6	0.8

Насосы оборотной системы водоснабжения	0.65	0.8
Дымососы, вентиляторы, насосы производственных котельных	0.6	0.8
Дымососы печей	0.7	0.8
Производственные вентиляторы, воздуходувки	0.65	0.75
Центробежные насосы	0.6	0.7
Вентиляторы пневмотранспорта	0.6-0.65	0.85
Механизмы дробления и измельчения		
Дробилки молотковые	0.8	0.8
Дробилки, грохоты	0.7	0.8
Мельницы шаровые	0.85	0.8
Мельницы стержневые	0.7	0.75
Дробильно-сушильное отделение и смесители	0.45	0.7

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. ВЫБОР СЕЧЕНИЙ ПРОВОДНИКОВ И АППАРАТОВ ЗАЩИТЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ДО 1000 В

Цель работы – овладение методикой выбора сечений проводников и аппаратов защиты цеховой распределительной сети

2.1 Краткие теоретические сведения

Электрические сети напряжением до 1000 В на промышленном предприятии предназначены для распределения электроэнергии внутри цехов (питающие сети) и непосредственного питания большинства электроприемников (распределительные сети). Схема внутрицеховой сети определяется технологическим процессом производства, планировкой помещения цеха, взаимным расположением трансформаторных подстанций, электроприемников (ЭП) и вводов питания, расчетной мощностью, требованиями бесперебойности электроснабжения, технико-экономическими соображениями, условиями окружающей среды. Наиболее распространенным для цеховых сетей является напряжение 380 В (четырёхпроводные системы с заземленной нейтралью) и 660 В.

Для защиты электрических сетей напряжением до 1000 В применяются плавкие предохранители, автоматические воздушные выключатели, тепловые реле магнитных пускателей. Аппараты защиты должны обеспечивать защиту сетей от токов КЗ и перегрузок. Наиболее распространенным аппаратом защиты цеховых электрических сетей являются автоматические воздушные выключатели (АВ).

2.1.1 Выбор автоматических выключателей

Автоматические воздушные выключатели предназначены для автоматического размыкания электрических цепей при аномальных режимах (КЗ и перегрузках), для оперативных переключений при нормальных режимах, а также для защиты электрических цепей при недопустимых снижениях напряжения. По сравнению с предохранителями автоматические выключатели обладают рядом преимуществ: после срабатывания они снова готовы к работе; имеют более точные защитные характеристики; совмещение функций коммутации электрических цепей и их защиты.

Основными элементами АВ являются расцепители, которых может быть один или несколько. По принципу действия расцепители разделяются на электромагнитные и термобиметаллические (тепловые). Существуют расцепители максимального тока, которые срабатывают при токе,

большим уставки тока срабатывания; расцепители минимального напряжения, которые срабатывают, когда напряжение на катушке становится меньше заданного; и расцепители независимые, которые срабатывают без выдержки времени, когда на их катушку подано напряжение.

Тепловой расцепитель и расцепитель максимального тока устанавливаются во всех фазах АВ, остальные - по одному на выключатель.

Автоматические выключатели обеспечивают защиту от перегрузок:

- с помощью тепловых расцепителей, действующих с выдержкой времени, обратно зависимой от тока перегрузки;
- расцепителями с часовым механизмом (с обратно зависимой от тока характеристикой);
- с помощью полупроводниковых расцепителей (с обратно зависимой от тока характеристикой);
- комбинированными расцепителями, обеспечивающими защиту от перегрузок (с обратно зависимой от тока характеристикой) и токов КЗ мгновенного действия и с выдержкой времени, обеспечивающей селективность действия.

В настоящее время в цеховых электрических сетях напряжением до 1 кВ применяются АВ различных конструкций и типов.

Основные технические характеристики автоматических выключателей серии ВА приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Технические данные автоматических выключателей серии ВА

Тип	Номинальный ток, А	Номинальный ток расцепителей с обратозависимой характеристикой, А	Уставки срабатывания по току в зоне КЗ и кратности к $I_{ном}$ расцепителя, $I/I_{ном}$
ВА13-29	63	1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4; 5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63	3; 6; 12
ВА51Г-31	100	16; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100	14
ВА57-35	250	16; 20; 25; 31,5; 40; 50 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250	2,5; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0
ВА74-40	800	130, 190, 260, 275, 500, 625, 760, 800	2; 2,5; 3; 4; 4,5; 5; 5,5; 6; 6,5; 7; 7,5; 8
ВА74-43	1600	1250, 1600	

Выбор автоматических выключателей можно разделить на следующие этапы:

1. Выбор типа автомата.
2. Выбор номинального тока автомата по условию:

$$I_{\text{ном. АВ}} \geq K_{\text{зап}} \cdot I_{\text{длит}}$$

3. Выбор номинального тока теплового расцепителя автоматов $I_{\text{ном.тепл}}$ по условию:

$$I_{\text{ном.тепл}} \geq K_{\text{зап}} \cdot I_{\text{длит}}$$

4. Проверка по току срабатывания (уставки) электромагнитного расцепителя:

для группы ЭП:

$$I_{\text{ном.э.о.}} \geq 1.25 \cdot I_{\text{пик}}$$

для отдельного ЭП:

$$I_{\text{ном.э.о.}} \geq 1.5 \cdot I_{\text{пуск}}$$

где $I_{\text{ном. АВ}}$ – номинальный ток АВ;

$I_{\text{ном.тепл}}$ – номинальный ток теплового расцепителя;

$I_{\text{ном.э.о.}}$ – ток срабатывания (ток уставки) электромагнитного расцепителя;

$I_{\text{длит}}$ – длительный максимальный рабочий ток линии (расчетный – для группы ЭП, и номинальный для отдельного ЭП);

$I_{\text{пик}}$ – пиковый ток группы ЭП;

$I_{\text{пуск}}$ – пусковой ток ЭП.

$K_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса, принимаемый из следующих условий: для комбинированных расцепителей при защите одиночного ЭП: $K_{\text{зап}} = 1.15$, при защите группы ЭП $K_{\text{зап}} = 1.1$.

Ток уставки электромагнитного расцепителя определяется по выражению:

$$I_{\text{ном.э.о.}} = I_{\text{ном.тепл.}} \cdot K_{\text{кз}}$$

где $K_{\text{кз}}$ – уставка срабатывания в зоне КЗ - выбирается по справочным данным выключателя.

Номинальные токи расцепителей соседних автоматических выключателей последовательно включенных в сеть должны различаться не менее чем на одну ступень. Номинальные токи расцепителей автоматического выключателя, ближайшего к источнику питания (вводного в ТП), должны быть не менее чем в 1,5 раза больше, чем у наиболее удаленного. Выполнение этих условий обеспечивает селективность срабатывания тепловых расцепителей. При коротких замыканиях селективность защиты обеспечиваться не будет, так как электромагнитные расцепители при токах, равных или больших их токов уставки, срабатывают практически мгновенно. Для гарантированного обеспечения селективности следует выбирать АВ с регулируемой характеристикой срабатывания, у которых возможно задавать (выставлять) время срабатывания.

2.1.2 Определение пикового тока группы электроприемников

Пиковые нагрузки возникают при пуске электродвигателей, работе дуговых электрических печей, при электросварке и т.п. Пиковым током одного $i_{\text{пик}}$ или группы электроприемников $I_{\text{пик}}$ называется максимально возможная кратковременная нагрузка (длительностью от 1 до 10 с).

Пиковый ток характеризуется частотой появления. При проектировании этот ток принимают за основу расчетов колебаний напряжения, выбора устройств и уставок аппаратов защиты и проверки электрических сетей по условиям самозапуска электродвигателей.

Пиковый ток группы электроприемников, работающих при отстающем токе с достаточной для практических расчетов точностью, определяется как арифметическая сумма наибольшего из пусковых токов двигателей, входящих в группу, и расчетного тока нагрузки всей группы ЭП за вычетом номинального тока с учетом двигателя, имеющего наибольший пусковой ток:

$$I_{\text{пик}} = I_{\text{пуск.мах}} + (I_{\text{расч}} - k_{\text{и}} \cdot I_{\text{ном.мах}})$$

где $I_{\text{пуск.мах}}$ - наибольший из пусковых токов двигателей в группе по паспортным данным;

$I_{\text{ном.мах}}$ - номинальный (приведенный к ПВ = 100%) ток двигателя с наибольшим пусковым током;

$k_{\text{и}}$ - коэффициент использования, характерный для двигателя, имеющего наибольший пусковой ток;

$I_{\text{расч}}$ - расчетный ток нагрузки всей группы электроприемников.

В качестве наибольшего пикового тока одного ЭП принимаются:

- пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором или синхронного двигателя, который в случае отсутствия заводских данных может быть принят равным 5-кратному номинальному току;
- пусковой ток двигателя постоянного тока или асинхронного с фазным ротором, который при отсутствии более точных данных принимается не ниже 2,5-кратного номинального тока;
- пиковый ток печных и сварочных трансформаторов, который принимается по заводским данным, а в случае их отсутствия - не менее 3-кратного номинального (без приведения к ПВ = 100%);
- пиковая мощность машин контактной сварки, которая определяется по паспортным данным по формуле

$$S_{\text{пик}} = U_{2\text{мах}} \cdot I_{2\text{мах}},$$

где $U_{2\text{мах}}$ - максимальное вторичное напряжение, В; $I_{2\text{мах}}$ - максимальный сварочный вторичный ток, А. При отсутствии заводских

данных пиковая мощность может быть приближенно принята равной 3-кратной номинальной (при паспортной ПВ).

Номинальный ток электродвигателя определяется с использованием его каталожных данных по выражению:

$$I_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi_{\text{ном}} \cdot \eta}$$

При отсутствии каталожных данных допускается использовать типовые средние значения коэффициента мощности и КПД промышленных электродвигателей:

- для электродвигателей с $P_{\text{ном}} < 20$ кВт $\cos \varphi_{\text{ном}} \approx 0.8$, $\eta \approx 0.8$;
- для электродвигателей с $P_{\text{ном}} > 20$ кВт $\cos \varphi_{\text{ном}} \approx 0.9$, $\eta \approx 0.9$.

2.1.3 Выбор сечений проводников цеховых электрических сетей

Сечения силовых линий выбираются по:

1. допустимому нагреву длительно протекающим максимальным током нагрузки;
2. по потере напряжения;
3. по условию соответствия выбранному аппарату защиты.

Сечение проводов и кабелей напряжением до 1000 В по условию нагрева определяют в зависимости от расчетного значения допустимой длительной нагрузки при нормальных условиях прокладки, определенной как большая величина из двух соотношений:

1. По условию нагрева длительным расчетным током:

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{расч}}$$

где $I_{\text{доп}}$ – допустимый ток кабеля или провода в нормальном режиме;

$I_{\text{расч}}$ – длительный расчетный ток линии.

За расчетный ток нагрузки линии, питающей одиночный электроприемник, принимается номинальный ток нагрузки этого ЭП:

$$I_{\text{расч}} = I_{\text{ном.ЭП}}$$

Для линии, питающей многодвигательный агрегат с одновременным пуском n электродвигателей, расчетный ток нагрузки равен сумме номинальных токов двигателей:

$$I_{\text{расч}} = \sum_{i=1}^n I_{\text{ном.}i}$$

Во взрывоопасных зонах (кроме В-Іб и В-Іг) длительно допустимый ток ответвления к электродвигателю с короткозамкнутым ротором должен быть не менее $1.25 \cdot I_{\text{ном}}$ двигателя.

Токи нагрузки ЭП повторно-кратковременного режима работы нагревают проводники в меньшей степени, чем токи длительного режима, поэтому их следует пересчитать (согласно ПУЭ) на условный приведенный длительный ток нагрузки. Выбор проводника по нагреву проводится в таких случаях из условия:

$$I_{\text{расч}} = \frac{I_{\text{ном}} \cdot \sqrt{ПВ}}{0.875}$$

В соответствии с ПУЭ пересчитывают сечение проводника только при $ПВ \leq 0,4$, т.е. для ЭП с общей длительностью цикла до 10 мин. и длительностью рабочего периода не более 4 мин., а также для сечения медных проводов выше 6 мм^2 и алюминиевых выше 10 мм^2 . Для медных проводов до 6 мм^2 и для алюминиевых до 10 мм^2 включительно токовые нагрузки по нагреву принимают как для установок с длительным режимом работы.

2. По условию соответствия выбранному аппарату максимальной токовой защиты:

$$I_{\text{доп}} \geq K_{\text{защ}} \cdot I_{\text{защ}}$$

где $I_{\text{защ}}$ – ток уставки срабатывания защитного аппарата;

$K_{\text{защ}}$ – кратность длительно допустимого тока для провода или кабеля по отношению к току срабатывания защитного аппарата.

Значения $K_{\text{защ}}$ и $I_{\text{защ}}$ определяют из таблицы 2.2 в зависимости от характера сети, типа изоляции проводов и кабелей, условий окружающей среды.

При прокладке нескольких кабелей и более четырех проводов в одной трубе, траншее, лотке, коробе, а также при значительном отклонении температуры окружающей среды от стандартной, в расчетные формулы вводится поправочный коэффициент на условия прокладки $k_{\text{прокл}}$:

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{длит}}}{K_{\text{прокл}}}$$

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{K_{\text{защ}} \cdot I_{\text{защ}}}{K_{\text{прокл}}}$$

Коэффициент прокладки определяется по выражению:

$$K_{\text{прокл}} = K_1 \cdot K_2$$

где K_1 , K_2 – коэффициенты, учитывающие влияние температуры окружающей среды и влияние рядом проложенных кабельных линий, соответственно.

Для определения K_1 используется табл. 1.3.3 ПУЭ.

Для определения K_2 используется табл. 1.3.12, 1.3.26 ПУЭ.

Сечение жил линий, которые могут работать в послеаварийных режимах с перегрузкой, выбирают по условию:

$$K_{\text{пер}} \cdot I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{п.ав.}}}{K_{\text{прокл}}}$$

где $I_{\text{п.ав.}}$ – расчетный ток линии в послеаварийном режиме (находится по токовой нагрузке приходящейся на одну линию, при выходе из строя второй линии); $K_{\text{пер}}$ – кратность перегрузки, принимаемая согласно ПУЭ.

Для определения $K_{\text{пер}}$ используется табл. 1.3.1, 1.3.2 ПУЭ.

Таблица 2.2

Минимальные кратности допустимых токовых нагрузок на провода и кабели по отношению к номинальным токам, токам трогания или токам уставки защитных аппаратов

Тип защитного аппарата и значения принимаемого тока защиты I_z	Коэффициент защиты K_z или кратность длительно допустимого тока для сетей			
	При обязательной защите от перегрузки			Не требующие защиты от перегрузок
	Провода с резиновой изоляцией или аналогичные по тепловым характеристикам изоляции		Кабели с бумажной изоляцией	
	Взрыво- и пожароопасные помещения	Не взрыво- и не пожаро-опасные помещения		
Номинальный ток плавкой вставки предохранителей $I_z = I_{\text{нвст}}$	1,25	1,0	1,0	0,33
Ток уставки срабатывания автоматического выключателя, имеющего только максимальный мгновенно действующий расцепитель $I_z = I_{\text{уст при кз}}$	1,25	1,0	1,0	0,22
Номинальный ток расцепителя выключателя с нерегулируемой обратозависимой от тока характеристикой (независимо от наличия или отсутствия отсечки) $I_z = I_{\text{нрасц}}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Ток трогания расцепителя автоматического выключателя с регулируемой обратозависимой от тока характеристикой (при наличии отсечки) $I_z = I_{\text{уст при перегрузке}}$	1,0	1,0	0,8	0,66

2.2 Методические указания

Исходными данными для выполнения лабораторной работы являются однолинейная схема питания ЭП цеха (рис. 1.3), результаты расчета электрических нагрузок узлов питания из лабораторной работы № 1.

Необходимо выбрать сечение проводника и аппарат защиты для одного, наиболее мощного ЭП, распределительного шкафа №1, а также

аппарат защиты и сечение проводника к самому распределительному шкафу №1 по условиям допустимого нагрева длительным током.

В качестве аппаратов защиты использовать автоматические выключатели серии ВА, технические характеристики которых приведены в таблице 2.1. Для питания ШР использовать кабели марки АВВГ, для питания отдельных ЭП провода марки АПРТО, окружающая среда нормальная, электрическая сеть требует защиты от перегрузки.

Принять способ прокладки магистральных линий от РУ НН ТП до ШР – по стене на скобах, распределительных линий от ШР до отдельных электроприемников – в трубах, в земле. Число параллельно проложенных кабелей для магистральных линий принять равным количеству ШР из однолинейной схемы питания цеха.

Для определения допустимого длительного тока проводов и кабелей использовать таблицы 1.3.5 и 1.3.7 ПУЭ.

2.3 Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель работы
2. Результаты расчетов и критериев выбора сечений проводников и аппаратов защиты
3. Однолинейная схема питания наиболее мощного ЭП с указанными техническими характеристиками линий и аппаратов защиты.
3. Выводы

2.4 Контрольные вопросы

1. Автоматические воздушные выключатели: назначение, конструктивное исполнение, основные технические характеристики, условия выбора
2. Способы передачи электрической энергии и условия выбора сечений проводников в сетях до 1000 В
3. Понятие пусковых и пиковых токов, порядок их определения
4. Что понимается под нормальными условиями прокладки проводов и кабелей?
5. В чём отличие провода от кабеля ?
6. Каким образом определяется коэффициент, учитывающий фактическую температуру окружающей среды ?
7. Каким образом определяется коэффициент, учитывающий количество рядом лежащих кабелей ?

8. Что произойдёт если ток уставки срабатывания защитного аппарата, будет больше длительно допустимого тока кабеля при фактических условиях прокладки ?
9. Какие ненормальные режимы возможны в сети и как осуществляется защита сетей от них ?
10. Описать, как выбираются сечения проводников в сети до 1000 В
11. Зачем необходимо согласование сечения проводника с уставками срабатывания защитной аппаратуры ?

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ В СЕТИ ДО 1000 В

Цель работы – овладение методикой расчета токов короткого замыкания в сети до 1000 В

3.1 Краткие теоретические сведения

Коротким замыканием (КЗ) называется преднамеренное или случайное, не предусмотренное нормальным режимом работы, электрическое соединение двух точек электрической сети между собой или землей, при котором токи в ветвях электроустановки резко возрастают, превышая наибольший допустимый ток продолжительного режима.

Причинами коротких замыканий чаще всего являются пробой изоляции электрических проводов и электрооборудования из-за перенапряжений и постепенного старения изоляционных материалов, схлестывание проводов воздушных линий, механические повреждения кабельных линий, а иногда и ошибочные действия персонала станций, подстанций и сетей.

КЗ являются одним из основных видов аварий в системах электроснабжения, в связи с чем расчет токов КЗ является важнейшей задачей проектирования таких систем.

На стадии проектировании любой системы электроснабжения необходимо определить максимально возможные (в начале каждого участка) и минимально возможные (в конце участка) токи КЗ. По максимальным токам производится проверка сечений проводников, коммутационных и защитных аппаратов на термическую и динамическую стойкость к токам КЗ; расчет минимальных токов необходим для правильного выбора уставок аппаратов защиты.

Расчет токов КЗ в сети ниже 1000 В необходим для проверки защитных аппаратов по отключающей способности, проверки защит по чувствительности действия и шинопроводов (ШМА, ШРА) по термической и электродинамической стойкости.

С этой целью рассчитываются токи трехфазного короткого замыкания $I_{кз}^{(3)}$ и ударный ток $i_{уд}$ на выходе защитных аппаратов, токи однофазного КЗ $I_{кз}^{(1)}$ в конце защищаемой зоны аппарата защиты.

Особенности расчета токов КЗ в сетях до 1000 В:

- мощность системы (S_c) принимается бесконечной, т. е. напряжение на шинах цеховых ТП считается неизменным;
- учитываются активные и индуктивные сопротивления до точки КЗ всех элементов сети.

При расчетах токов КЗ необходимо учитывать следующие сопротивления:

- индуктивные сопротивления всех элементов короткозамкнутой цепи, включая силовые трансформаторы, проводники, трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей;
- активные сопротивления элементов короткозамкнутой цепи;
- активные сопротивления различных контактов и контактных соединений;
- значения параметров синхронных и асинхронных электродвигателей.

Расчет ведется в именованных единицах, напряжение принимается на 5 % выше номинального напряжения сети ($U=1.05 \cdot U_{\text{ном.сети}}=400$ В при $U_{\text{ном.сети}} = 380$ В), сопротивления всех элементов схемы замещения выражаются в мОм.

При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ $I_{\text{п0}}$ принимают равным его установившемуся значению I_{∞} и рассчитывают по формуле:

$$I_{\text{кз}} = I_{\text{п0}} = I_{\infty} = \frac{1.05 \cdot U_{\text{ном.сети}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}}, \text{ кА}$$

где Z_{Σ} – суммарное полное сопротивление до точки КЗ, включая сопротивление силового трансформатора, приведенное к напряжению 0.4 кВ.

Наибольшее амплитудное значение полного тока наблюдается через полпериода (0.01 с) после начала КЗ. Этот ток называется ударным током короткого замыкания $i_{\text{уд}}$ и определяется как сумма амплитудного значения периодической составляющей тока и мгновенного значения аperiodической составляющей для $t = 0.01$ с:

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{п0}}$$

где $k_{\text{уд}}$ – ударный коэффициент тока КЗ; $I_{\text{п0}}$ – начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ.

Ударный коэффициент $k_{\text{уд}}$ зависит от соотношения между активным и реактивным сопротивлением цепи КЗ, и в сетях напряжением до 1 кВ его численные значения намного меньше, чем в высоковольтных сетях из-за большого активного сопротивления цепи КЗ. Значения $k_{\text{уд}}$ можно определить по кривым затухания (рис.3.1) в зависимости от величины соотношения x_{Σ}/r_{Σ} .

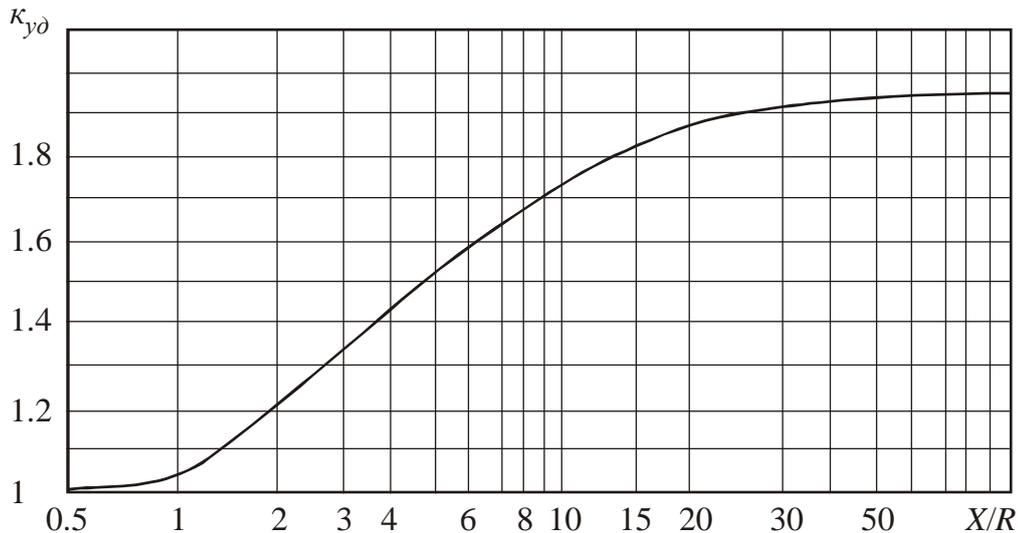


Рис. 3.1. Кривая для определения ударного коэффициента

В приближенных расчетах при определении $i_{уд}$ на шинах цеховых ТП мощностью 400-1000 кВА можно принимать $k_{уд}=1.3$, а при более удаленных точках КЗ – $k_{уд} \approx 1,0$.

Полное сопротивление двухобмоточных трансформаторов определяется по выражению:

$$Z_{тр} = \frac{u_{кз} U_{ном}^2}{100 \cdot S_{ном.тр}}, \text{ или } Z_{тр} = \sqrt{R_{тр}^2 + X_{тр}^2},$$

а активное и индуктивное сопротивления по соотношениям:

$$R_{тр} = \frac{\Delta P_{кз} U_{ном}^2}{S_{ном}^2}; \quad X_{тр} = \sqrt{\left(\frac{u_{кз}}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{кз}}{S_{ном}}\right)^2} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}}$$

где $u_{кз}$ – напряжение короткого замыкания, %; $U_{ном}$ – номинальное напряжение трансформатора, В; $\Delta P_{кз}$ – потери короткого замыкания, кВт; $S_{ном}$ – номинальная мощность трансформатора, кВА.

Значения сопротивлений силовых двухобмоточных трансформаторов приведены в таблице 3.1.

Сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока для различных коэффициентов трансформации, катушек автоматов и переходные сопротивления рубильников приведены в таблице 3.2.

Сопровитления понижающих трансформаторов, приведенные к вторичному напряжению 0.4 кВ

Мощность, кВА	Верхний предел первичного напряжения, кВ	Схема соединений обмоток	$\Delta P_{кз}$, кВт	$u_{кз}$, %	$R_{тр}$, мОм	$X_{тр}$, мОм	$Z_{тр}$, мОм	$Z_{тр}^{(1)}$, мОм
63	10	Y/Y _H	1.28	4.5	52	102	114	1237
100	10	Y/Y _H	1.97	4.5	31.5	64.7	72	779
160	10	Y/Y _H	2.65	4.5	16.6	41.7	45	487
160	10	Δ/ Y _H	2.65	4.5	16.6	41.7	45	135
250	10	Y/Y _H	3.7	4.5	9.4	27.2	28.7	312
250	10	Δ/ Y _H	3.7	4.5	9.4	27.2	28.7	86.3
400	10	Y/Y _H	5.5	4.5	5.5	17.1	18	195
400	10	Δ/ Y _H	5.5	4.5	5.9	17.0	18	54
630	10	Y/Y _H	7.6	5.5	3.1	13.6	14	129
630	10	Δ/ Y _H	7.6	5.5	3.4	13.5	14	42
1000	10	Y/Y _H	12.2	5.5	1,7	8.6	8.8	81
1000	10	Δ/ Y _H	12.2	5.5	1,9	8.6	8.8	26,4
1600	10	Y/Y _H	18	5.5	1	5.4	5.5	63.5
1600	10	Δ/ Y _H	18	5.5	1.1	5.4	5.5	16.5

Переходные сопротивления контактов и контактных соединений (вставных контактов, болтовых соединений шин и др.) принимают по справочникам и каталогам. Приблизительно сопротивление контактов рекомендуется учитывать следующим образом:

- 0.1 мОм – для контактных соединений кабелей;
- 0.01 мОм – для шинопроводов;
- 1.0 мОм – для коммутационных аппаратов.

Величина активного (омического) сопротивления линий определяется материалом проводника, его длиной и сечением. Индуктивное сопротивление линий электропередач зависит от среднего геометрического расстояния между проводниками и частоты напряжения. Для определения индуктивного сопротивления трехфазной линии с проводами из цветных металлов при частоте переменного тока 50 Гц можно использовать эмпирическую формулу:

$$x = 0.1145 \cdot \lg \frac{2 \cdot D}{d} + 0.016, \text{ ом/км}$$

где d – внешний диаметр провода, мм; D – среднее геометрическое расстояние между проводами линии, вычисляемое по формуле:

$$D = \sqrt{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}, \text{ мм}$$

где D_{ij} – расстояния между проводами у каждой пары проводов трехфазной линии, мм.

Таблица 3.2

Значения активных и индуктивных сопротивлений элементов сети

Наименование	Активное сопротивление R , мОм		Индуктивное сопротивление X , мОм		Переходное сопротивление контактов примерно, мОм
Сопротивление катушек максимального тока автоматов при номинальном токе, А					
50	5,5		2,7		1,3
70	2,35		1,3		1,0
100	1,3		0,86		0,75
140	0,74		0,55		0,65
200	0,36		0,28		0,6
400	0,15		0,1		0,4
600	0,12		0,094		0,25
>1000	не учитывается				
Переходное сопротивление рубильников при номинальных токах, А					
100					0,5
200					0,4
400					0,2
600					0,15
1000					0,08
Сопротивление первичных обмоток ТТ при коэффициенте трансформации	Сопротивление, мОм класса точности				
	1	2	1	2	
100/5	1,70;	0,75	2,70;	0,70	
150/5	0,75;	0,33	1,20;	0,30	
200/5	0,42;	0,19	0,67;	0,17	
300/5	0,20;	0,08	0,30;	0,08	
400/5	0,11;	0,05	0,17;	0,04	
600/5	0,05;	0,02	0,07;	0,02	
$\geq 1000/5$	не учитывается				

В практических расчетах численные значения сопротивлений линий электропередач удобно находить через их погонные удельные сопротивления по соотношениям:

$$R = r_0 \cdot L, \quad x = x_0 \cdot L$$

где r_0 x_0 , – удельные активное и индуктивное сопротивления, Ом/м; L – протяженность линии, м.

Значения удельного сопротивления линии зависят от ее конструкции, способа прокладки, величины напряжения, и приводятся в справочниках.

Средние значения активных и индуктивных сопротивлений трехфазных кабелей напряжением до 1000 В приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Активное и индуктивное сопротивления трехфазных кабелей с медными и алюминиевыми жилами

Сечение, мм ²	Сопротивление, Ом/км		
	Активное r_0		Индуктивное x_0
	Медь	Алюминий	
2.5	7.15	12.6	0.1
4	4.46	7.9	0.095
6	2.97	5.25	0.09
10	1.78	3.14	0.073
16	1.25	2.21	0.067
25	0.8	1.41	0.066
35	0.57	1.01	0.064
50	0.4	0.71	0.062
70	0.29	0.42	0.061
95	0.21	0.41	0.06
120	0.17	0.30	0.06
150	0.13	0.23	0.06
185	0.103	0.17	0.0596
240	0.078	0.132	0.0587

Для расчета токов КЗ составляется расчетная схема – упрощенная однолинейная схема электроустановки, в которой учитываются источники питания (энергосистема, двигатели, генераторы), трансформаторы, воздушные и кабельные линии, коммутационные и защитные аппараты, измерительные приборы, переходные контактные сопротивления. При составлении расчетной схемы исходят из условий длительной работы электроустановок рассчитываемой сети.

При расчете токов КЗ необходимо учитывать возможность подпитки места КЗ от электродвигателей большой мощности. За счет запаса кинетической энергии во вращающихся массах ротора и при значительном снижении напряжения питания (если двигатель непосредственно присоединен к месту КЗ напряжение на его зажимах во время аварии равно 0) электрическая машина переходит в генераторный режим и становится источником питания электрической цепи.

Учет подпитки мест короткого замыкания от электродвигателей производится, если они непосредственно связаны с точкой КЗ электрически и находятся в зоне малой удаленности. В сетях до 1000 В учет подпитки КЗ от двигателей производится в том случае, если они непосредственно подключены к месту КЗ короткими ответвлениями до 5-6 м.

По расчетной схеме составляется схема замещения, в которой указываются сопротивления всех элементов и намечаются точки для расчета токов КЗ.

Пример расчетной схемы и схемы замещения цеховой электрической сети для расчета тока трехфазного КЗ показан на рисунке 3.2.

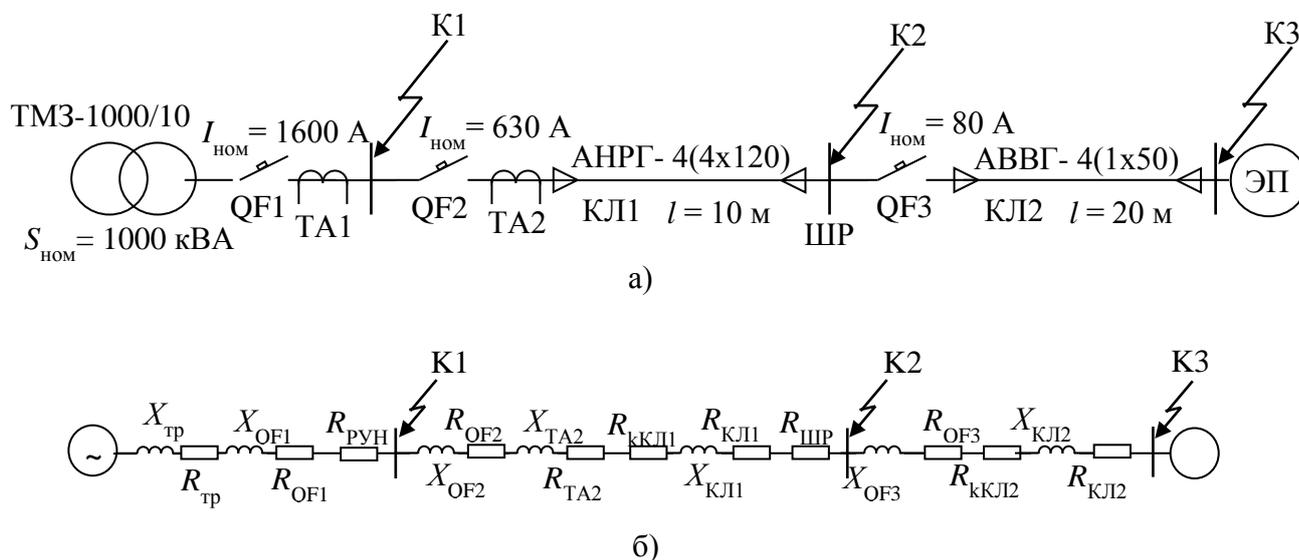


Рис. 3.2 Пример расчетной схемы а) и схемы замещения б) цеховой электрической сети для расчета тока трехфазного КЗ

По требованиям ПУЭ с электрических сетях до 1000 В с глухо заземленной нейтралью применяется защитное зануление. Зануление – это преднамеренное электрическое соединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с нулевым проводом.

Выполнение защитного зануления обеспечивает то, что замыкание любой из фаз на корпус электроустановки превращается в короткое замыкание этой фазы с нулевым проводом. В этом случае в электрической цепи возникает значительно больший, чем при использовании защитного заземления. Основное назначение зануления – быстрое и полное отключение поврежденного оборудования.

В соответствии с требованиями ПУЭ к защитному занулению проводимость петли фаза – нуль (ТП – ЭП – ТП) должна быть такой, при которой ток однофазного КЗ на корпус ЭП $I_{КЗ}^{(1)}$ превышал бы в определенное число раз (k) номинальный ток аппарата защиты сети ($I_{н.вст}$, $I_{н.расц}$):

$$I_{КЗ}^{(1)} \geq k \cdot I$$

Нормированная ПУЭ кратность тока КЗ в зависимости от вида защитного аппарата приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Кратность тока замыкания в зависимости от вида защитного аппарата

Вид защитного аппарата	Кратность тока КЗ для помещений со средой	
	нормальная	взрывопожароопасная
Плавкий предохранитель $I = I_{н.вст}$	$I_{кз}^{(1)} \geq 3 \cdot I_{н.вст}$	$I_{кз}^{(1)} \geq 4 \cdot I_{н.вст}$
Автоматический выключатель с обратной зависимой от тока характеристикой $I = I_{н.расц}$	$I_{кз}^{(1)} \geq 3 \cdot I_{н.расц}$	$I_{кз}^{(1)} \geq 6 \cdot I_{н.расц}$
Автомат только с электромагнитным расцепителем (отсечкой) без зависимой части характеристики $I = I_{уст.сраб.авт}$	$I_{кз}^{(1)} \geq 1.4 \cdot I_{уст.сраб.авт}$ при $I_{на} \leq 100$ А $I_{кз}^{(1)} \geq 1.25 \cdot I_{уст.сраб.авт}$ при $I_{на} > 100$ А	

Для расчета тока однофазного КЗ $I_{кз}^{(1)}$ по ПУЭ рекомендуется следующая упрощенная формула:

$$I_{кз}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{тр}^{(1)}}{3} + Z_{\phi-0}}$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети;

$Z_{\phi-0}$ – полное сопротивление петли «фаза нуль» до точки КЗ, Ом;

$Z_{тр}^{(1)}$ – полное сопротивление трансформатора при однофазном КЗ, Ом (по таблице 3.1).

Полное сопротивление петли фазный – нулевой провод определяется по формуле:

$$Z_{\phi-0} = \sqrt{(R_{\phi} + R_{н} + R_{д} + R_{ТТ} + R_{АВ})^2 + (X' + X'' + X_{с} + X_{ТТ} + X_{АВ})^2}$$

где R_{ϕ} , $R_{н}$ – суммарные активные сопротивления фазного и нулевого проводов всех участков рассматриваемой цепочки (ТП – ЭП – ТП). Для проводов из цветных металлов R_{ϕ} и $R_{н}$ равны омическому сопротивлению при $f = 50$ Гц ($R = \frac{1}{\gamma} \cdot l/S$); $R_{д}$ – сопротивление дуги в точке КЗ (принимается равным 0.03 Ом); $R_{ТТ}$, $X_{ТТ}$ – активное и индуктивное сопротивление трансформатора (по таблице 3.2); $R_{А}$, $X_{А}$ – активное и индуктивное сопротивление автоматических выключателей (по таблице 3.2); $X_{с}$ – сопротивление питающей системы,

принимается равным 0,0032 Ом при мощности КЗ системы 100 и 200 МВА; X' - внешнее индуктивное сопротивление петли фаза-нуль, принимается равным 0.6 Ом/км; X'' - внутреннее индуктивное сопротивление проводов зануления (учитывается только для проводов, выполненных из стали: $X'' = 0.6 \cdot R_{ст}$).

Из рассмотренной методики определения токов КЗ в сетях напряжением до 1 кВ следует:

- ток КЗ в сети напряжением до 1 кВ определяется сопротивлением (мощностью) трансформатора цеховой ТП, сопротивлениями элементов цеховой электрической сети и переходными сопротивлениями (включая сопротивление дуги в месте КЗ);
- поскольку цеховые ТП выпускаются комплектными, то все их оборудование (шкафы высокого и низкого напряжений с установленными в них автоматами, трансформаторами тока, шинами и другими элементами) рассчитано на длительный нормальный режим работы и отвечает требованиям устойчивости к токам КЗ в сети низкого напряжения трансформатора данной мощности;
- если в цеховой электрической сети применяются комплектные магистральные и распределительные шинопроводы, то выбор их по номинальному току позволяет, как правило, удовлетворять и требованиям устойчивости к действию тока КЗ.

Таким образом, во многих случаях отпадает необходимость в проверке оборудования напряжением до 1 кВ на устойчивость к токам КЗ.

Расчет токов КЗ в сети напряжением до 1 кВ является обязательным, если эта сеть выполнена кабелем или проводом в трубах, так как в этом случае необходима проверка сети и защитных аппаратов на термическую и динамическую стойкость, а также обязательно производится проверка цеховой сети 0.38 кВ по условиям срабатывания защиты при однофазных КЗ.

3.2 Методические указания

Исходными данными для выполнения лабораторной работы являются однолинейная схема питания ЭП цеха (рис. 1.3) и результаты лабораторных работ № 1 и №2.

По величине расчетной электрической нагрузки цеха необходимо выбрать мощность силового трансформатора цеховой ТП с учетом следующих положений: подстанция одностранформаторная, большинство ЭП требуют 3-й категории надежности электроснабжения.

По номинальной мощности трансформатора необходимо выбрать вводной автомат цеховой ТП и выбрать его уставки.

Необходимо выполнить расчет токов трехфазного и однофазного КЗ в схеме электрической сети цеха от шин ТП до наиболее мощного ЭП ШР1. Для этого необходимо составить расчетные схемы и схемы замещения для расчета токов трехфазного и однофазного КЗ.

Схемы соединения обмоток силового трансформатора, протяженность питающих и распределительных линий, наличие измерительных приборов в узлах электрической сети принять по таблице 3.5.

Таблица 3.5

Исходные данные для выполнения лабораторной работы

№ варианта	Схема соединения обмоток трансформатора	Длины линий, м		Измерительные приборы в узлах сети	
		РУ НН – ШР1	ШР1– ЭП	РУ НН	ШР1
1	Y/Y _H	50	8	счетчик	амперметр
2	Δ/Y _H	60	4	–	амперметр
3	Y/Y _H	40	12	счетчик	амперметр
4	Δ/Y _H	50	10	–	амперметр
5	Y/Y _H	70	8	счетчик	–
6	Δ/Y _H	25	5	–	–
7	Y/Y _H	35	6	счетчик	–
8	Δ/Y _H	55	9	–	–
9	Y/Y _H	80	4	счетчик	амперметр
10	Δ/Y _H	60	12	–	амперметр
11	Y/Y _H	25	10	счетчик	амперметр
12	Δ/Y _H	40	5	–	амперметр
13	Y/Y _H	25	10	счетчик	–
14	Δ/Y _H	60	5	счетчик	–
15	Y/Y _H	80	15	счетчик	–
16	Δ/Y _H	40	4	счетчик	–
17	Y/Y _H	70	6	счетчик	амперметр
18	Δ/Y _H	85	15	–	амперметр
19	Y/Y _H	50	20	–	амперметр
20	Δ/Y _H	60	12	–	амперметр

Обозначить на расчетной схеме и схеме замещения точки расчета токов КЗ, определить токи КЗ и составить «сводную ведомость токов КЗ».

Проверить уставки всех автоматических выключателей на обеспечение защиты от токов однофазного и трехфазного КЗ.

3.3 Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Расчетную схему и схему замещения с указанием контрольных точек расчета токов КЗ для режимов трехфазного и однофазного замыканий
3. Результаты расчетов сопротивлений схемы замещения
4. Результаты расчетов токов КЗ
5. Сводную ведомость расчета токов КЗ
6. Выводы

3.4 Контрольные вопросы

1. Каковы цели расчета КЗ ?
2. Какие условия и основные допущения принимаются при расчете токов КЗ в системах электроснабжения и почему ?
3. Назовите отличия принципиальной схемы, расчетной схемы и схемы замещения.
4. Почему при моделировании элементов схемы электроснабжения для расчета токов КЗ не учитываются их поперечные составляющие ?
5. В каких случаях допускается не учитывать активные сопротивления элементов схемы электроснабжения ?
6. Объясните понятие ударного тока КЗ, периодической и апериодической составляющих
7. На каких участках электрической сети необходимо определять токи КЗ ?
8. Какое действие оказывают токи КЗ на электрооборудование
9. Способы ограничения токов КЗ в системах электроснабжения
10. Какие особенности моделирования схемы электроснабжения для расчета токов однофазного КЗ
11. Какое влияние оказывает схема соединения обмоток цехового трансформатора на токи однофазного КЗ

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НА ПОТЕРЮ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы – овладение методикой расчета электрической сети на потерю напряжения

4.1 Краткие теоретические сведения

Одним из основных показателей качества электроэнергии является величина подводимого к электроприемникам напряжения. Так как в проводах линий, подводящих к приемникам электрическую энергию, неизбежно происходят потери напряжения, то эти потери нормируются и не должны превышать определенных пределов.

Согласно ПУЭ отклонение величины напряжения от номинального значения должно составлять:

- для силовых сетей не более $\pm 5 \% \cdot U_{\text{ном}}$;
- для осветительных сетей промышленных предприятий и общественных зданий от $+5$ до $-2.5 \% U_{\text{ном}}$;
- для сетей жилых зданий и наружного освещения $\pm 5 \% U_{\text{ном}}$.

Отклонение напряжения – это алгебраическая разность между фактическим напряжением сети и номинальным напряжением на зажимах электроприемника, отнесенная к номинальному напряжению:

$$\Delta U \% = \frac{U_{\text{факт}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%$$

Номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора принимают на $+5 \%$ выше номинального напряжения сети $U_{\text{ном}}$ для компенсации потерь напряжения в сети. Нормально допустимое отклонение напряжения у наиболее удаленного ЭП должно быть не ниже 5% .

Потеря напряжения – это алгебраическая разность напряжений в начале и в конце линии (ΔU):

$$\Delta U \% = \frac{U_1 - U_2}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%$$

Падение напряжения – геометрическая разность между напряжением в начале и конце линии.

$$\bar{U}_{\phi 1} - \bar{U}_{\phi 2} = \bar{I} \cdot Z = \bar{I} \cdot (R + jX)$$

где Z , R , X – полное, активное и реактивное сопротивления линии соответственно, \bar{I} – ток линии.

Схема замещения и векторная диаграмма одной фазы линии с сосредоточенной нагрузкой на ее конце показана на рисунке 4.1.

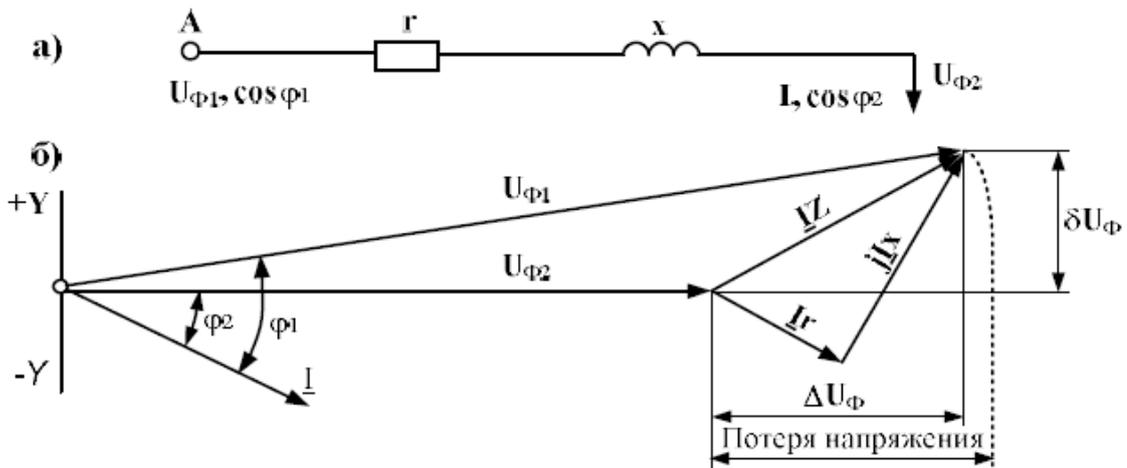


Рис. 4.1 Схема (а) и векторная диаграмма (б) одной фазы линии с нагрузкой на конце

На рис. 4.1 геометрическая разность показана вектором $\vec{I} \cdot Z$ и состоит из продольной составляющей (ΔU_{Φ}) и поперечной составляющей (δU_{Φ}), т.е.

$$\vec{I} \cdot Z = \Delta U_{\Phi} + j \delta U_{\Phi}$$

Поперечная составляющая падения напряжения δU_{Φ} учитывается только для сетей с $U_{\text{ном}} \geq 35$ кВ, при $U_{\text{ном}} < 35$ кВ $\delta U_{\Phi} \ll \Delta U_{\Phi}$ и в расчетах не учитывается.

Для определения продольной и поперечной составляющих спроектируем $I \cdot R$ и $I \cdot X$ соответственно на вещественную и мнимую оси, в результате чего получим:

$$\Delta U_{\Phi} = I \cdot R \cdot \cos \varphi + I \cdot X \cdot \sin \varphi$$

Учтем, что

$$I = \frac{P}{U_{\text{ном}} \cdot \cos \varphi} = \frac{Q}{U_{\text{ном}} \cdot \sin \varphi},$$

и пренебрегая поперечной составляющей, получаем выражение для расчета потери напряжения:

$$\Delta U_{\Phi} = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U_{\text{ном}}}, \text{ В}$$

или

$$\Delta U \% = \frac{100}{U_{\text{ном}}^2} \cdot (P \cdot R + Q \cdot X), \%$$

Для сетей с распределенными нагрузками:

$$\Delta U \% = \frac{100}{U_{\text{ном}}^2} \cdot \sum_{i=1}^n (P_i \cdot R_i + Q_i \cdot X_i), \%$$

где P_i , Q_i – расчетные нагрузки участков линии; R_i , X_i – активное и реактивное сопротивления соответствующих участков линии.

Активные и реактивные сопротивления линий определяются по выражениям:

$$R = r_0 \cdot L; \quad X = x_0 \cdot L$$

где r_0 , x_0 – удельное активное и реактивное сопротивления линии соответствующего участка сети, Ом/км; L – длина соответствующего участка линии, км;

Удельные сопротивления проводов и кабелей определяются по справочной литературе, при отсутствии данных величина r_0 может быть найдена по выражению:

$$r_0 = \frac{1000}{\gamma \cdot S}, \text{ Ом/км}$$

где S – сечение проводника линии (мм^2); γ – удельная проводимость материала проводника:

- для алюминия $\gamma = 30 \text{ м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$;
- для меди $\gamma = 50 \text{ м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$;
- для стали $\gamma = 10 \text{ м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$.

При отсутствии справочных данных x_0 можно принимать по средним значениям:

- для воздушных линий – 0.4 Ом/км;
- для кабельных линий – 0.06–0.08 Ом/км;
- для шинпроводов – 0.15 Ом/км.

В расчетной цепочке ГПП (ЦРП) – удаленный ЭП имеется цеховая ТП, поэтому нужно выполнить расчет падения напряжения в цеховом трансформаторе $U_{\text{тр}}$:

$$\Delta U_{\text{тр}} = \beta \cdot (U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2}{200} \cdot (U_a \cdot \cos \varphi_2 - U_p \cdot \sin \varphi_2)$$

$\Delta U_{\text{тр}}$ – отклонение напряжения на цеховом трансформаторе %;

$\beta = \frac{S_{\text{факт}}}{S_{\text{ном.тр}}}$ – фактический коэффициент загрузки цехового трансформатора, в рассматриваемом режиме работы;

$S_{\text{факт}}$ – полный поток мощности, передаваемый через цеховой трансформатор, кВА,

$S_{\text{ном.тр}}$ – номинальная мощность цехового трансформатора, кВА;

$U_a = \frac{\Delta P_{\text{кз}} \cdot 100}{S_{\text{ном.тр}}}$ – активная составляющая напряжения короткого замыкания цехового трансформатора, %;

$\Delta P_{\text{кз}}$ – потери активной мощности при КЗ, кВт;

$U_p = \sqrt{U_{\text{кз}}^2 - U_a^2}$ – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания цехового трансформатора, %;

$U_{\text{кз}}$ – напряжение короткого замыкания, %;

$\cos \varphi_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{P - \Delta P_{\text{тр}}}{\sqrt{(P - \Delta P_{\text{тр}})^2 + (Q - \Delta Q_{\text{тр}})^2}}$ – коэффициент мощности для

вторичной нагрузки цехового трансформатора,

P , Q – активная и реактивная мощность вторичной обмотки трансформатора, кВт (кВар);

Отклонение напряжения (от $U_{\text{ном}}$) в любой точке сети рассчитывается по выражению:

$$U = U_{\text{цп}} + \delta U - \sum \Delta U, \%$$

где $U_{\text{цп}}$ – отклонение напряжения в центре питания, которое равно +5 % $U_{\text{ном}}$ в режиме максимальных нагрузок и $U_{\text{ном}}$ в режиме минимальных нагрузок сети; δU – «добавка», создаваемая цеховым трансформатором в зависимости от выбранной отпайки; $\sum \Delta U$ – сумма потерь напряжения до какой-либо точки сети, начиная с центра питания (ГПП).

Значение «добавки» регулируется изменениями числа витков первичной обмотки трансформатора, т. е. изменением коэффициента трансформации, по выражению:

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot w_2}{w_1}$$

Для этого у цеховых трансформаторов имеется от 3 до 5 ответвлений, которые переключаются в случае необходимости при отключенном трансформаторе.

Методика расчета электрической сети на потерю напряжения следующая:

1. Составляется схема замещения сети
2. Определяются возможные режимы работы схемы, и для каждого режима определяются расчетные нагрузки.
3. Производится расчет сети на потерю напряжения для каждого режима
4. По данным расчета строится эпюра отклонений напряжения для каждого режима.

Расчет цеховой сети по условиям допустимой потери напряжения и построение эпюры отклонения напряжения выполняется для цепочки линий от шин ГПП или ЦРП до зажимов одного наиболее удаленного от цеховой ТП или наиболее мощного ЭП для режимов максимальных и минимальных нагрузок (определяется из типового суточного графика нагрузок), а в случае двухтрансформаторной подстанции – и послеаварийного.

Пример расчетной схемы электрической сети для ее проверки на допустимую потерю напряжения приведен на рисунке 4.2.

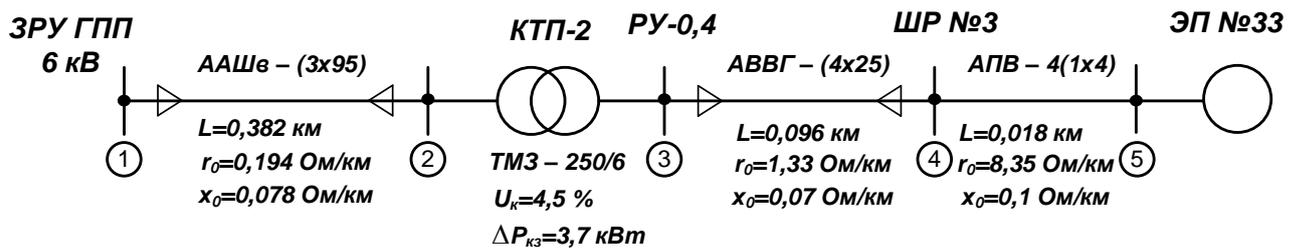


Рис. 4.2 Пример расчетной схемы для построения эпюры напряжения

Нагрузки максимального режима определяются по результатам расчета электрических нагрузок в узлах сети. Величина электрической нагрузки на стороне ВН силового трансформатора складывается из расчетной нагрузки на стороне НН плюс потери в трансформаторе.

Величина потерь активной и реактивной мощности в силовом трансформаторе определяется его каталожными данными и коэффициентом загрузки по выражениям:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_{\text{xx}} + \Delta P_{\text{кз}} \cdot \beta^2, \text{ кВт}$$

$$\Delta Q_{\text{тр}} = \Delta Q_{\text{xx}} + \Delta Q_{\text{кз}} \cdot \beta^2 = S_{\text{ном.тр}} \cdot \frac{I_{\text{xx}}}{100} + S_{\text{ном.тр}} \cdot \frac{U_{\text{кз}}}{100} \cdot \left(\frac{S_{\text{расч}}}{S_{\text{ном.тр}}} \right)^2, \text{ кВар}$$

Технические данные трансформаторов цеховых подстанций приведены в таблице 4.1.

Нагрузки минимального режима определяются по типовому суточному графику нагрузок, характерного для проектируемого предприятия. Типовые графики нагрузок предприятий приводятся в справочниках, они выражаются в относительных единицах или процентах от максимальной нагрузки, что позволяет легко определить по ним значения электрических нагрузок в минимальном режиме.

Таблица 4.1

Технические данные трансформаторов цеховых подстанций

Тип	$S_{\text{ном}}$, кВА	Напряжение обмотки		Потери, кВт		$U_{\text{кз}}$, %	$I_{\text{хх}}$, %
		ВН	НН	ХХ	КЗ		
1	2	3	4	5	6	7	8
Трансформаторы масляные без регулирования напряжения под нагрузкой							
ТМ-25/6-10	25	6; 10	0.4	0.17	0.6	4.5	3.2
ТМ-40/6-10	40	6; 10	0.4	0.24	0.88	4.5	3.0
ТМ-63/6-10	63	6; 10	0.4	0.36	1.28	4.5	2.8
ТМ-100/6-10	100	6; 10	0.4	0.49	1.97	4.5	2.6
ТМ-160/6-10	160	6; 10	0.4; 0.69	0.73	2.65	4.5	2.4
ТМ-250/6-10	250	6; 10	0.4; 0.69	0.945	3.7	4.5	2.3
ТМ-400/6-10	400	6; 10	0.4; 0.69	1.2	5.5	5.5	2.1
ТМ-630/6-10	630	6; 10	0.4; 0.69	1.56	8.5	5.5	2.0
ТМ-1000/6-10	1000	6; 10	0.4	2.45	12.2	5.5	1.4
ТМ-1600/6-10	1600	6; 10	0.4; 0.69	3.3	18	5.5	1.3
ТМ-2500/6-10	2500	6; 10	0.4; 0.69	4.6	25	5.5	1.0
ТСЗ-160/6-10	160	6; 10	0.23; 0.4; 0.69	0.7	2.7	5.5	4.0
ТСЗ-250/6-10	250	6; 10	0.23; 0.4; 0.69	1.0	3.8	5.5	3.5
ТСЗ-630/6-10	630	6; 10	0.4; 0.69	2.0	7.3	5.5	1.5
ТСЗ-1000/6-10	1000	6; 10	0.4; 0.69	3.0	11.2	5.5	1.5
ТСЗ-1600/6-10	1600	6; 10	0.4; 0.69	4.2	16	5.5	1.5
ТМЗ-630/6-10	630	6; 10	0.4	2.3	8.5	5.5	3.2
ТМЗ-1000/6-10	1000	6; 10	0.4	2.45	12.2	5.5	1.4
ТМЗ-1600/6-10	1600	6; 10	0.4	3.3	18	5.5	1.3
ТМФ-160/6-10	160	6; 10	0.4; 0.69	0.51	3.1	4.5	2.4
ТМФ-250/6-10	250	6; 10	0.4; 0.69	0.74	4.2	4.5	2.3
ТМФ-400/6-10	400	6; 10	0.4; 0.69	0.95	5.9	4.5	2.1
ТМФ-630/6-10	630	6; 10	0.4; 0.69	1.31	8.5	5.5	2

Результаты расчета нагрузок в различных режимах сети удобно представить в виде таблицы, пример оформления которой для расчетной схемы сети, представленной на рис. 4.2, приведен ниже..

Таблица 4.2

Расчетные электрические нагрузки в узлах сети

Обозначение участка	1-2	2-3	3-4	4-5
Нагрузка в режимах, кВА				
максимальный	$182.7 + j61$	$180 + j50$	$33.1 + j12.1$	$12 + j5.8$
минимальный	$47.5 + j13.3$	$46.8 + j10.9$	$8.6 + j2.6$	$3.12 + j1.27$
послеаварийный	$365.4 + j122$	$360 + j100$	$33.1 + j12.1$	$12 + j5.8$

После определения электрических нагрузок в узлах сети производится расчет потерь напряжения для каждого режима.

Методика расчета заключается в последовательном определении потерь напряжения на каждом из участков сети, начиная от шин ГПП (узел 1) до отдельного ЭП (узел 5). При этом величина напряжения в начале каждого последующего участка сети принимается равной величине напряжения в конце участка предыдущего. Величину напряжения на стороне НН трансформатора пересчитывают из напряжения ВН через коэффициент трансформации.

Величину напряжения на шинах ГПП принимают постоянной, так как, как правило, трансформаторы ГПП имеют РПН и автоматически поддерживают необходимый уровень напряжения на выходе.

Результаты вычислений заносятся в таблицу (пример ниже), и по ним строится эпюра отклонений напряжений, рисунок 4.3.

Таблица 4.3

Результаты расчётов для построения эпюры отклонений напряжения

Обозначение участка	1-2	2-3	3-4	4-5
Марка кабеля, провода сечение, мм ² длина, м	ААШв (3x95) 382	$S_{\text{ном.тр}}=250\text{кВА}$ $U_{\text{кз}}=4.5\%$ $\Delta P_{\text{кз}}=3.7\text{ кВт}$	АВВГ (4x25) 96	АПВ 4(1x4) 18
Сопротивление, Ом активное реактивное	0.074 0.029	$U_a=1.48\%$ $U_p=4.25\%$	0.128 0.0067	0.13 0.0018
Нагрузка в режимах, кВА максимальный минимальный послеаварийный	$182.7 + j61$ $47.5 + j13.3$ $365.4 + j122$	$180 + j50$ $46.8 + j10.9$ $360 + j100$	$33.1 + j12.1$ $8.6 + j2.6$ $33.1 + j12.1$	$12 + j5.8$ $3.12 + j1.27$ $12 + j5.8$
Потери напряжения, В в максимальном в минимальном в послеаварийном	2.43 0,66 4.91	54.8 29.24 248.7	10.9 2.95 11.25	4.09 1.09 4.21
Отклонение напряжения, % в максимальном в минимальном в послеаварийном	0,47 0,036 0,095	2,82 1,21 5,65	0,32 0,24 0,34	1,34 1,34 1,42

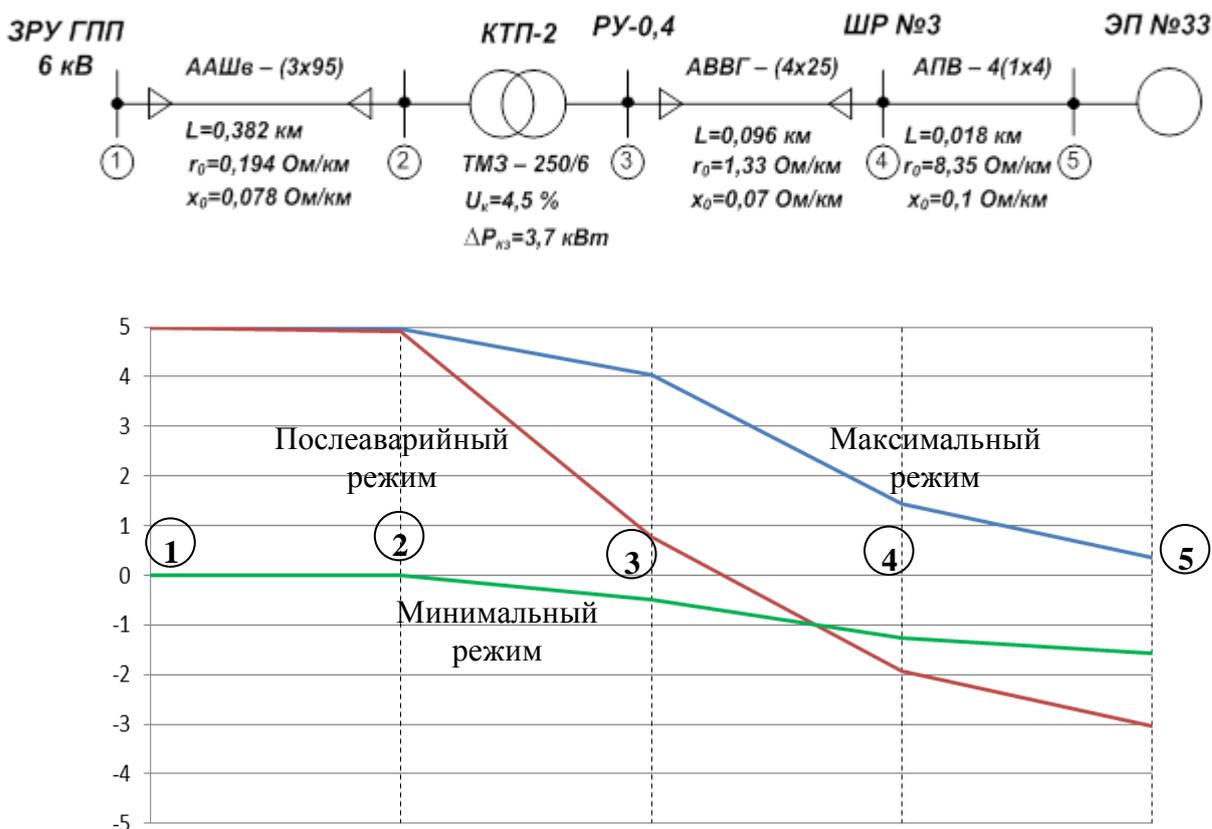


Рис. 4.3 Эпюра отклонений напряжений цеховой сети

В заключении проводится анализ полученных результатов расчета, на основании которого принимается решение о необходимости переключения отпаяк силового трансформатора для режимов максимальных и минимальных нагрузок, или о замене некоторых элементов электрической сети.

4.2 Методические указания

Исходными данными для выполнения лабораторной работы являются результаты лабораторных работ №1 - №3, а также данные о длине линии к цеховой ТП, количестве кабелей в траншее, числе часов использования максимума нагрузки и относительной величине нагрузки предприятия в минимальном режиме, приведенные в таблице 4.1.

Необходимо выполнить расчет электрической сети на потерю напряжения и построить эпюру отклонений напряжения.

Предварительно необходимо выбрать сечение линии питания цеховой ТП с учетом следующих положений: величина напряжения

внутризаводской сети 10 кВ, используется кабель марки ААШв, прокладка в траншее.

Сечение кабельной линии выбирается по экономической плотности тока, в качестве расчетной нагрузки принимается номинальная мощность цехового трансформатора. Для определения нормированной плотности тока использовать табл. 1.3.36 ПУЭ, допустимый длительный ток кабеля найти по табл. 1.3.16 ПУЭ. Поправочный коэффициент на количество работающих кабелей, лежащих рядом в земле, определить по табл. 1.3.26 ПУЭ, приняв расстояние между кабелями в свету, равным 200 мм.

Таблица 4.1

Исходные данные для выполнения лабораторной работы

№ варианта	Длина кабельной линии от ГПП до цеховой ТП, м	Количество кабелей в траншее	Число часов использования максимума нагрузки, час.	Величина электрической нагрузки в минимальном режиме, %	
				<i>P</i>	<i>Q</i>
1	280	2	2500	50	60
2	160	3	4000	60	40
3	200	4	4200	40	30
4	120	3	2400	50	45
5	220	3	6200	70	80
6	180	2	5500	55	40
7	160	6	5000	70	50
8	150	5	4900	55	30
9	240	5	2800	80	60
10	180	4	3500	60	50
11	170	4	4100	45	30
12	250	3	6100	40	60
13	300	4	6000	75	50
14	185	5	5400	60	60
15	160	4	3500	80	70
16	210	3	3200	40	30
17	190	2	2900	70	70
18	230	2	4300	85	80
19	270	6	4400	50	40
20	225	3	4000	60	30

4.3 Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Цель и порядок выполнения работы
2. Расчетную схему сети с указанием контрольных узлов нагрузки
3. Результаты предварительных расчетов
4. Сводную ведомость расчета сети и эпюру отклонений напряжения
5. Выводы

4.4 Контрольные вопросы

1. Как определяются потери напряжения в распределительной сети и какое влияние они оказывают на ее работу??
2. Какие существуют методы регулирования напряжения в электрических сетях?
3. Запишите формулу для вычисления падения напряжения в линии электропередачи.
4. Что понимается под терминами потеря, падение, отклонение напряжения ?
5. Что представляет собой регулятор напряжения РПН, который устанавливается в трансформаторах ?
6. Какой принцип работы устройства РПН ?
7. В чем различие функционирования устройства переключения без возбуждения – ПБВ и устройства РПН?
8. Как подобрать рабочее ответвление на устройстве РПН для поддержания желаемого напряжения на шинах низкого напряжения трансформатора ?
9. За счет чего можно изменять потери напряжения на участке электрической сети ?
10. Каким образом потеря напряжения зависит от $\cos\phi$ нагрузки?

Учебное издание

ОБУХОВ Сергей Геннадьевич

**ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**
Лабораторный практикум

Учебное пособие

Научный редактор *доктор технических наук,*
профессор Б.В.Лукутин

Редактор *С.Г. Обухов*

Компьютерная верстка *С.Г. Обухов*

Дизайн обложки *И.О. Фамилия*

Подписано к печати 05.11.2011. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.

Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru