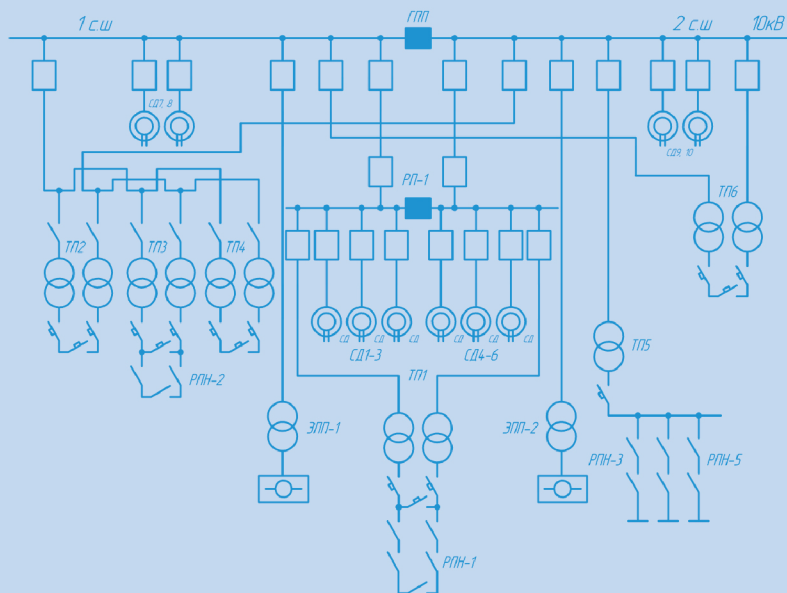


Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Институт энергетики и электротехники  
Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

В.В. Вахнина, А.Н. Черненко

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Электронное учебно-методическое пособие



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2016

ISBN 978-5-8259-0929-5

УДК 658.26 (075.8)

ББК 31.28

#### Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор Саратовского государственного  
технического университета им. Ю.А. Гагарина *И.И. Артюхов*;

д-р техн. наук, профессор Тольяттинского государственного  
университета *А.А. Кувшинов*.

Вахнина, В.В. Проектирование систем электроснабжения : элек-  
тронное учеб.-метод. пособие / В.В. Вахнина, А.Н. Черненко. –  
Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. – 1 оптический диск.

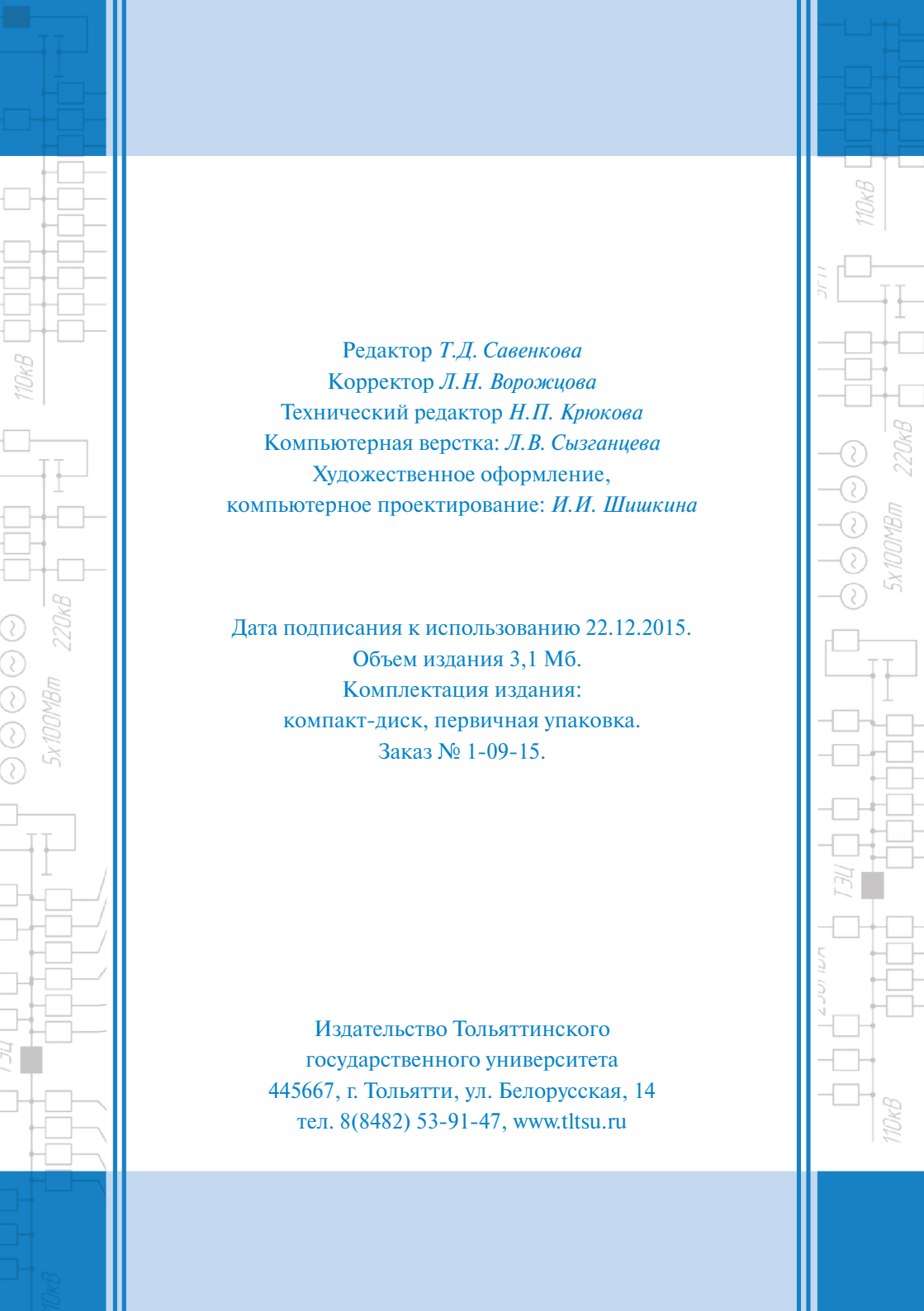
Учебно-методическое пособие содержит основные понятия  
и описание методов проектирования систем электроснабжения  
промышленных предприятий. Представлено их практическое  
применение при решении задач по расчету электрических нагрузок,  
выбору числа, мощности, типа и места установки силовых  
трансформаторов ТП и ГПП, выбору напряжения, схемы внешнего  
и внутреннего электроснабжения и электрооборудования  
системы электроснабжения предприятия.

Предназначено для студентов, обучающихся по направле-  
нию подготовки магистра 13.04.02 «Электроэнергетика и элек-  
тротехника» по магистерской программе «Режимы работы элек-  
трических источников питания, подстанций, сетей и систем»,  
и аспирантов, обучающихся по направлению подготовки 13.06.01  
«Электро- и теплотехника» направленности подготовки «Элек-  
тротехнические комплексы и системы».

Текстовое электронное издание

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый  
компьютер: Windows XP/Vista/7/8; ПIII 500 МГц или эквивалент;  
128 Мб ОЗУ; SVGA; Adobe Reader.



Редактор *Т.Д. Савенкова*  
Корректор *Л.Н. Ворожцова*  
Технический редактор *Н.П. Крюкова*  
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*  
Художественное оформление,  
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 22.12.2015.

Объем издания 3,1 Мб.

Комплектация издания:

компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-09-15.

Издательство Тольяттинского  
государственного университета  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14  
тел. 8(8482) 53-91-47, [www.tltsu.ru](http://www.tltsu.ru)

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ .....	6
2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОЖИДАЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ .....	10
2.1. Общие положения .....	10
2.2. Определение приведенного числа электроприемников .....	12
2.3. Расчет электрических нагрузок по подробно рассчитываемому цеху .....	13
2.4. Расчет электрических нагрузок по предприятию .....	18
2.5. Расчет картограммы электрических нагрузок предприятия .....	21
3. ВЫБОР ЧИСЛА, МОЩНОСТИ И ТИПА ЦЕХОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ С УЧЕТОМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ .....	23
4. ВЫБОР НАПЯЖЕНИЯ, СХЕМЫ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ТРАНСФОРМАТОРОВ ГЛАВНОЙ ПОНИЗИТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ .....	28
5. ВЫБОР НАПЯЖЕНИЯ И СХЕМЫ ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ, РАСЧЕТ ПИТАЮЩИХ ЛИНИЙ.....	33
5.1. Выбор напряжения распределительной сети предприятия .....	33
5.2. Выбор схемы внутреннего электроснабжения предприятия .....	34
5.3. Выбор схемы внутрицехового электроснабжения предприятия .....	36
5.4. Конструктивное исполнение электрической сети .....	38
5.5. Расчет питающих линий .....	40
6. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ .....	44
6.1. Общие положения и допущения .....	44
6.2. Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением выше 1 кВ .....	44
6.3. Особенности расчетов токов КЗ в сетях напряжением до 1 кВ .....	53
7. ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ .....	66
8. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ .....	71
Библиографический список .....	76

## ВВЕДЕНИЕ

Рационально спроектированная система электроснабжения должна удовлетворять ряду требований – высокой надежности и экономичности, безопасности и удобству эксплуатации; обеспечивать требуемое качество электроэнергии, соответствующие уровни напряжения и т. д. Многообразие факторов, которые необходимо учитывать при проектировании электроснабжения предприятий разных отраслей промышленности, повышает требования к магистрантам.

Цель данного курса – обучить студентов и аспирантов особенностям проектирования систем внешнего и внутреннего электроснабжения; созданию экономически обоснованных режимов работы систем электроснабжения (СЭС).

В результате изучения курса студенты и аспиранты должны знать:

- ◆ порядок разработки электротехнических проектов, технических условий, стандартов и технических описаний;
- ◆ методические, нормативные и руководящие материалы, касающиеся выполняемой работы, методы исследования, правила и условия выполнения работ;
- ◆ методы проведения технических расчетов и определения технико-экономической эффективности исследований и разработок.

## 1. ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Приемником электрической энергии (электроприемником) называют аппарат, агрегат и др., предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии.

По технологическому назначению электроприемники (ЭП) классифицируются в зависимости от вида энергии, в которую данный ЭП преобразует электроэнергию: электродвигатели приводов машин и механизмов, электротермические установки, электросварочные установки, устройства электрофизической и электрохимической обработки материалов, электрическое освещение и др.

В табл. 1 приведены ориентировочные данные о соотношении нагрузок ЭП на предприятиях различных отраслей промышленности.

Таблица 1

Соотношение нагрузок ЭП на предприятиях различных  
отраслей промышленности

Отрасли промышленности	Соотношение нагрузок ЭП, %								
	СД 6–10 кВ	АД		Освещение	ДСП	Печи сопротив- ления	Сварка	Преобразова- тельные агрегаты	Прочая нагрузка
		6–10 кВ	0,4 кВ						
Металлургия	25	10	37	3	4	7	3	11	–
Химическая промышленность	40	24	29	2	–	2	1	2	–
Машиностроение	8	5	52	5	7	8	14	3	–
Нефтедобывающая промышленность	8	48	30	5	–	–	–	–	9
Нефтеперерабатывающая промышленность	26	18	50	2	–	–	–	–	–
Газовая промышленность	40	58	–	2	–	–	–	–	–
Легкая промышленность	–	6	78	–	12	–	–	–	12
Горнорудная промышлен- ность	21	21	47	5	–	–	–	–	6

При анализе табл. 1 видно, что для машиностроения характерно наличие электроприемников всех типов, причем электродвигатели переменного тока являются основным видом ЭП, на долю которых приходится около 2/3 суммарной мощности. Электротермия, электросварка, преобразовательные агрегаты составляют около 1/3 суммарной промышленной нагрузки.

Основные цеха на машиностроительных предприятиях – литейные, сварочные, термические, механические, прессовые, сборочные, инструментальные и др. [25]. В зависимости от отрасли машиностроения и профиля предприятия ряд из указанных цехов может отсутствовать или на предприятии могут быть и другие цеха.

Основными электроприемниками литейных цехов являются дуговые электропечи, индукционные печи, печи сопротивления, а также электроприемники с электродвигателями: формовочные линии, смесеприготовительные линии, конвейеры и транспортеры, агрегатные станки, вентиляция, насосы, краны.

Мощность дуговых сталеплавильных печей (ДСП) на машиностроительных предприятиях достигает 25 МВА. Для них характерен резкопеременный режим работы. В СЭС с этими ЭП возникают отклонения напряжения, колебания напряжения и частоты, несинусоидальность кривой напряжения и тока, несимметрия фазных и линейных напряжений и токов. В этих условиях резко ухудшаются условия работы не только указанных ЭП, но и нарушается режим работы «спокойных» нагрузок. Электроприводы вентиляторов и насосов имеют диапазон мощностей 0,18...200 кВт, режим их работы продолжительный, напряжение питания в основном 380 В. Мощности приводов, транспортеров, конвейеров составляют 1,7...40 кВт. Мощность приводов смесеприготовительных и формовочных линий достигает 160 кВт.

В сварочных цехах основными электроприемниками являются электросварочные установки дуговой и контактной сварки. Для дуговой сварки применяются источники питания постоянного тока (электромашинные преобразователи, сварочные выпрямители) и переменного тока (однофазные и трехфазные трансформаторы). Электромашинные преобразователи состоят из генератора посто-

янного тока и приводного асинхронного двигателя мощностью до 55 кВт. Мощность сварочных выпрямителей достигает 40 кВА, сварочных трансформаторов – 165 кВА. Напряжение питания установок дуговой сварки переменное, 380 В. Установки контактной сварки делятся на одноточечные, рельефные, шовные, стыковые, многоточечные, которые могут быть объединены в автоматические сварочные линии. Мощность питания установок контактной сварки 3...1000 кВА, сварочных линий достигает 20 000 кВА. Напряжение питания переменное, 380 В.

Электросварочные установки по характеру своей работы и особенностям вольт-амперных характеристик оказывают существенное влияние на питающую электрическую сеть, ухудшая такие показатели качества электроэнергии, как колебания, несинусоидальность и несимметрия напряжения. Установки дуговой сварки переменного тока воздействуют на СЭС аналогично ДСП. Нелинейная вольт-амперная характеристика сварочной дуги обуславливает появление в сети значительного уровня высших гармоник тока и напряжения. Поскольку сварочные установки в большинстве случаев представляют собой однофазную и двухфазную нагрузки и, как правило, неравномерно распределены по фазам, то возникает несимметрия напряжения. Кроме того, изменение нагрузки фаз происходит независимо и случайно. Влияние сварочных электроустановок на качество СЭС особенно возрастает при их мощности более 500 кВА.

Основными электроприемниками термических цехов являются печи сопротивления, соляные ванны, закалочные установки, насосы, моечные машины, тельферы. Напряжение питания большинства электроприемников переменное, 380 В. Закалочные установки питаются от электромашинных, тиристорных и ламповых преобразователей частоты. Режим работы большинства электроприемников продолжительный, хотя имеются электроприемники с повторно-кратковременным режимом.

Основными электроприемниками прессовых цехов являются прессы, приводы устройств подачи металла, металлообрабатывающие станки, вентиляторы, насосы, краны. Кривошипные прессы холодной штамповки имеют мощность приводов до 180 кВт, горя-



чештамповочные – до 500 кВт. Наиболее мощными являются гидро-прессы, мощность двигателей насосных станций составляет 250–1500 кВт. Режим работы прессов – повторно-кратковременный, напряжение питания переменного тока – 380 В, 6 и 10 кВ. Мощность приводов устройств подачи металла достигает 200 кВт. Металлообрабатывающие станки имеют привода мощностью 1...55 кВт.

В механических и сборочных цехах располагаются различные виды станков и автоматических линий. Средняя мощность станков массового машиностроения составляет 6...22 кВт, крупного машиностроения – 15...40 кВт. Напряжение питания станков переменное, 380 В. Режим работы продолжительный и повторно-кратковременный.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОЖИДАЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

### 2.1. Общие положения

Определение расчетной нагрузки на различных ступенях системы электроснабжения промышленных предприятий рекомендуется проводить по методике, изложенной в РТМ 36.18.32.4-92 «Указания по расчету электрических нагрузок» [8].

**Расчетная активная нагрузка группы силовых трехфазных электроприемников** на всех ступенях питающих и распределительных сетей находится по формуле:

$$P_p = K_p \cdot K_{\text{И}} \cdot P_{\text{Н}}, \quad (2.1)$$

где  $K_p$  – коэффициент расчетной мощности активной нагрузки при длительности интервала осреднения 30 минут;  $K_{\text{И}}$  – групповой коэффициент использования;  $P_{\text{Н}}$  – номинальная активная мощность этой группы, приведенная к проценту включения (ПВ) = 100 %.

Расчетная реактивная нагрузка группы электроприемников принимается:

при  $n_{\text{Э}} \leq 10$

$$Q_p = 1,1 \cdot P_{\text{Н}} \cdot K_{\text{И}} \cdot \text{tg } \varphi; \quad (2.2)$$

при  $n_{\text{Э}} > 10$

$$Q_p = P_{\text{Н}} \cdot K_{\text{И}} \cdot \text{tg } \varphi, \quad (2.3)$$

где  $\text{tg } \varphi$  – коэффициент реактивной мощности рассматриваемой группы электроприемников.

Полная расчетная нагрузка группы трехфазных электроприемников определяется выражением:

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}. \quad (2.4)$$

Информация о коэффициентах использования  $K_{\text{И}}$  и коэффициентах мощности  $\cos \varphi$  как для отдельных электроприемников, так и для характерных цехов по отраслям промышленности приводится в справочниках [20; 22]. Из-за многообразия наименований электроприемников и цехов не для всех можно найти справочные данные о  $K_{\text{И}}$  и  $\cos \varphi$ . В этом случае они принимаются равными соот-

ветствующим данным для электроприемников и цехов, схожих по режиму работы.

Расчетные кривые и таблицы для определения коэффициента расчетной мощности  $K_p = f(n_{\text{э}}, K_{\text{и}})$  приводятся в РТМ 36.18.32.4-92 и второй редакции пособия к «Указаниям по расчету электрических нагрузок».

**Выбор освещения производственных и вспомогательных помещений, выбор мощности светильников** производится в соответствии с нормами проектирования искусственного освещения.

Расчет производится методом коэффициента использования светового потока или по удельной осветительной нагрузке на единицу производственной поверхности пола.

При расчете осветительной нагрузки методом коэффициента использования [15; 20; 23] световой поток ламп в каждом светильнике, необходимый для создания заданной минимальной освещенности  $E_{\text{н}}$ , определяется по формуле:

$$\Phi = \frac{E_{\text{н}} \cdot K_{\text{зап}} \cdot F \cdot z}{N \cdot \eta}, \quad (2.5)$$

где  $K_{\text{зап}}$  – коэффициент запаса;  $F$  – площадь освещаемой поверхности;  $z = E_{\text{ср}}/E_{\text{н}}$  – коэффициент минимальной освещенности;  $E_{\text{ср}}$  – средняя освещенность;  $N$  – число светильников;  $\eta$  – коэффициент использования светового потока источника света.

По значению  $\Phi$  выбирается стандартная лампа так, чтобы световой поток отличался от расчетного значения  $\Phi$  на  $-10...+20$  %. При невозможности выбора источника света с таким приближением корректируется число светильников.

Коэффициент использования светового потока  $\eta$  является функцией индекса помещения  $i$ , который определяется по выражению:

$$i = \frac{L_{\text{ц}} \cdot B_{\text{ц}}}{h(L_{\text{ц}} + B_{\text{ц}})}, \quad (2.6)$$

где  $L_{\text{ц}}$  – длина помещения;  $B_{\text{ц}}$  – ширина помещения;  $h$  – расчетная высота подвеса светильника.

Мощность освещения определяется следующим образом:

$$P_{\text{осв}} = K_{\text{и}} \cdot N \cdot P_{\text{св}}. \quad (2.7)$$

Расчетная нагрузка осветительных электроприемников по удельной осветительной нагрузке на единицу производственной поверхности пола определяется с учетом коэффициента спроса:

$$P_{\text{осв}} = K_c \cdot P_{\text{yo}} \cdot F_n, \quad (2.8)$$

где  $K_c$  – коэффициент спроса по активной мощности осветительной нагрузки;  $P_{\text{yo}}$  – удельная осветительная нагрузка на 1 м<sup>2</sup> производственной поверхности пола цеха;  $F_n$  – площадь поверхности пола цеха.

Информация о типах ламп и светильников, коэффициентах использования светового потока  $\eta$ , удельной осветительной нагрузке  $P_{\text{yo}}$ , коэффициентах спроса  $K_c$  приводится в справочниках [15; 20; 23].

## 2.2. Определение приведенного числа электроприемников

Эффективное число электроприемников (ЭП)  $n_{\text{э}}$  рекомендуется определять по выражению

$$n_{\text{э}} = \frac{(\sum P_n)^2}{\sum n p_n^2}, \quad (2.9)$$

где  $P_n$  – групповая номинальная (установленная) активная мощность;  $p_n$  – номинальная (установленная) мощность одного электроприемника;  $n$  – число электроприемников.

При значительном числе электроприемников (магистральные шинопроводы, шины цеховых трансформаторных подстанций, в целом по цеху, корпусу, предприятию) эффективное число электроприемников можно определить по упрощенному выражению

$$n_{\text{э}} = \frac{2 \sum P_n}{p_{\text{н.макс}}}, \quad (2.10)$$

где  $p_{\text{н.макс}}$  – номинальная мощность наиболее мощного ЭП группы.

Найденное по указанным выражениям значение  $n_{\text{э}}$  округляется до ближайшего меньшего целого числа. При  $n_{\text{э}} \leq 4$  рекомендуется пользоваться номограммой.

Если найденное по упрощенному выражению число  $n_{\text{э}}$  окажется больше  $n$ , то следует принимать  $n_{\text{э}} = n$ .

Если  $p_{\text{н.макс}}/p_{\text{н.мин}} \leq 3$ , где  $p_{\text{н.мин}}$  – номинальная мощность наименее мощного ЭП группы, также принимается  $n_{\text{э}} = n$ .

### 2.3. Расчет электрических нагрузок по подробно рассчитываемому цеху

Для определения расчетных (максимальных) нагрузок на различных ступенях системы электроснабжения используется таблица по форме Ф636-92 [8] (табл. 2).

Порядок заполнения таблицы следующий.

Выделяются электроприемники, питающиеся от рассматриваемого узла системы электроснабжения – шинпровода, распределительного пункта, трансформатора трансформаторной подстанции. В графу 1 табл. 2 записываются наименование узла нагрузки, отдельные электроприемники или группы электроприемников с одинаковыми значениями  $K_{и}$  и  $\cos\varphi$ , запитанные от данного узла нагрузки.

В графе 2 указывается количество рабочих электроприемников.

В графу 3 по каждой подгруппе электроприемников записываются: при одинаковой мощности электроприемников – номинальная установленная мощность в кВт одного электроприемника, а при электроприемниках различной мощности – номинальные мощности наименьшего и наибольшего. Установленные мощности должны быть приведены к  $P_{В} = 100 \%$ .

В графе 4 приводится суммарная установленная мощность электроприемников всей подгруппы.

Графы 5 и 6. Значения коэффициентов использования  $K_{и}$  и мощности  $\cos\varphi$  находятся по справочникам [20; 22].

Графа 7. Произведение суммарной установленной мощности электроприемников всей подгруппы и коэффициента использования:

$$K_{и} \text{ (из графы 5)} \cdot P_{н} \text{ (из графы 4)}. \quad (2.11)$$

Графа 8. Произведение суммарной установленной мощности электроприемников всей подгруппы, коэффициента использования и коэффициента мощности:

$$K_{и} \cdot P_{н} \text{ (из графы 7)} \cdot \text{tg}\varphi \text{ (из графы 6)}. \quad (2.12)$$

Графа 9. Произведение количества рабочих электроприемников и квадрата номинальной установленной мощности одного электроприемника:

$$n \text{ (из графы 2)} \cdot p_{н}^2 \text{ (из графы 3, возведенное в квадрат)}. \quad (2.13)$$

Таблица 2

## Расчетные нагрузки на различных ступенях системы электроснабжения

Наименование ЭП	Исходные данные				по справочным данным				Расчетные величины			Расчетная мощность			Расчет- ный ток, А $I_r$
	по заданию технологов	Количество ЭП, шт. * $n$	Номинальная (установленная) мощность, кВт*		Коэффи- циент исполь- зования $K_{и}$	Коэффи- циент реактивной мощности $\cos\varphi/\text{tg}\varphi$	$K_{и} P_{н}$	$K_{и} P_{н} \text{tg}\varphi$	$n P_{н}^2$	Эффективное число ЭП* $n_p$	Коэффициент расчетной нагрузки $K_p$	$P_p$ активная, кВт	$Q_p$ реактивная, квар**	$S_p$ полная, кВА	
			ЭП $P_{н}$	общая $P_{н}$											
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
ШМА 1/1															
ШРА 1/1-1															
Раздаточные печи	3	94	282	0,7	0,95/0,33	197,4	64,9	26508							
Кокильные станки	6	11,1	66,6	0,21	0,9/0,484	14	6,8	739							
<b>Итого по ШРА 1/1-1</b>	9	94/11,1	348,6	0,61	-/0,339	211,4	71,7	27247	4	1,12	236,8	78,8	249,6	379	
ШРА 1/1-2															
Задвижки	4	8,25	33	0,7	0,8/0,75	23,1	17,3	272							
Вентиляционная система	1	17	17	0,7	0,8/0,75	11,9	8,9	289							
Раздаточные печи	3	50	150	0,7	0,95/0,33	105	34,5	7500							
Кокильные станки	6	11,1	66,6	0,21	0,9/0,484	14	6,8	739							
<b>Итого по ШРА 1/1-2</b>	14	50/8,25	266,6	0,58	-/0,438	154	67,5	8800	8	1,03	158,6	74,3	175,5	266	
ШРА 1/1-3															
Раздаточные печи	2	108	216	0,7	0,95/0,33	151,2	49,7	23328							
Карусельный станок	2	8,5	17	0,76	1,0/0	12,9	0	144,5							
<b>Итого по ШРА 1/1-3</b>	4	108/8,5	233	0,7	-/0,303	164,1	49,7	23473	2	1,14	187,1	54,7	194,9	296	

Исходные данные		Расчетные величины						Расчетная мощность				Расчетный ток, А $I_{\text{р}}$		
		по заданию технологов		по справочным данным		$K_{\text{и}} P_{\text{н}} \text{тгр}$	$n \cdot P_{\text{н}}^2$	Эффективное число ЭП* $n_{\text{э}}$	Коэффициент нагрузки $K_{\text{р}}$	активная, кВт $P_{\text{р}}$	реактивная, квар** $Q_{\text{р}}$		полная, кВА $S_{\text{р}}$	
Наименование ЭП	Количество ЭП, шт. $n$	Номинальная (установленная) мощность, кВт* общая $P_{\text{н}}$	Коэффициент использования $K_{\text{и}}$	Коэффициент реактивной мощности $\cos\varphi/\text{тгр}$	$K_{\text{и}} P_{\text{н}}$							$K_{\text{и}} P_{\text{н}} \text{тгр}$		$n \cdot P_{\text{н}}^2$
						1	2	3	4	5	6		7	
ШРА 1/1-4 Стержневые машины	12	19,2/ 22	245,6	0,8	0,8/0,75	196,5	147,4	5027						
Бегуны	1	18	18	0,7	0,8/0,75	12,6	9,5	324						
Тележка	1	4	4	0,55	0,75/0,88	2,2	1,9	16						
Автоматическая линия	1	37	37	0,55	0,75/0,88	20,4	17,9	1369						
Тельфер	1	2,2	2,2	0,1	0,5/1,17	0,2	0,3	5						
Агрегатный станок	1	40	40	0,7	0,8/0,75	28,0	21,0	1600						
Вентильная система	1	22	22	0,7	0,8/0,75	15,4	11,6	484						
<b>Итого по ШРА 1/1-4</b>	18	40/2,2	368,8	0,75	-/0,76	275,3	209,6	8825	15	1	275,3	209,5	345,9	526
<b>Итого по ШМА 1/1</b>	45	108/2,2	1217	0,66	-/0,5	804,8	398,5	-	22	0,9	724,3	362,2	809,8	1230
<b>Итого по цеху</b>	106	120/0,5	2456	0,56	-/0,46	1378	634,4	-	40	0,83	1143,7	526,1	1258,9	1913

\* Резервные ЭП, а также ЭП, работающие кратковременно, в расчете не учитываются.

\*\* При расчете электрических нагрузок для магистральных шинопроводов, на шинах цеховых трансформаторных подстанций, в целом по цеху, корпусу, предприятию допускается определять  $n_{\text{э}}$  по выражению:  $n_{\text{э}} = 22 P_{\text{н}} / P_{\text{н, макс}}$ ; расчетная реактивная мощность принимается равной  $Q_{\text{р}} = K_{\text{р}} K_{\text{и}} P_{\text{н}} \text{тгр} = P_{\text{р}} \text{тгр}$ .

После определения значений в графах 7 и 8 по отдельным электроприемникам и подгруппам электроприемников производится расчет для группы электроприемников рассматриваемого узла нагрузки.

**Итоговая строка «Итого по ШРА».** В графе 2 итоговой строки суммируется общее число электроприемников данной группы. В графе 3 записываются номинальные мощности наибольшего и наименьшего электроприемников группы. В графе 4 – суммарная номинальная мощность всей группы. Для заполнения граф 5 и 6 итоговой строки необходимо предварительно подвести итоги по графам 7 и 8 – просуммировать по вертикали полученные значения. По полученным данным определяется среднее значение коэффициента использования по группе (графа 5):

$$K_{\text{иср}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{\text{Ит}} P_{\text{Ит}} (\text{из графы 7})}{\sum_{i=1}^m P_{\text{Ит}} (\text{из графы 4})} \quad (2.14)$$

и среднее значение  $\text{tg} \varphi_{\text{CP}}$  (графа 6):

$$\text{tg} \varphi_{\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{\text{Ит}} P_{\text{Ит}} \text{tg} \varphi_i (\text{из графы 8})}{\sum_{i=1}^n K_{\text{Ит}} P_{\text{Ит}} (\text{из графы 7})}. \quad (2.15)$$

Графа 9. Сумма по вертикали полученных значений.

Графа 10. Определяется приведенное число электроприемников  $n_{\text{э}}$  рассматриваемой группы (см. п. 2.2).

Графа 11. Коэффициент расчетной нагрузки  $K_{\text{р}}$  находится по соответствующей кривой  $K_{\text{р}} = f(n_{\text{э}}, K_{\text{иср}})$  или таблице, при этом коэффициент  $K_{\text{иср}}$  берется из графы 5 итоговой строки, а число  $n_{\text{э}}$  – из графы 10.

Графа 12. Расчетная активная нагрузка трехфазных электроприемников, подключенных к ШРА:

$$P_{\text{р}} = K_{\text{р}} (\text{из графы 11}) \cdot \sum_{i=1}^n K_{\text{Ит}} P_{\text{Ит}} (\text{из графы 7}). \quad (2.16)$$

Графа 13. Расчетная реактивная нагрузка трехфазных электроприемников узла нагрузки вычисляется по одному из выражений (2.2) или (2.3).



В графы 14 и 15 записываются полная расчетная нагрузка  $S_p$ , определяемая по выражению (2.4), и расчетный ток  $I_p$  для электроприемников рассчитываемого узла нагрузки:

$$I_p = \frac{S_p}{\sqrt{3}U_H}. \quad (2.17)$$

**Итоговая строка «Итого по ШМА»** получается соответствующей обработкой расчетных данных итоговых строк по всем ШРА, а именно:

- суммируются номинальные мощности  $P_H$ , произведения  $K_{И} \cdot P_H$  и  $K_{И} \cdot P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi$ ;
- вычисляются средние по ШМА значения коэффициентов  $K_{ИСР}$   $\operatorname{tg} \varphi_{СР}$ ;
- определяется приведенное число электроприемников  $n_{\Sigma}$ , подключенных к магистральному шинопроводу;
- находится значение коэффициента расчетной нагрузки  $K_p$  как функция  $K_p = f(n_{\Sigma}, K_{ИСР})$ ;
- вычисляется полная расчетная нагрузка ШМА  $S_p$  и расчетный ток  $I_p$ .

Полученные данные используются для выбора коммутационных аппаратов, питающих кабелей, шинопроводов отделения цеха предприятия.

Подобным образом рассчитываются электрические нагрузки по остальным магистральным шинопроводам, распределительным пунктам и щитам управления 0,4 кВ, а также щитам низкого напряжения цеховых трансформаторных подстанций (ТП) 6...10/0,4 кВ.

Осветительная нагрузка цеха записывается отдельной строкой.

Для определения расчетной нагрузки в целом по цеху предприятия суммируются номинальные активные мощности по всем ТП, произведения  $K_{И} \cdot P_H$  и  $K_{И} \cdot P_H \cdot \operatorname{tg} \varphi$  и вычисляются средние для цеха значения коэффициентов  $K_{ИСР}$ ,  $\operatorname{tg} \varphi_{СР}$ ,  $\cos \varphi_{СР}$ . Далее определяют с учетом осветительной нагрузки полную расчетную мощность  $S_p$  и расчетный ток  $I_p$  цеха.

Расчетные данные  $P_p$ ,  $Q_p$ ,  $S_p$ ,  $I_p$  используются в дальнейшем для выбора цеховых трансформаторов, а также коммутационных и защитных аппаратов и питающих линий.

Пример расчета электрических нагрузок трехфазных электроприемников по цеху приведен в табл. 2.

## 2.4. Расчет электрических нагрузок по предприятию

В курсовом проекте этот расчет проводится по укрупненным данным.

Низковольтные и высоковольтные электроприемники рассчитываются отдельно, результаты сводятся в форму, приведенную в табл. 3.

Расчет начинается с определения низковольтных нагрузок по цехам. Так как для каждого цеха известны суммарные установленные мощности всех низковольтных электроприемников  $P_H$ , необходимо, исходя из технологических особенностей и состава электрооборудования цеха, определить по справочникам коэффициенты использования  $K_{И}$  и мощности  $\cos\varphi$  электроприемников цеха. Для каждого цеха вычисляются произведения  $K_{И} \cdot P_H$  и  $K_{И} \cdot P_H \cdot \operatorname{tg}\varphi$ , определяется приведенное число электроприемников  $n_э$ . Число  $n_э$  для большинства цехов находится в пределах от 20 до 100. Затем с использованием значений  $n_э$  и  $K_{И}$  по кривым или таблицам находится коэффициент расчетной нагрузки  $K_p$  и определяются расчетные активная  $P_p$  и реактивная  $Q_p$  нагрузки.

Расчетная осветительная нагрузка  $P_{осв}$  вычисляется по выражениям (2.7) или (2.8). После суммирования нагрузок  $P_p$ ,  $P_{осв}$  и  $Q_p$ ,  $Q_{осв}$  находится полная расчетная низковольтная нагрузка цеха  $S_p$ .

После нахождения нагрузок всех цехов рассчитывается строка «Итого по нагрузке 0,4 кВ», в которой суммируются по колонкам номинальные активные  $P_H$  мощности, произведения  $K_{И} \cdot P_H$  и  $K_{И} \cdot P_H \cdot \operatorname{tg}\varphi$  и расчетные осветительные  $P_{осв}$  нагрузки. Далее вычисляются коэффициенты  $K_{И}$ ,  $\cos\varphi$  и  $\operatorname{tg}\varphi$ , приведенное число электроприемников  $n_э$  и находится коэффициент расчетной нагрузки  $K_p$  для электроприемников напряжением до 1000 В предприятия. Определяется активная  $P_p$ , реактивная  $Q_p$  и полная  $S_p$  нагрузки для низковольтных электроприемников предприятия.

Таблица 3

## Пример расчета электрических нагрузок по предприятию

№ п/п	Наименование цехов и узлов СЭСПП	$P_{\Sigma}$ , кВт	$P_{\Sigma \Delta}$ , кВт	$n_{\Sigma}$	$K_{\Sigma}$	$\frac{\cos \varphi}{\operatorname{tg} \varphi}$	$K_{\Sigma} \cdot P_{\Sigma}$ , кВт	$K_{\Sigma} \cdot P_{\Sigma} \cdot \operatorname{tg} \varphi$ , квар	$K_p$	$P_p$ , кВт	$P_{p \cdot \Delta}$ , кВт	$P_p + P_{p \cdot \Delta}$ , кВт	$Q_p$ , квар	$S_p$ , кВА
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	<b>Нагрузка 0,4 кВ</b>													
1	Аппаратный цех	2380	47,6	50	0,5	0,75/0,86	1190	1047	0,75	892,5	33	925,5	795,9	1220,7
2	Штамповочный цех	3160	31,6	100	0,3	0,60/1,33	948	1260	0,7	663,6	52	715,6	951,7	1190,8
3	Термический цех	3300	41,25	80	0,75	0,85/0,62	2475	1534	0,8	1980	53	2033	1260,5	2392
8	Компрессорная станция	800	80	10	0,8	0,80/0,75	640	480	0,9	576	23	599	449,3	748,8
14	Склад продукции	65	8,5	10	0,1	0,80/0,75	8,5	6,4	1	8,5	9,2	17,7	13,3	22,1
17	РМЦ	1754	29,9	58	0,238	0,64/1,20	416,9	503,9	0,66	275,2	—	275,2	330,2	429,8
18	Насосная станция	518	21,6	24	0,687	0,49/1,77	356,3	632,3	0,9	320,7	11,5	332,2	587,9	675,3
	Освещение территории	—	—	—	—	—	—	—	—	—	33	—	—	33
	<b>Итого по нагрузке 0,4 кВ</b>	11977	80...8,5	—	0,44	0,77/0,82	6026,2	5463,6	—	4716,4	214,7	4931,1	4388,8	6601,3
	<b>Нагрузка 10 кВ</b>													
8	Компрессорная станция (СТД-14-3б-12)	5040	630	8	0,8	0,90/-0,48	4032	-1935						
11	Кислородная установка (АН-2)	1500	250	6	0,8	0,88/0,54	1200	648						
13	Сталеплавильный цех (ЭТМПК-2700/10)	7200	1800	4	0,65	0,87/0,57	4680	2667						
	<b>Итого по нагрузке 10 кВ</b>	13740	1800...250	18	0,721	0,99/0,14	9912	1380	0,9	8920,8	—	8920,8	1242	9006,8
	<b>Итого по предприятию</b>	25717	1800...8,5	—	0,62	0,92/0,429	15938,2	6843,6	—	13637,2	214,7	13851,9	5630,8	14953

Для расчета электрических нагрузок высоковольтных электроприемников необходимо по заданной в варианте их суммарной номинальной мощности подобрать конкретные синхронные и асинхронные двигатели, различного рода электротехнологические установки (электропечные трансформаторы, электролизные установки и т. д.), которые выбираются в соответствии с технологией производства предприятия. При этом возможно незначительное изменение заданной в варианте номинальной мощности с учетом мощности выбранных электроприемников.

Определение расчетной нагрузки высоковольтных электроприемников производится так же, как и низковольтных. Методика расчета зависит от числа электроприемников, режима их работы, соотношения номинальных мощностей отдельных электроприемников.

Реактивные нагрузки электроприемников, работающие с опережающим током, вычитаются из прочих реактивных нагрузок.

Особенности расчета нагрузок электроприемников большой мощности с резкопеременными графиками нагрузок (дуговые сталеплавильные печи, крупные сварочные установки, прокатные станы и др.) рассматриваются в специальной литературе [13; 14; 16].

При получении от технологов коэффициентов, характеризующих реальную загрузку электродвигателей, в графу 6 табл. 3 заносится вместо  $K_{И}$  значение  $K_3$ , в графу 8 – значение  $K_3 P_{Н}$ .

Определяется число присоединений 6–10 кВ на сборных шинах распределительного пункта (РП) или главной понизительной подстанции (ГПП) (графа 5 итоговой строки). Резервные ЭП не учитываются.

В зависимости от числа присоединений и группового коэффициента использования, занесенного в графу 6 итоговой строки, по табл. 4 определяется значение коэффициента одновременности  $K_{О}$ . Значение  $K_{О}$  заносится в графу 10.

Расчетная мощность (графы 11, 14, 15) определяется по выражениям

$$P_{P} = K_{O} \sum K_{И} P_{Н}; \quad (2.18)$$

$$Q_{P} = K_{O} \sum K_{И} P_{Н} \operatorname{tg} \varphi = P_{P} \operatorname{tg} \varphi; \quad (2.19)$$

$$S_{P} = \sqrt{P_{P}^2 + Q_{P}^2}.$$

Значение коэффициента одновременности  $K_o$  для определения расчетной нагрузки на шинах 6 (10) кВ РП и ГПП

Средневзвешенный коэффициент использования	Число присоединений 6 (10) кВ на сборных шинах РП, ГПП			
	2–4	5–8	9–25	Более 25
$K_{и} < 0,3$	0,9	0,8	0,75	0,7
$0,3 \leq K_{и} < 0,5$	0,95	0,9	0,85	0,8
$0,5 \leq K_{и} \leq 0,8$	1,0	0,95	0,9	0,85
$K_{и} > 0,8$	1,0	1,0	0,95	0,9

Для высоковольтных электроприемников должна быть получена итоговая строка «Итого по высоковольтной нагрузке». Таблицу заканчивает строка «Итого по предприятию», в которой записываются суммарные данные по низковольтным и высоковольтным электроприемникам: номинальная активная мощность, произведения  $K_{и} \cdot P_{н}$  и  $K_{и} \cdot P_{н} \cdot \text{tg } \varphi$ , полная расчетная нагрузка, а также средние для всего предприятия значения коэффициентов  $K_{и}$ ,  $\cos \varphi$  и  $\text{tg } \varphi$ .

Пример расчета электрических нагрузок по предприятию показан в табл. 4.

Расчетные данные по отдельным цехам используются при выборе числа и мощности цеховых трансформаторов и затем с учетом потерь мощности в выбранных трансформаторах – для расчета питающих линий. Расчетные данные по предприятию в целом с учетом потерь мощности в цеховых трансформаторах используются при выборе трансформаторов главной понизительной подстанции и расчете схемы внешнего электроснабжения предприятия.

## 2.5. Расчет картограммы электрических нагрузок предприятия

При проектировании системы электроснабжения на генплан предприятия наносятся все производственные цехи с картограммой нагрузок. Картограмма нагрузок представляет собой размещенные на генплане окружности, центры которых совпадают с центрами нагрузок цехов, а площади кругов пропорциональны расчетным

активным нагрузкам электроприемников напряжением до 1000 В, электроприемников выше 1000 В и электрического освещения.

При этом радиус окружности и углы секторов для каждого цеха соответственно определяются так:

$$R_i = \sqrt{\frac{P_{Pi}}{\pi \cdot m}}; \quad (2.20)$$

$$\alpha_{Hi} = 360 \frac{P_{PHi}}{P_{Pi}}, \quad \alpha_{Bi} = 360 \frac{P_{PBi}}{P_{Pi}}, \quad \alpha_{OCBi} = 360 \frac{P_{OCBi}}{P_{Pi}}, \quad (2.21)$$

где  $P_{Pi}$ ,  $P_{PHi}$ ,  $P_{PBi}$ ,  $P_{OCBi}$  – расчетные активные нагрузки соответственно всего цеха, электроприемников напряжением до 1000 В, электроприемников напряжением выше 1000 В и электрического освещения;  $m$  – масштаб площадей картограммы нагрузок.

При выборе величины масштаба  $m$  и построении картограммы нагрузок необходимо стремиться, чтобы величина самого большого радиуса не превышала 5...10 см.

Центр электрических нагрузок предприятия является символическим центром потребления электрической энергии (активной мощности) предприятия, координаты которого находятся по выражениям:

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Pi} \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n P_{Pi}}; \quad Y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Pi} \cdot Y_i}{\sum_{i=1}^n P_{Pi}}, \quad (2.22)$$

где  $X_i$ ,  $Y_i$  – координаты  $i$ -го цеха на плане предприятия.

Начало координат рекомендуется помещать в левом нижнем углу генплана предприятия. Выбор места начала осей координат на расположение центра электрических нагрузок влияния не оказывает.

Главную понизительную подстанцию следует располагать в центре электрических нагрузок или как можно ближе к центру, смещая ее в сторону источника питания – подстанции энергосистемы.

При питании промышленного предприятия от центрального распределительного пункта (ЦРП) последний обязательно должен смещаться в сторону источника питания, чтобы избежать обратных перетоков мощности.

### 3. ВЫБОР ЧИСЛА, МОЩНОСТИ И ТИПА ЦЕХОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПРЕДПРИЯТИЯ С УЧЕТОМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Выбор трансформаторов цеховых ТП является важным этапом проектирования, существенно влияющим на основные технико-экономические показатели разрабатываемой схемы электропитания промышленного предприятия. В общем случае выбор трансформаторов представляет собой достаточно сложную задачу, которая может иметь не одно, а несколько решений, из которых следует выбрать наилучшее. Основой расчетов при этом служит, как правило, технико-экономическое сравнение вариантов.

Мощность трансформаторов цеховой ТП зависит от величины нагрузки электроприемников, их категории по надежности электропитания, от размеров площади цеха и т. п. При одной и той же равномерно распределенной нагрузке с увеличением площади цеха должна уменьшаться единичная мощность трансформаторов.

Существующая связь между экономически целесообразной мощностью отдельного трансформатора  $S_{\text{ЭТ}}$  цеховой ТП и плотностью  $\sigma$  электрической нагрузки цеха приближенной представлена в табл. 5.

Таблица 5

Зависимость экономически целесообразной мощности отдельного трансформатора  $S_{\text{ЭТ}}$  цеховой ТП и плотности  $\sigma$  электрической нагрузки цеха

Плотность электрической нагрузки цеха $\sigma$ , кВА/м <sup>2</sup>	< 0,05	0,05–0,1	0,1–0,2	0,2–0,3	> 0,3
Экономически целесообразная мощность одного трансформатора цеховой подстанции $S_{\text{ЭТ}}$ , кВА	400	630	1000	1600	1600 или 2500

Здесь принято:

$$\sigma = \frac{S_p}{F_{\text{ц}}}, \quad (3.1)$$

где  $S_p$  – расчетная электрическая нагрузка цеха;  $F_{\text{ц}}$  – площадь цеха.

Величина  $\sigma$  рассчитывается в предположении, что электрические нагрузки распределены равномерно по площади цеха.

Следует отметить, что в общем случае мощность трансформаторов цеховых ТП корректируется в зависимости от величины расчетной нагрузки цеха, также ее категории, числа типогабаритов трансформаторов на предприятии и ряда других причин.

Количество трансформаторов всех подстанций цеха (или части цеха) определяется по выражению:

$$N_0 = \frac{P_p}{K_3 \cdot S_{\text{НОМ.Т}}}, \quad (3.2)$$

где  $P_p$  – расчетная активная нагрузка цеха (части цеха) от низковольтных потребителей;  $K_3$  – допустимый коэффициент загрузки трансформаторов в нормальном режиме работы;  $S_{\text{НОМ.Т}}$  – выбранная номинальная мощность цеховых ТП. К установке принимается ближайшее большее целое число  $N$ .

Количество трансформаторов одной подстанции зависит от категории электроприемников по надежности электроснабжения [16; 25].

Однотрансформаторные подстанции применяют для питания потребителей 3-й категории и иногда 2-й и при наличии небольших до (15...20 %) нагрузок 1-й категории при условии резервирования их питания по связям на вторичном напряжении между соседними подстанциями.

При питании потребителей 3-й категории коэффициент загрузки  $K_3$  трансформаторов должен составлять 0,9...0,95. При преобладании нагрузок 2-й категории и наличии нагрузок 1-й категории и взаимном резервировании по связям вторичного напряжения коэффициент загрузки  $K_3 = 0,7...0,8$ .

Двухтрансформаторные подстанции применяются для питания потребителей 1-й и 2-й категорий. При преобладании нагрузок 1-й категории  $K_3 = 0,65...0,7$ . При преобладании нагрузок 2-й категории и при наличии централизованного (складского) резерва трансформаторов  $K_3 = 0,9...0,95$ .

Трехтрансформаторные подстанции и подстанции с числом трансформаторов более 3 применяются редко (для питания потребителей особой группы 1-й категории; при большой концентрации потребителей и ограниченности свободных мест для расположения подстанций; при питании совмещенных территориально нагрузок различного характера: силовых, электросварочных и других, кото-



рые нельзя питать от общих трансформаторов, и т. д.). Наибольшая загрузка трансформаторов трехтрансформаторной подстанции должна быть не более 0,93 (при питании от трех независимых источников и взаимном резервировании трансформаторов).

Если в цехе имеются в основном потребители 1-й и 2-й категорий и все ТП можно принять с одинаковым числом трансформаторов (например, при равномерном распределении нагрузки и наличии свободных мест для размещения этих подстанций), то количество ТП можно определить с помощью следующего соотношения:

$$M_0 = \frac{N}{n}, \quad (3.3)$$

где  $n$  – количество трансформаторов одной подстанции.

При дробном числе  $M_0$  необходимо принять ближайшее большее целое число  $M$ . Если электроприемники цеха относятся к 3-й категории, то число подстанций  $M = N$ .

Методика выбора числа и мощности трансформаторов цеховых ТП с учетом компенсации реактивной мощности, а также примеры расчетов приведены в работе [26].

При выполнении курсового проекта расчеты по данному разделу следует сводить в табл. 6.

Таблица 6

Выбор числа и мощности трансформаторов на предприятии

№ цеха	Наименование цеха	Удельная плотность нагрузки $\sigma$ , кВА/м <sup>2</sup>	Расчетная активная нагрузка $P_p$ , кВт	Категория надежности	Принято		
					мощность тр-ров на ТП	число тр-ров на ТП	количество ТП
1	Инструментальный	0,032	323,3	2	250	2	1
2	Термический	0,050	550,7	2	400	2	1
3	Литейный	0,260	2333	2	1600	2	1
4	Насосная станция	0,075	318,4	1	250	2	1
5	Компрессорная станция	0,038	251,8	1	250	2	1
6	Электроцех	0,058	249,5	3	250	1	1
7	Склад готовой продукции	0,019	207,2	3	250	1	1

№ цеха	Наименование цеха	Удельная плотность нагрузки $\sigma$ , кВА/м <sup>2</sup>	Расчетная активная нагрузка $P_p$ , кВт	Категория надежности	Принято		
					мощность тр-ров на ТП	число тр-ров на ТП	количество ТП
8	Сборочный	0,053	957,3	2	400	2	2
9	Токарный	0,080	1054	2	400	2	2
10	Кузнечный	0,048	732,8	2	250 400	2 2	1 1
11	Ремонтно-механический	0,080	303,1	3	400	1	1
12	Склад оборудования	0,013	129,5	3	400	1	1
13	Гараж и пожарное депо	0,034	171,6	1,3	160	1	1
14	Медпункт	0,019	126,9	3	160	1	1
15	Заводоуправление	0,011	120,6	3	160	1	1
16	Столовая	0,025	108,7	3	160	1	1
17	Центральная заводская лаборатория	0,026	278,6	2	160	2	1

Местоположение подстанций следует выбирать по возможности ближе к центрам электрических нагрузок. Однако при этом нужно учитывать расположение технологического оборудования и предусматривать установку подстанций так, чтобы они не препятствовали нормальному ходу технологического процесса.

В зависимости от места расположения ТП их разделяют на внутрицеховые, встроенные, пристроенные, отдельно стоящие и другие.

Наиболее экономичным типом в питающих сетях является внутрицеховая трансформаторная подстанция. Располагаются такие подстанции между опорными колоннами либо около внутренних или наружных стен здания внутри цеха. В этом случае обычно используются комплектные трансформаторные подстанции. К недостаткам применяемых внутрицеховых подстанций относится то, что они занимают дефицитную площадь цеха. Поэтому их сооружение возможно не во всех цехах.

Встроенные ТП являются менее экономичными, чем внутрицеховые. Они располагаются внутри цеха в специальных помещениях обычно у наружных стен здания.

Пристроенные ТП сооружаются снаружи, у стен зданий цехов, и в конструктивном соотношении могут быть как закрытыми, так и открытыми.

Наименее экономичными как по капитальным затратам, так и по эксплуатационным расходам являются отдельно стоящие трансформаторные подстанции. Они используются для питания группы мелких, рассредоточенных цехов либо для питания электроприемников одного цеха, когда расположение подстанции в нем недопустимо по условиям пожаро-, взрывобезопасности или по другим соображениям. Применение отдельно стоящих трансформаторных подстанций должно быть обосновано технически или технико-экономически.

При выборе ТП следует учитывать рекомендации, чтобы число типогабаритов трансформаторов на одном предприятии не превышало 3–4. Это существенно сокращает резерв и упрощает эксплуатацию трансформаторов, что особенно важно для небольших предприятий.

Следует отметить, что в практике проектных организаций выбор трансформаторов цеховых ТП осуществляется по средней нагрузке за наиболее загруженную смену [16]. Это делается с целью увеличения загрузки трансформаторов, так как, во-первых, ожидаемые электрические нагрузки определяются, как правило, с завышением, во-вторых, не все проектируемые электроприемники включаются сразу в работу, а некоторые из них в процессе эксплуатации ни разу не используются. При возрастании нагрузки трансформаторы могут быть заменены на другие, имеющие на ступень большую мощность, так как фундаменты под них предусматриваются еще на стадии проектирования. Однако при определении ожидаемых электрических нагрузок теоретически правильно выбор трансформаторов осуществлять по расчетной (максимальной) мощности. При этом пики температуры отдельных частей трансформаторов не будут превышать допустимых.

#### 4. ВЫБОР НАПРЯЖЕНИЯ, СХЕМЫ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ТРАНСФОРМАТОРОВ ГЛАВНОЙ ПониЗИТЕЛЬНОЙ ПОДСТАНЦИИ

Величина напряжения питания главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия определяется наличием конкретных источников питания, уровнями напряжения на них, расстоянием от ГПП до этих источников, возможностью сооружения воздушных или кабельных линий для передачи электроэнергии и другими факторами.

Из всех возможных вариантов внешнего электроснабжения нужно выбрать оптимальный, то есть имеющий наилучшие технико-экономические показатели. Для этого прежде всего следует найти величину рационального напряжения, которую можно оценить по формуле Стилла:

$$U_{\text{РАЦ}_i} = 4,34 \sqrt{L_i + 0,016 P_{\text{РП}}}, \quad (4.1)$$

где  $L_i$  – длина питающей ГПП линии;  $P_{\text{РП}}$  – расчетная нагрузка предприятия на стороне низшего напряжения ГПП.

Расчетная (максимальная) нагрузка предприятия:

$$P_{\text{РП}} = P_{\text{РН}} + P_{\text{РВ}} + P_{\text{ОСВ}} + \Delta P_{\text{ТС}}, \quad (4.2)$$

где  $P_{\text{РН}}$  – расчетная активная низковольтная нагрузка всех цехов и других потребителей предприятия;  $P_{\text{РВ}}$  – расчетная активная высоковольтная нагрузка предприятия;  $P_{\text{ОСВ}}$  – расчетная активная нагрузка освещения предприятия, включающая внутрицеховое и наружное освещение;  $\Delta P_{\text{ТС}}$  – суммарные потери активной мощности в трансформаторах цеховых ТП.

Для сравнения принимаются два варианта внешнего электроснабжения соответственно с большим и меньшим напряжениями по отношению к  $U_{\text{РАЦ}_i}$ .

Полная расчетная нагрузка предприятия, необходимая для выбора силовых трансформаторов ГПП, находится приближенно по формуле

$$S_{\text{РП}_i} = \sqrt{P_{\text{РП}}^2 + Q_{\text{ЭС}_i}^2}, \quad (4.3)$$

где  $Q_{\text{ЭС}_i}$  – экономически целесообразная реактивная мощность на стороне высшего напряжения ГПП, потребляемая предприятием из энергосистемы.

В курсовом проекте  $Q_{\text{эсi}}$  допускается рассчитывать с помощью соотношения

$$Q_{\text{эсi}} = P_{\text{рп}} \cdot \text{tg}\varphi_i, \quad (4.4)$$

где коэффициент реактивной мощности  $\text{tg}\varphi_i$  находится из табл. 7 [10].

Таблица 7

Зависимость коэффициента реактивной мощности  $\text{tg}\varphi_i$  от напряжения сети

Напряжение сети, кВ	6...10	35	110...150	220 и более
$\text{tg}\varphi_i$	0,4	0,49	0,54	0,59

При наличии одной ГПП и отсутствии электрической связи с другими источниками трансформаторы ГПП питают всю нагрузку предприятия. Для потребителей 3-й или 2-й категории с резервированием по стороне низшего напряжения, как правило, выбирается однотрансформаторная ГПП. Номинальная мощность трансформатора  $S_{\text{НОМ.Т}}$  приблизительно определяется с учетом перегрузки в нормальном режиме на 30 % и допустимой перегрузки на 15 % из-за неравномерности годового графика нагрузки по выражению [26]:

$$S_{\text{НОМ.Т}} \geq \frac{S_{\text{рпi}} \cdot K_{\text{зап}}}{1,3}, \quad (4.5)$$

где  $K_{\text{зап}}$  – коэффициент заполнения графика нагрузки предприятия.

Двухтрансформаторная ГПП, как правило, выбирается для потребителей 1-й и 2-й категорий без резервирования по стороне низшего напряжения. Допустимая номинальная мощность каждого трансформатора  $S_{\text{НОМ.Т}}$  с учетом допустимой перегрузки в аварийном режиме определяется по выражению:

$$S_{\text{НОМ.Т}} \geq \frac{S_{\text{рпi}} \cdot K_{1-2}}{K_{\text{пер}}}, \quad (4.6)$$

где  $K_{1-2}$  – коэффициент участия в нагрузке предприятия потребителей 1-й и 2-й категорий (для ГПП принимают равным 0,75...0,85);  $K_{\text{пер}} = 1,4$  – коэффициент приближенной допустимой аварийной перегрузки трансформатора.

На ГПП может быть установлено три и более трансформатора с целью обеспечения надежного электроснабжения всех основных потребителей предприятия. Такое решение принимают:

- при наличии крупных резкопеременных и ударных нагрузок и необходимости выделения их питания (прокатные станы, дуговые электропечи, крупные сварочные производства, кузнечно-прессовые цехи и т. д.);
- при концентрированных нагрузках, когда двухтрансформаторные ГПП невозможно применить по схемным либо конструктивным соображениям;
- при явных экономических преимуществах выполнения трехтрансформаторных ГПП, обусловленных, например, упрощением схемных решений или условиями дальнейшего роста нагрузок и развития ГПП предприятия.

Подробно практические методы выбора номинальной мощности трансформаторов ГПП по суточным и годовым графикам нагрузки изложены в работах [22; 26].

На крупных предприятиях может быть установлена не одна, а несколько ГПП. Такое решение определяется на основе технико-экономических расчетов, и его целесообразно рассматривать, как правило, при полной расчетной нагрузке предприятия более 90...100 МВА.

Промышленные предприятия получают электрическую энергию, как правило, от районных понижающих подстанций энергосистемы или электростанций на напряжении 220, 110, 35 кВ и сравнительно редко 10 или 6 кВ. В схему внешнего электроснабжения входят главная понизительная подстанция или центральный распределительный пункт предприятия, воздушные или кабельные линии электропередачи от районной подстанции энергосистемы или распределительного устройства электростанции до предприятия и коммутационные аппараты отходящих линий этой подстанции или электростанции.

При рассмотрении вариантов внешнего электроснабжения необходимо выбрать схемы на два напряжения, отвечающие требованиям надежности электроснабжения проектируемого предприятия, его технологическим особенностям и условиям окружающей среды [16; 18; 22]. Для каждого варианта рисуются однолинейные электрические схемы, на которых показывается коммутационная аппаратура подстанции энергосистемы или электростанции, воздушные или кабельные линии электропередач, элементы ГПП или ЦРП, а именно: открытое или закрытое распределительное устройство на

стороне высшего напряжения, вводные и секционные выключатели на стороне низшего напряжения. Около каждого элемента схемы указывается его тип со всеми основными номинальными данными, а для разъединителей, отделителей, короткозамыкателей, выключателей – тип привода.

Примеры схем внешнего электроснабжения предприятия приведены на рис. 1 и 2.

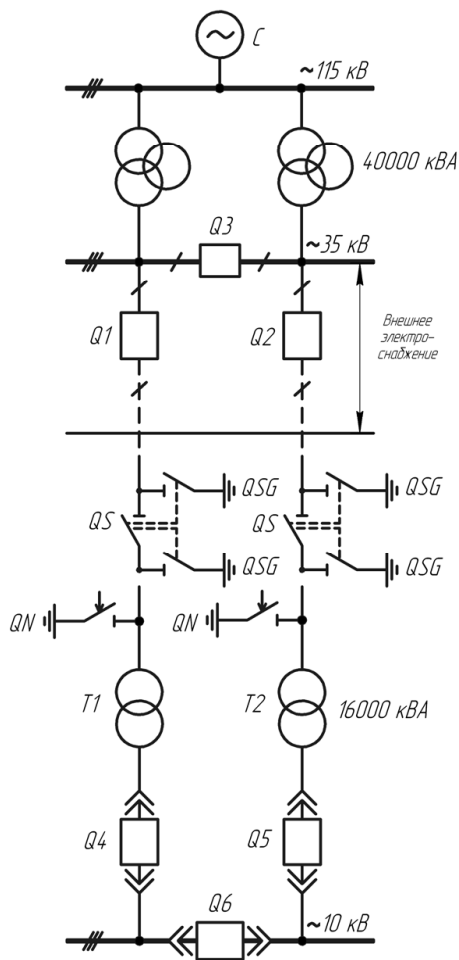


Рис. 1. Вариант системы внешнего электроснабжения предприятия на напряжение 35 кВ





## **5. ВЫБОР НАПРЯЖЕНИЯ И СХЕМЫ ВНУТРЕННЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ, РАСЧЕТ ПИТАЮЩИХ ЛИНИЙ**

### **5.1. Выбор напряжения распределительной сети предприятия**

Выбор величины напряжения распределительных сетей предприятия зависит от величины нагрузок на напряжениях 6 и 10 кВ. Критерием выбора являются технико-экономические показатели. При этом необходимо учесть следующее.

1. Согласно «Нормам технологического проектирования. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий» [9] для распределительных сетей применяют, как правило, напряжение 10 кВ. Это решение однозначно принимается при отсутствии электроприемников на напряжение 6 кВ. Использование напряжения 6 кВ рационально для предприятий, где устанавливается значительное количество двигателей 6 кВ небольшой мощности (до 500 кВт), а также в случае реконструкции или расширения действующего производства, ранее запроектированного на напряжение 6 кВ.

2. При установке на ГПП трансформаторов мощностью 25 кВА и более и при наличии нагрузки электроприемников на напряжение 6 кВ, составляющей 40...60 % общей нагрузки предприятия, наиболее экономичной является схема электроснабжения с использованием трансформаторов с расщепленными вторичными обмотками на 10 и 6 кВ и распределительной сетью на два напряжения. При меньшей доле нагрузки электроприемников на напряжение 6 кВ целесообразно принимать трансформаторы с расщепленными обмотками на напряжение 10 кВ, а электроприемники напряжением 6 кВ запитывать от групповых или индивидуальных трансформаторов, понижающих напряжение с 10 до 6 кВ.

3. При установке на ГПП трансформаторов мощностью 16 МВА и менее с нерасщепленными обмотками и наличии электроприемников на напряжение 6 кВ практически во всех случаях целесообразно выбирать напряжение 6 кВ, так как иначе в общей стоимости расчетных затрат удельный вес согласующих трансформаторов 10/6 кВ будет значительным.

4. Если нагрузка электроприемников на напряжение 6 кВ превышает 60...70 % общей нагрузки предприятия, то целесообразно ограничиться одним напряжением 6 кВ.

## **5.2. Выбор схемы внутреннего электроснабжения предприятия**

При выборе схемы внутреннего электроснабжения предприятия должны выполняться следующие требования.

1. Распределение электроэнергии на промышленном предприятии следует выполнять по радиальным, магистральным или смешанным схемам в зависимости от надежности электроснабжения, территориального расположения нагрузок, величины потребляемой мощности и других характерных особенностей проектируемого предприятия.

2. Схемы следует выполнять одно- или двухступенчатыми.

3. Схема должна строиться так, чтобы все ее элементы постоянно находились под нагрузкой, а при аварии на одном из них оставшиеся в работе могли принять на себя его нагрузку путем перераспределения ее между собой с учетом допустимой перегрузки.

4. При построении схем потребителей 1-й и 2-й категорий должно проводиться глубокое секционирование во всех звеньях схемы электроснабжения.

5. Схемы распределения электроэнергии на первой ступени от ГПП до РП 6...35 кВ принимаются следующие:

- на крупных предприятиях при передаче в одном направлении мощности более 15...20 МВА при напряжении 6 кВ, более 25...35 МВА при напряжении 10 кВ и более 35 МВА при напряжении 35 кВ – магистральные и радиальные схемы, осуществляемые с помощью токопроводов;
- на крупных и средних предприятиях с меньшими потоками мощности – магистральные и радиальные схемы, осуществляемые с помощью кабельных линий.

6. Магистральные схемы напряжением 6...10 кВ для питания цеховых трансформаторных подстанций должны применяться:

- при последовательном, линейном расположении подстанций;
- для технологически связанных агрегатов.

7. Число трансформаторов напряжением 6...10/0,4 кВ, присоединяемых к одной магистрали, следует принимать 2...3 при мощности 1000...2500 кВА и 3...4 – при меньших мощностях.

8. Радиальные схемы следует применять при нагрузках, расположенных в различных направлениях от источника питания. Одноступенчатые радиальные схемы целесообразно выполнять при питании больших сосредоточенных нагрузок (насосные, компрессорные станции, преобразовательные подстанции, электрические печи и т. д.). Двухступенчатые радиальные схемы применяют при наличии в цехах большой группы электроприемников напряжением выше 1000 В (асинхронные и синхронные двигатели, электрические печи и т. д.). Необходимость сооружения высоковольтных распределительных пунктов в цехах определяется технико-экономическими расчетами. Вопрос о сооружении высоковольтных РП следует рассматривать, как правило, при числе отходящих линий с обеих секций РП не менее 8.

9. Схемы трансформаторных подстанций напряжением 6...10/0,4 кВ должны проектироваться без сборных шин первичного напряжения.

10. Глухое присоединение цехового трансформатора должно применяться при радиальном питании за исключением некоторых случаев, например, при питании от распределительного пункта, находящегося в ведении другой эксплуатирующей организации или при необходимости установки отключающего аппарата по условиям защиты.

11. Установка коммутационного аппарата перед цеховым трансформатором при магистральной схеме питания подстанции обязательна.

### 5.3. Выбор схемы внутрицехового электроснабжения предприятия

При выборе схемы внутрицехового электроснабжения необходимо учитывать следующие положения.

1. Радиальные схемы характеризуются тем, что от распределительного щита трансформаторной подстанции отходят линии, питающие крупные электроприемники или групповые распределительные пункты, от которых, в свою очередь, отходят самостоятельные линии, питающие мелкие электроприемники (рис. 3).

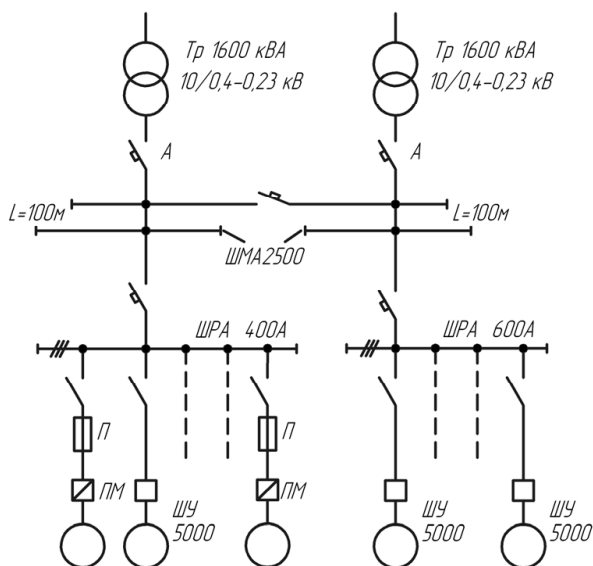


Рис. 3. Пример радиальной схемы распределения электроэнергии в сетях до 1000 В при однострансформаторных подстанциях

2. Радиальные схемы применяются для питания насосных или компрессорных станций, во взрыво- или пожароопасных производствах, а также в пыльных производствах. Распределение электроэнергии в них производится радиальными линиями от распределительных пунктов, вынесенных в отдельные помещения.

3. Радиальные сети выполняются изолированными проводами и кабелями.

4. Радиальные схемы обеспечивают высокую надежность питания, но требуют больших затрат на установку распределительных щитов, проводку кабелей и проводов.

5. Магистральные схемы в основном применяются при равномерном распределении нагрузки по площади цеха (рис. 4).

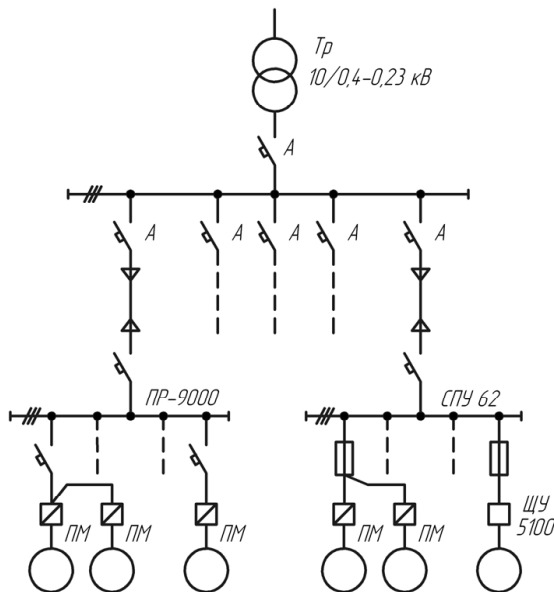


Рис. 4. Пример магистральной схемы распределения электроэнергии в сетях до 1000 В при двухтрансформаторных подстанциях

6. Современные цеховые магистральные схемы выполняются комплектными шинпроводами (магистральными и распределительными).

7. Наиболее совершенной из магистральных схем является схема блока «трансформатор — магистраль», так как в этом случае не требуется установка распределительного щита на трансформаторной подстанции.

8. Схема магистрального питания обеспечивает несколько пониженную по сравнению с радиальными схемами надежность электроснабжения, поскольку при повреждении магистрали все ее по-

требители теряют питание. Однако у современных комплектных магистральных шинопроводов надежность очень высока. Также для повышения надежности электроснабжения устанавливают переключатели между магистралями отдельных подстанций.

9. Стоимость магистральных сетей обычно ниже стоимости радиальных за счет использования меньшего количества устанавливаемой аппаратуры, меньшей стоимости монтажа питающих линий.

10. Магистральные схемы по сравнению с радиальными являются более гибкими: при перемещении технологического оборудования не требуется выполнять демонтаж сети.

11. Учитывая особенности радиальных и магистральных сетей, обычно применяют смешанные схемы цеховых электрических сетей в зависимости от характера производства, условий окружающей среды и т. д.

#### **5.4. Конструктивное исполнение электрической сети**

Выбор способа распределения электроэнергии зависит от величины электрических нагрузок и их размещения, плотности застройки предприятия, конфигурации технологических, транспортных и других коммуникаций, загрязненности грунта на территории предприятия и т. д.

Токопроводы напряжением 6...35 кВ (жесткие и гибкие) при нормальной окружающей среде прокладываются на открытых опорах; при загрязненной среде или при загруженной коммуникациями территории – в закрытых галереях, туннелях и на железобетонных кронштейнах, укрепляемых на наружной стене производственного здания.

Кабельные линии 6...35 кВ могут прокладываться в траншеях и кабельных сооружениях (блоках, каналах, туннелях, на кабельных эстакадах, кабельных галереях и т. д.).

Прокладка кабелей в траншеях наиболее проста и экономична. Однако по ряду причин данный способ прокладки не нашел преимущественного применения на промышленных предприятиях. Он не используется на участках с большим количеством кабелей и там, где возможен разлив горячего металла или агрессивных жидкостей; при большой насыщенности территории подземными и наземными

коммуникациями; в местах, где возможны блуждающие токи опасных величин, и т. д.

Прокладка кабелей в каналах может быть наружной и внутренней. Железобетонные каналы могут быть подземными или полуподземными. В каналах максимальных размеров можно проложить 50–60 силовых кабелей. На участках, где возможно разлитие расплавленного металла, жидкостей или других веществ, имеющих высокую температуру или разрушительно действующих на оболочку кабелей, кабельные каналы применять нельзя.

Прокладка кабелей в туннелях является наиболее дорогим способом, поэтому может применяться при большом количестве кабелей (более 30–40), идущих в одном направлении, и при отсутствии возможностей сооружения кабельной эстакады. При прокладке кабелей в туннелях на территории промышленного предприятия должны быть предусмотрены противопожарные меры.

Прокладка кабелей на эстакадах широко применяется на тех предприятиях, где сконцентрированы большие нагрузки, и при наличии в грунте химических реагентов, блуждающих токов и различной почвенной коррозии, затрудняющих прокладку кабелей другими способами.

Прокладка кабелей в блоках весьма надежна, обеспечивает хорошую защиту от механических повреждений и облегчает ремонт, но неэкономична по стоимости и пропускной способности кабелей. Она применяется очень редко, когда по местным условиям недопустимы более простые и дешевые способы прокладки, а именно: в местах пересечений с железными дорогами; в условиях большой стесненности трассы; в местах, где возможны случаи разлива расплавленного металла или агрессивных жидкостей, и т. д.

Типы кабелей выбираются в зависимости от принятого способа прокладки в соответствии с рекомендациями [6; 11; 17; 18; 22].

На рис. 5 приведен пример упрощенной электрической схемы внутреннего электроснабжения машиностроительного предприятия.

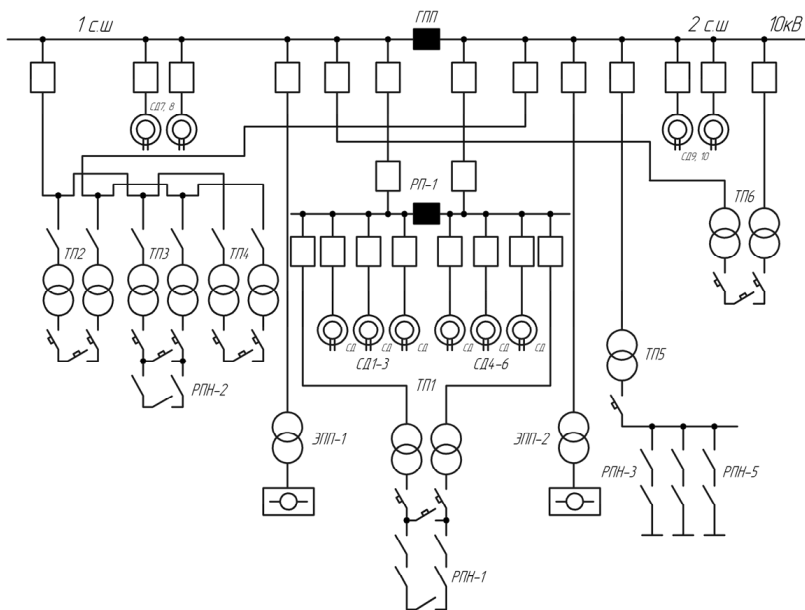


Рис. 5. Упрощенная электрическая схема внутреннего электроснабжения машиностроительного предприятия

### 5.5. Расчет питающих линий

Сечение кабелей напряжением 6...10 кВ определяется по экономической плотности тока и проверяется по допустимому току кабеля в нормальном режиме работы с учетом условий его прокладки, по току перегрузки, потере напряжения в послеаварийном режиме и термической стойкости токам короткого замыкания.

Расчетный ток в кабельной линии в нормальном режиме:

$$I_{\text{р.к}} = \frac{S_{\text{р.к}}}{\sqrt{3}U_{\text{н}}}, \quad (5.1)$$

где  $S_{\text{р.к}}$  — мощность, которая должна передаваться по кабельной линии в нормальном режиме.

Например, при питании однитрансформаторной цеховой подстанции это расчетная нагрузка трансформатора подстанции, при питании двухтрансформаторной подстанции — расчетная нагрузка, приходящаяся на один трансформатор, а при питании распределен-



тельного устройства 6...10 кВ – нагрузка, потребляемая одной секцией сборных шин. Для магистральной линии мощность  $S_{PK}$  должна определяться для каждого участка путем суммирования расчетных нагрузок соответствующих трансформаторов, питающихся по данному участку магистральной линии.

Сечение кабельной линии, определяемое по экономической плотности тока:

$$F_{\text{э}} = \frac{I_{PK}}{j_{\text{э}}}, \quad (5.2)$$

где  $j_{\text{э}}$  – экономическая плотность тока, зависящая от типа кабеля и продолжительности  $T_M$  использования максимума нагрузки [5].

По результату расчета выбирается кабель, имеющий ближайшее меньшее стандартное сечение по отношению к  $F_{\text{э}}$ . При выборе исполнения кабеля должны учитываться условия окружающей среды и условия прокладки [5; 22]. Для выбранного кабеля по таблицам находится длительно допустимый ток  $I_{\text{доп}}$  [5; 20].

Допустимый ток кабеля с учетом условий его прокладки рассчитывается по формуле:

$$I'_{\text{доп}} = K_{\text{п}} \cdot K_t \cdot I_{\text{доп}} > \frac{I_{PK}}{n_k}, \quad (5.3)$$

где  $K_{\text{п}}$  – поправочный коэффициент на число параллельно прокладываемых кабелей [22];  $K_t$  – поправочный коэффициент на температуру среды, в которой прокладывается кабель [5; 22];  $n_k$  – число кабелей в кабельной линии.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) для кабельных линий, прокладываемых по трассам с различными условиями охлаждения, сечения кабелей должны выбираться по участку трассы с худшими условиями охлаждения, если длина его составляет более 10 м.

Под послеаварийным режимом кабельной линии будем понимать режим, когда выходит из строя одна из двух кабельных линий, питающих потребителей 1-й и 2-й категорий. При этом нагрузка на линию удваивается, т. е.  $I_{AB} = 2 \cdot I_{PK}$ . Допустимая нагрузка кабеля в данном режиме:

$$I'_{AB} = K_{AB} \cdot I'_{\text{доп}} > \frac{I_{AB}}{n_k}, \quad (5.4)$$

где  $K_{AB}$  – коэффициент перегрузки.

Потеря напряжения в кабельной линии:

$$\Delta U = \frac{P_p \cdot R_0 \cdot L + Q_p \cdot X_0 \cdot L}{n_k \cdot U_H^2} \cdot 100\% \leq \Delta U_{\text{доп}} = 10\%, \quad (5.5)$$

где  $P_p$ ,  $Q_p$  – расчетные активная и реактивная нагрузки;  $X_0$ ,  $R_0$  – удельные индуктивное и активное сопротивления кабеля [20; 22].

На этом предварительный расчет кабельных линий для нормального и послеаварийного режимов заканчивается. Полученные сечения кабелей используются при расчете токов короткого замыкания, после чего определяется сечение кабеля по термической стойкости  $F_{\text{Т.С}}$  токам короткого замыкания и, если выбранное в данном разделе сечение кабеля оказывается меньше  $F_{\text{Т.С}}$ , производится его уточнение.

Положения по расчету и выбору токопроводов напряжением 6...35 кВ приведены в справочниках [25]. Экономические сечения  $F_{\text{Э}}$  наиболее употребительных типов токопроводов могут быть определены по следующим упрощенным формулам:

– для типовых жестких алюминиевых токопроводов из швеллеров:

$$F = \frac{0,286}{\sqrt{m}}, \quad (5.6)$$

– для токопроводов из алюминиевых труб:

$$F = \frac{0,269}{\sqrt{m}}, \quad (5.7)$$

где  $m$  – стоимость 1 кВт годовых потерь, руб./ (кВт год).

Экономическое число  $n_{\text{Э}}$  алюминиевых проводов сечением 600 мм<sup>2</sup> на фазу унифицированного гибкого токопровода определяют по формуле:

$$n_{\text{Э}} = \frac{I_p \cdot \sqrt{m}}{3400}, \quad (5.8)$$

где  $I_p$  – расчетный ток одной цепи для нормального режима работы.

При работе токопроводов возникает несимметрия напряжения, которая для типовых токопроводов при нормальном режиме определяется по выражению

$$U = k \frac{I_p \cdot l}{U_{\text{НОМ}}} 10^{-3}, \quad (5.9)$$

где  $U_{\text{НОМ}}$  – номинальное линейное напряжение;  $l$  – длина токопровода;  $k$  – расчетный коэффициент.

Несимметрия напряжения не должна выходить за пределы 2 %, нормированных ГОСТ 32144-2013 [3]. В отключенной цепи двухцепного токопровода значительным может оказаться наведенное напряжение, которое достигает наибольшего значения при коротком замыкании в работающей цепи. Для его ограничения при работах на отключенной цепи устанавливаются закоротки в начале и конце токопровода, а при необходимости и в промежуточных его точках с таким расчетом, чтобы наведенное напряжение не превышало 250 В, требуемых по условиям безопасности.

## 6. РАСЧЕТ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

### 6.1. Общие положения и допущения

Основной причиной нарушения нормального режима работы системы электроснабжения является возникновение короткого замыкания (КЗ) в сети или элементах электрооборудования вследствие повреждения изоляции или неправильных действий обслуживающего персонала. Для снижения ущерба, обусловленного выходом из строя электрооборудования при протекании тока в КЗ, а также для быстрого восстановления нормального режима работы системы электроснабжения необходимо правильно определять токи КЗ и по ним выбирать электрооборудование, защитную аппаратуру и средства ограничения тока в КЗ.

Расчетным видом КЗ для выбора или проверки параметров электрооборудования обычно считают трехфазное КЗ. Однако для выбора или проверки уставок релейной защиты и автоматики требуется определение и несимметричных токов в КЗ.

В зависимости от назначения расчета токов КЗ выбирают расчетную схему сети, определяют вид КЗ, местоположения точек КЗ на схеме и сопротивления элементов схемы замещения. Расчет токов КЗ в сетях напряжением до 1 кВ и выше имеет ряд особенностей, которые рассматриваются ниже.

### 6.2. Расчет токов короткого замыкания в установках напряжением выше 1 кВ

С целью дополнительного упрощения расчетов токов КЗ с учетом того, что мощность КЗ в энергосистеме в месте присоединения питающей понизительной подстанции менее значительно (как правило, в 20...50 раз) превышает мощность, потребляемую промышленными предприятиями, допускается принимать периодическую составляющую тока КЗ от энергосистемы неизменной во времени:

$$I_k^{(3)} = I_{п0}^{(3)} = I_{п,г}^{(3)}.$$

Если на предприятии имеется собственный источник питания (обычно ТЭЦ) или питание осуществляется от источников, распо-

ложенных вблизи данного предприятия, то  $I_{\text{п0}}^{(3)} \neq I_{\text{п,t}}^{(3)}$  и значение периодической слагающей тока КЗ в момент времени  $t$  следует определять по расчетным кривым.

Расчет токов КЗ в установках напряжением выше 1 кВ имеет ряд особенностей [7]:

- активные сопротивления элементов электроснабжения при определении токов КЗ не учитывают, если выполняются условия  $R_{\Sigma} < (X_{\Sigma}/3)$ , где  $R_{\Sigma}$  и  $X_{\Sigma}$  – суммарные активные и реактивные сопротивления элементов системы электроснабжения до точки КЗ;
- при определении тока КЗ учитывают подпитку от двигателей высокого напряжения: подпитку от синхронных двигателей учитывают как в ударном, так и в отключаемом токе КЗ; подпитку от асинхронных двигателей – только в ударном токе КЗ.

Для расчетов токов КЗ составляют расчетную схему системы электроснабжения и на ее основе – схему замещения.

Расчет токов КЗ выполняется в именованных или относительных единицах. Если расчет выполняется в именованных единицах, то для определения тока КЗ необходимо привести все электрические величины к напряжению ступени, на которой имеет место КЗ. В практических расчетах токов КЗ обычно вместо номинальных напряжений используют средние значения напряжений.

При расчете в относительных единицах все величины сравнивают с базисными, в качестве которых принимают базисную мощность  $S_6$  и базисное напряжение  $U_6$ . За базисную мощность принимают мощность одного трансформатора ГПП или условную единицу мощности, например, 100 или 1000 МВА.

В качестве базисного напряжения принимают среднее напряжение той ступени, на которой имеет место КЗ. Сопротивление элементов системы электроснабжения приводят к базисным условиям в соответствии с табл. 8.

Для определения токов КЗ на расчетной схеме намечают характерные точки КЗ, в которых токи имеют максимальное значение. Как правило, это сборные шины ГПП, распределительное устройство (РУ), РП или начало питающих линий.

Ток КЗ в рассматриваемой точке определяют из выражения:

$$I_k^{(3)} = \frac{I_6}{\sum X_*}, \quad (6.1)$$

где  $I_6$  – базисный ток той ступени, на которой рассматривают ток КЗ;  $\sum X_*$  – суммарное приведенное индуктивное сопротивление от источника питания до точки КЗ. (Если учитывают активное сопротивление, то вместо  $\sum X_*$  в формулу вводят  $\sum Z_*$  – полное приведенное сопротивление от источника питания до точки КЗ.)

Для выбора и проверки электрооборудования по условию электродинамической стойкости необходимо знать значение ударного тока КЗ:

$$i_{уд} = \sqrt{2} I_{п0} \cdot K_{уд}, \quad (6.2)$$

где  $I_{п0}$  – значение периодической составляющей тока КЗ в начальный момент (если рассматривать систему бесконечной мощности, то  $I_{п0} = I_\infty$ );  $K_{уд}$  – ударный коэффициент, зависящий от постоянной времени  $T_a$  – аperiodической составляющей тока КЗ;  $T_a = X_K / (314 R_K)$ ;  $X_K$  и  $R_K$  – соответственно индуктивное и активное сопротивления цепи КЗ; значения  $K_{уд}$  приведены в работе [22]. При вычислении токов КЗ в удаленных от генератора точках ударный коэффициент определяют по кривой зависимости  $K_{уд} = f(T_a)$  (рис. 6).

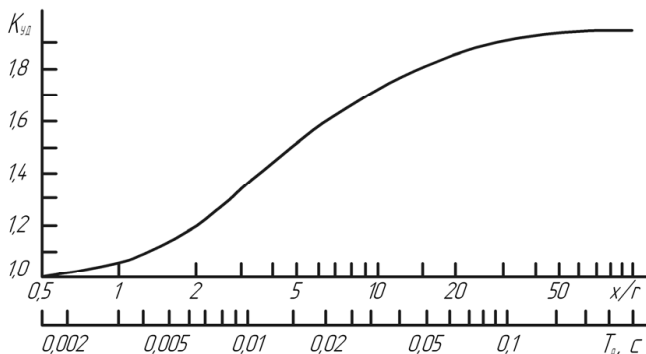


Рис. 6. Зависимость ударного коэффициента  $K_{уд}$  от постоянной времени  $T_a = X/R$

Выражения для определения сопротивлений элементов системы электроснабжения

Элемент системы электроснабжения	Исходный параметр	Сопротивление элемента, отн. ед.
Генератор	$X_{d,НОМ}''$ $S_{НОМ.Г}$ МВА	$X_* = X_{d,НОМ}'' \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.Г}}$
	$X_d''$ , % $S_{НОМ.Г}$ МВА	$X_* = \frac{X_d''}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.Г}}$
Энергосистема	$S_k$ , МВА	$X_* = \frac{S_{\delta}}{S_k}$
	$I_{НОМ.ОТК}$	$X_* = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} I_{НОМ.ОТК} U_{\delta}}$
	$X_{к.НОМ}$ $S_{НОМ.С}$ , МВА	$X_* = X_{к.НОМ} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.С}}$
Реактор	$X_p$ , % $U_{НОМ.П}$ ; $I_{НОМ.П}$	$X_* = \frac{X_p, \%}{100} \frac{I_{\delta} U_{НОМ.П}}{I_{НОМ.П} U_{\delta}}$
Линия электропередачи	$X_{уд}$ , Ом/км; $L$ , км	$X_* = X_{уд} L \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2}$
Трансформатор двухобмоточный	$U_k$ , % $S_{НОМ.Т}$ МВА	$X_* = \frac{U_k}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.Т}}$
Автотрансформатор и трехобмоточный трансформатор (схема замещения – звезда)	$U_{к.В-С}$ , % $U_{к.В-Н}$ , % $U_{к.С-Н}$ , % $S_{НОМ.Т}$ – номинальная мощность трансформатора или проходная мощность автотрансформатора, МВА	$X_{B_*} = \frac{1}{200} (U_{к.В-С} + U_{к.В-Н} - U_{к.С-Н}) \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.Т}}$ ; $X_{C_*} = \frac{1}{200} (U_{к.В-С} + U_{к.С-Н} - U_{к.В-Н}) \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.Т}}$ ; $X_{H_*} = \frac{1}{200} (U_{к.В-Н} + U_{к.С-Н} - U_{к.В-С}) \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.Т}}$
Трансформатор с расщепленной обмоткой низшего напряжения	$U_{к(В-Н)}$ , % $S_{НОМ.Т}$ МВА	$X_{B_*} = \left( \frac{U_{к.В-Н}}{100} - 0,5 \frac{U_{к.Н1-Н2}}{100} \right) \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.Т}}$ ; $X_{1_*} = X_{2_*} = \frac{2U_{к.В-Н}}{100} \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.Т}}$
Синхронные и асинхронные электродвигатели, компенсаторы	$X_d''$ $S_{НОМ.Д}$ МВА	$X_* = X_d'' \frac{S_{\delta}}{S_{НОМ.Д}}$

Наличие в системе электроснабжения двигателей высокого напряжения приводит к увеличению тока КЗ за счет подпитки места КЗ. Подпитку асинхронных двигателей учитывают как в ударном, так и отключаемом месте КЗ [7]. Полное начальное значение периодической составляющей тока КЗ при этом определяют арифметическим суммированием токов КЗ от источника питания и синхронных двигателей. Сверхпереходной ток  $I_{сд}''$ , А, синхронного двигателя (периодическая составляющая тока КЗ в начальный момент времени) определяют из выражения:

$$I_{сд}'' = \frac{E_*'' \cdot I_{НОМ.СД}}{X_{*d}''}, \quad (6.3)$$

где  $I_{НОМ.СД}$  – номинальный ток двигателя, А;  $X_{*d}''$  – приведенное сверхпереходное реактивное сопротивление двигателя по продольной оси;  $E_*''$  – приведенное значение сверхпереходной ЭДС, отн. ед., в начальный момент КЗ, которое можно принимать по табл. 9 или определять по формуле:

$$E_*'' = \sqrt{\cos^2 \varphi_{НОМ} + (\sin \varphi_{НОМ} + X_{*d}'')^2}, \quad (6.4)$$

где  $\cos \varphi_{НОМ}$  – номинальный коэффициент мощности в режиме перевозбуждения.

Таблица 9

Значение сверхпереходной ЭДС

Источники	$E_{*(НОМ)}''$
Синхронный компенсатор	1,2
Синхронный двигатель	1,1
Асинхронный двигатель	0,9

Ударный ток асинхронных двигателей определяют по формуле (6.2), при этом значение  $K_{уд}$  при отсутствии точных данных ориентировочно можно принимать равным 1,82 для двигателей типа СДН.

Максимальный ток подпитки от асинхронных двигателей при трехфазном КЗ на их выводах определяют по формуле:

$$I_{АД} = \sqrt{2} \frac{0,9}{X_{АД}''} I_{НОМ.АД}, \quad (6.5)$$

где  $X_{АД}''$  – расчетное индуктивное сопротивление двигателя, отн. ед. (Если принять среднее значение  $X_{АД}'' = 0,2$ , то в ориентировочных расчетах  $I_{АД}$  равно  $6,5 I_{НОМ.АД}$ .)



Если источником питания предприятия являются кроме энергосистемы генераторы, то в расчетах нельзя принимать равенство  $I_{\Pi 0}^{(3)} = I_{\Pi, t}^{(3)}$ , так как это приведет к большим погрешностям. Ток КЗ в начальный момент времени складывается из тока КЗ от генераторов в момент времени  $t = 0$ . Преобразованная схема замещения относительно точки КЗ может в общем случае иметь любое количество ветвей, что определяется количеством источников питания.

**Пример.** Определить ток трехфазного КЗ в точке  $K1$ , если питание предприятия осуществляют от системы бесконечной мощности и генераторов  $\Gamma 1$  и  $\Gamma 2$ . Параметры, необходимые для расчета, приведены на рис. 7, а.

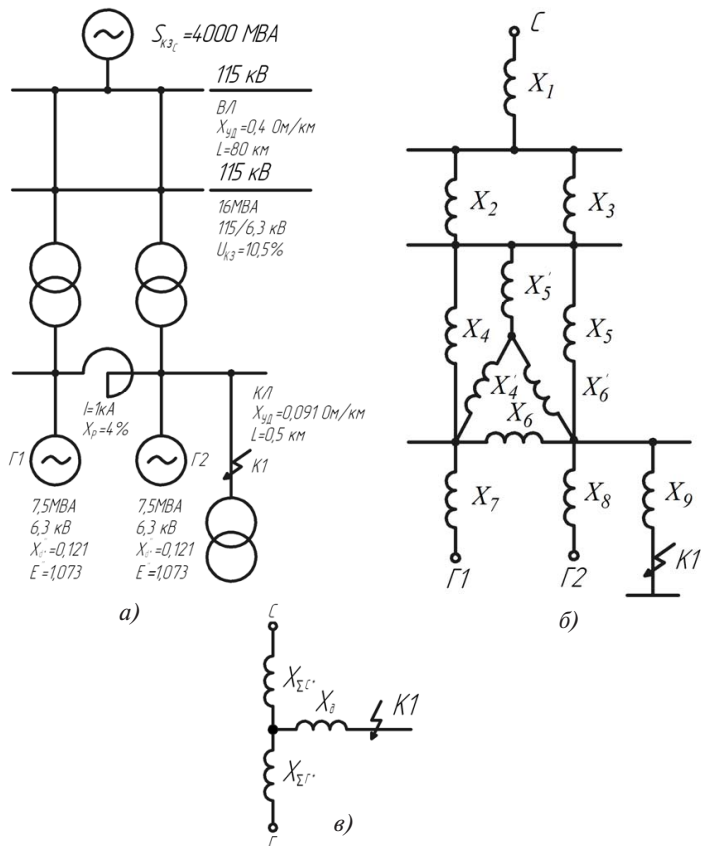


Рис. 7. Исходная схема (а), схема замещения (б) и свернутая схема замещения (в)

*Решение*

1. Схема замещения приведена на рис. 7, б. За базисную мощность принята  $S_6 = 100$  МВА, за базисное напряжение  $U_6 = 115$  кВ,  $U_6 = 6,3$  кВ (основная ступень). Базисный ток составит

$$I_6 = S_6 / \sqrt{3}U_6 = 100 / (1,73 \cdot 6,3) = 9,2 \text{ кА.}$$

2. Сопротивления элементов схемы замещения в базисных единицах согласно табл. 8.

Энергосистема:

$$X_{1*} = \frac{S_6}{S_{\text{КЭС}}} = \frac{100}{4000} = 0,025.$$

Воздушная линия напряжением 110 кВ:

$$X_{2*} = X_{3*} = X_{\text{уд}} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,24.$$

Трансформатор мощностью 16 МВА:

$$X_{4*} = X_{5*} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ.Т}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,656.$$

Реактор:

$$X_{6*} = \frac{X_p, \%}{100} \cdot \frac{I_6}{I_{\text{НОМ.Р}}} \cdot \frac{U_{\text{НОМ.Р}}}{U_6} = \frac{4 \cdot 9,2 \cdot 6}{100 \cdot 1 \cdot 6,3} = 0,35.$$

Генератор:

$$X_{7*} = X_{8*} = X'_d \cdot \frac{S_6}{S_{\text{НОМ.Г}}} = 0,121 \cdot \frac{100}{7,5} = 1,6.$$

Кабельная линия:

$$X_{9*} = X_{\text{уд}} \cdot l \cdot \frac{S_6}{U_6^2} = 0,091 \cdot 0,5 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,115.$$

3. Из схемы замещения (рис. 7, б) видно, что сопротивления  $X_4$ ,  $X_5$  и  $X_6$  соединены между собой в треугольник. Для нахождения тока в точке  $KI$  преобразуем треугольник в эквивалентную звезду. Сопротивления эквивалентной звезды  $X'_4$ ,  $X'_5$  и  $X'_6$  определяем по формулам:

$$X'_{4.} = \frac{X_{4.} \cdot X_{6.}}{X_{4.} + X_{5.} + X_{6.}} = \frac{0,656 \cdot 0,35}{0,656 + 0,656 + 0,35} = 0,138;$$

$$X'_{5.} = \frac{X_{4.} \cdot X_{5.}}{X_{4.} + X_{5.} + X_{6.}} = \frac{0,656 \cdot 0,65}{0,656 + 0,656 + 0,35} = 0,26;$$

$$X'_{6.} = \frac{X_{5.} \cdot X_{6.}}{X_{4.} + X_{5.} + X_{6.}} = \frac{0,656 \cdot 0,35}{0,656 + 0,656 + 0,35} = 0,138.$$

4. Определяем суммарное сопротивление со стороны системы и генераторов до нулевой точки эквивалентной звезды (рис. 7, в):

$$X_{\Sigma C^*} = X_{1^*} + \frac{X_{2^*}}{2} + X_{5^*} = 0,025 + 0,12 + 0,26 = 0,3825;$$

$$X_{\Sigma \Gamma^*} = X_{\Sigma \Gamma_2^*} = X_{7^*} + X_{4^*} = 1,6 + 0,138 = 1,738.$$

5. Так как генераторы имеют одинаковые параметры, то их можно объединить:

$$X_{\Sigma \Gamma^*} = X_{\Sigma \Gamma_1^*} = X_{\Sigma \Gamma_2^*} = 1,738 / 2 = 0,87;$$

$$E_{\text{ЭКВ}^*} = E_{\Gamma_1^*} = E_{\Gamma_2^*} = 1,073.$$

Объединять энергосистему и генераторы нельзя, поэтому определяем токи с помощью коэффициентов распределения. Находим эквивалентное сопротивление  $X_{\text{ЭКВ}^*}$  от источников питания, коэффициенты распределения и результирующие сопротивления до точки КЗ:

$$X_{\text{ЭКВ}^*} = \frac{X_{\Sigma C^*} \cdot X_{\Sigma \Gamma^*}}{X_{\Sigma C^*} + X_{\Sigma \Gamma^*}} = \frac{0,38 \cdot 0,87}{0,3825 + 0,87} = 0,266;$$

$$K_{P1} = \frac{X_{\text{ЭКВ}^*}}{X_{\Sigma C^*}} = \frac{0,266}{0,38} = 0,7;$$

$$K_{P2} = \frac{X_{\text{ЭКВ}^*}}{X_{\Sigma \Gamma^*}} = \frac{0,266}{0,87} = 0,3;$$

$$X_{\text{PEЗ}^*} = X_{\text{ЭКВ}^*} + X_{9^*} = 0,266 + 0,115 = 0,381;$$

$$X_{\text{PEЗ}\Gamma^*} = X_{\text{PEЗ}^*} / K_{P1} = 0,381 / 0,7 = 0,544;$$

$$X_{\text{PEЗ}1^*} = X_{\text{PEЗ}^*} / K_{P2} = 0,381 / 0,3 = 1,27.$$

6. Определяем токи в точке  $KI$  отдельно от энергосистемы и генераторов:

$$I_{K,C} = \frac{1}{X_{\text{PEЗ}1^*}} I_6 = \frac{1}{0,544} 9,2 = 16,91 \text{ кА};$$

$$I_{K,\Gamma} = I_{\text{П}0,\Gamma} = \frac{E_*''}{X_{\text{PEЗ}2^*}} I_6 = \frac{1,073}{1,27} 9,2 = 7,77 \text{ кА}.$$

Суммарный ток КЗ в точке  $KI$  равен:

$$I_{K,K1} = I_{K,C} + I_{K,\Gamma} = 16,91 + 7,77 = 24,68 \text{ кА}.$$

### ***Определение периодической составляющей тока КЗ в произвольный момент времени***

При выборе коммутационной аппаратуры необходимо знать токи трехфазного КЗ для моментов времени  $t > 0$ . В практических расчетах рекомендуется определять периодическую составляющую тока по расчетным кривым [7; 22].

Расчетные кривые представляют собой зависимость от времени периодической составляющей  $I_{\Pi, t}$  тока КЗ от генератора, отнесенной к начальному значению тока КЗ  $I_{\Pi 0}$ , при разных удаленностях точки КЗ.

Метод расчетных кривых целесообразно применять в тех случаях, когда точка КЗ находится у выводов генератора. Генераторы, значительно удаленные от точки КЗ, и энергосистема в расчетах должны заменяться одним источником с неизменным напряжением на шинах. В отдельную группу следует выделять генераторы, непосредственно питающие КЗ. При этом вычисление токов по расчетным кривым выполняют отдельно для каждой ветви, образованной источником питания. Целесообразно иметь небольшое число ветвей, так как в противном случае расчеты усложняются, а точность их не повышается.

Для выбора и проверки параметров релейной защиты и автоматики в системе электроснабжения промышленного предприятия (СЭСПП) наряду с трехфазными токами КЗ необходимо знать токи несимметричных КЗ.

В основу расчета несимметричных КЗ положен метод симметричных составляющих [7; 21], согласно которому любую несимметричную систему векторов (токов, напряжений и т. д.) можно заменить тремя условными симметричными составляющими: прямой, обратной и нулевой последовательности.

Для определения токов и напряжений в месте КЗ составляют схемы замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей, которые преобразуют в простейший вид и определяют суммарные сопротивления каждой последовательности  $X_{1\Sigma}$ ,  $X_{2\Sigma}$ ,  $X_{0\Sigma}$  относительно точки КЗ.

Модуль фазного тока в аварийной фазе выражается через ток прямой последовательности:

$$I_{K1}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{K1}^{(n)}, \quad (6.6)$$

где  $I_{K1}^{(n)} = E_{\phi} / X_{\Sigma}^{(n)}$ ,  $n$  – вид КЗ;  $m$  – коэффициент пропорциональности, значения которого составляют: при трехфазном КЗ –  $m^{(3)} = 1$ , при двухфазном КЗ –  $m^{(2)} = \sqrt{3}$ , при однофазном КЗ –  $m^{(1)} = 3$ ;  $E_{\phi}$  – ЭДС источника питания;  $X_{\Sigma}^{(n)}$  – суммарное сопротивление до точки КЗ, равное:

при трехфазном КЗ –  $X_{\Sigma}^{(3)} = X_{1\Sigma}$ ,

при двухфазном КЗ –  $X_{\Sigma}^{(2)} = X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$ ,

при однофазном КЗ –  $X_{\Sigma}^{(1)} = X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$ .

Подробно методы расчетов токов КЗ, включая и несимметричные, а также примеры расчетов приведены в работе [7].

### 6.3. Особенности расчетов токов КЗ в сетях напряжением до 1 кВ

Расчеты токов КЗ в сетях напряжением до 1 кВ имеют ряд особенностей по сравнению с расчетами токов КЗ в сетях напряжением выше 1 кВ. К ним относятся следующие:

- учет активных сопротивлений всех элементов короткозамкнутой цепи, включая силовые трансформаторы, проводники, трансформаторы тока, реакторы, токовые катушки автоматических выключателей;
- учет индуктивных сопротивлений всех вышеперечисленных элементов короткозамкнутой цепи;
- учет активных сопротивлений различных контактов и контактных соединений;
- учет сопротивлений электрической дуги в месте КЗ;
- учет параметров асинхронных двигателей, если суммарный номинальный ток этих двигателей превышает 10 % начального значения периодической составляющей тока КЗ, рассчитанного без учета электродвигателей.

В соответствии с ПУЭ [5] влияние асинхронных двигателей на ток КЗ не учитывается, если ток от них поступает к месту КЗ по тем же элементам, по которым протекает основной ток КЗ от сети и которые имеют значительные сопротивления. Для сети 0,4 кВ такими

элементами являются трансформаторы, воздушные и кабельные линии и переходные соединения в месте КЗ. Это означает, что влияние асинхронных двигателей на ток КЗ следует учитывать, если двигатели подключены либо непосредственно к месту КЗ, либо через кабельные или воздушные линии.

Сети напряжением до 1 кВ, как правило, работают с глухим заземлением нейтралей силовых трансформаторов. Поэтому в таких сетях возможны все виды КЗ, характерные для сетей напряжением выше 110 кВ. Обычно в качестве расчетных в сетях напряжением до 1 кВ приняты трехфазные КЗ, двухфазные КЗ и однофазные КЗ.

Кроме того, наиболее частыми видами КЗ являются КЗ дуговые, т. е. перечисленные выше виды КЗ, но с учетом активного сопротивления дуги в месте КЗ.

В настоящее время основная методика по расчетам токов КЗ в сетях напряжением до 1 кВ приведена в ГОСТ 28249-93 «Методы расчета токов КЗ в электроустановках переменного тока до 1 кВ» [1] и РД 153-34.0-20.527-98 «Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования» [7].

В ГОСТ 28249-93 появились новые рекомендации по расчетам дуговых КЗ, определению активного сопротивления дуги  $R_d$ , по определению активных сопротивлений воздушных и кабельных линий при нагреве их токами КЗ. Поэтому методы расчетов токов КЗ, изложенные в ГОСТ 28249-93, дают более точные результаты.

В руководящих указаниях РД 153-34.0-20.527-98 [7] разработаны методы расчета токов КЗ с учетом специфических параметров современных электрических машин и их систем возбуждения, даны рекомендации по учету электрической дуги, нагрева и перемещения гибких проводников при КЗ, влияния комплексной нагрузки на токи КЗ. Приведены новые кривые изменения во времени токов КЗ генераторов различных серий с различными системами возбуждения.

Все расчеты токов КЗ для сетей напряжением до 1 кВ выполняются с использованием коэффициентов трансформации, равных отношению средних номинальных напряжений тех ступеней напряжения, которые связывают эти трансформаторы.

Параметры элементов схемы замещения приводятся к одному напряжению, принятому за базисное. Обычно за базисную прини-

мают ступень напряжения, которую имеет наибольшее количество элементов сети и на которой находится точка КЗ. Как правило, это напряжение 0,4 кВ.

В этом случае активные и индуктивные сопротивления элементов схемы замещения будут выражены в миллиомах (МОм).

**Эквивалентный источник питания.** Если эквивалентная система задана значением тока трехфазного КЗ на стороны высшего напряжения трансформатора, то эквивалентное сопротивление системы определяется следующими напряжениями:

$$X_c = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{\sqrt{3}I_{\text{к.ВН}}U_{\text{ср.ВН}}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}^2}{S_{\text{к}}} \cdot 10^{-3}, \quad (6.7)$$

где  $X_c$  – эквивалентное индуктивное сопротивление системы, приведенное к базисному напряжению, МОм;  $U_{\text{ср.НН}}$  – среднее номинальное напряжение сети, подключенной к обмотке низшего напряжения трансформатора, В;  $U_{\text{ср.ВН}}$  – среднее номинальное напряжение сети, к которой подключена обмотка высшего напряжения трансформатора, В;  $I_{\text{к.ВН}} = I_{\text{по.ВН}}$  – действующее значение периодической составляющей тока при трехфазном КЗ у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, кА;  $S_{\text{к}}$  – условная мощность короткого замыкания у выводов обмотки высшего напряжения трансформатора, МВА.

**Трансформатор.** Питающий трансформатор входит в схему замещения активным  $R_T$  и индуктивным  $X_T$  сопротивлениями, приведенными к базисному напряжению, т. е. к  $U_{\text{ср. НН}}$ .

Активное сопротивление  $R_T$  определяется по выражению

$$R_T = \frac{P_{\text{к.НОМ}} U_{\text{НН.НОМ}}^2}{S_{\text{т.НОМ}}^2} \cdot 10^6. \quad (6.8)$$

Индуктивное сопротивление трансформатора  $X_T$  определяют по выражению

$$X_T = \sqrt{u_{\text{к}}^2 - \left( \frac{100P_{\text{к.НОМ}}}{S_{\text{т.НОМ}}} \right)^2} \cdot \frac{U_{\text{НН.НОМ}}^2}{S_{\text{т.НОМ}}} \cdot 10^4, \quad (6.9)$$

где  $S_{\text{т.НОМ}}$  – номинальная мощность трансформатора, кВ · А;  $P_{\text{т.НОМ}}$  – потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт;  $U_{\text{НН.НОМ}}$  – номинальное напряжение обмотки низшего напряжения трансформатора, кВ;  $u_{\text{к}}$  – напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

Параметры трансформаторов приведены в работах [20; 22; 26].

**Реактор.** В схему замещения реактор вводится активным и индуктивным сопротивлениями, выраженными в МОм.

$$R_{1p} = \frac{\Delta P_{\text{к.ном}}}{I_{\text{р.ном}}^2} \cdot 10^3, \quad (6.10)$$

где  $\Delta P_{\text{р.ном}}$  – потери активной мощности в фазе реактора при номинальном токе, Вт;  $I_{\text{р.ном}}$  – номинальный ток реактора, А.

Индуктивное сопротивление реакторов в миллиомах принимают, как указано изготовителем, или рассчитывают по формуле

$$X_{1p} = \omega_c (L - M) \cdot 10^3, \quad (6.11)$$

где  $\omega_c$  – угловая частота напряжения сети, рад/с;  $L$  – индуктивность катушки трехфазного реактора, Гн;  $M$  – взаимная индуктивность между фазами реактора, Гн.

Параметры реакторов, наиболее часто используемых на вводе питания сборок 0,4 кВ, приведены в работах [20; 22].

**Силовые кабели.** Активные и индуктивные сопротивления кабелей определяются по удельным параметрам кабелей и их длине:

$$R_k = r_{\text{уд}} \cdot l; \quad (6.12)$$

$$X_k = x_{\text{уд}} \cdot l, \quad (6.13)$$

где  $r_{\text{уд}}$  – удельное активное сопротивление кабеля соответствующей последовательности, мОм/м;  $x_{\text{уд}}$  – удельное индуктивное сопротивление кабеля соответствующей последовательности, мОм/м;  $l$  – длина кабеля, м.

Удельные активные и индуктивные сопротивления силовых кабелей различных марок приведены в приложении 2 ГОСТ 28249-93 и в работах [5; 20; 25].

**Шинопроводы.** Активное и индуктивное сопротивления шинпроводов определяются так же, как и для кабельных линий.

Удельные активные и индуктивные сопротивления шинпроводов для пакетов шинпроводов прямоугольного и квадратного сечений приведены в работах [20; 25].

**Асинхронные двигатели.** При расчетах начального значения периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей последние следует вводить в схему замещения сверхпереходным индуктивным сопротивлением. Асинхронный двигатель



в схему замещения прямой (обратной) последовательности вводятся сверхпереходным индуктивным и активным сопротивлениями, которые в практических расчетах в соответствии с ГОСТом принимаются равными следующим значениям (в о. е.):

$$X''_{АД*(ном)} = 0,18,$$

$$R_{АД*} = 0,36 \cdot X''_{АД*}.$$

Обычно в расчетную схему и схему замещения асинхронные двигатели данного РУ-0,4 кВ вводятся некоторым усредненным электродвигателем, номинальная мощность которого равна суммарной мощности данной группы двигателей. Для пересчета сопротивлений этого электродвигателя в именованные единицы (МОм) используется следующее выражение:

$$X''_{АД*} = X''_{АД*(ном)} \cdot \frac{U_H^2 \cdot \cos \varphi \cdot \eta_H}{P_H} \cdot 10^3, \text{ мОм}, \quad (6.14)$$

где  $U_H$  – номинальное напряжение электродвигателя, кВ;  $\cos \varphi$  – усредненное значение  $\cos \varphi$  электродвигателей, подключенных к шинам данного РУ-0,4 кВ;  $\eta_H$  – усредненное значение коэффициента полезного действия электродвигателей, подключенных к шинам данного РУ-0,4 кВ;  $P_H$  – суммарная активная мощность электродвигателей, подключенных к шинам РУ-0,4 кВ, МВт.

Эквивалентную ЭДС такого усредненного электродвигателя, как и одиночного, можно принять равной

$$E_d'' = 0,9 \cdot U_H. \quad (6.15)$$

Кроме перечисленных выше элементов расчетной схемы в схему замещения входят активные и индуктивные сопротивления первичных обмоток многовитковых измерительных трансформаторов тока, активные и индуктивные сопротивления катушек расцепителей автоматических выключателей, а также активные сопротивления контактов и контактных соединений. Параметры некоторых типов вышеназванных элементов приведены в работах [20; 25].

**Контакты и контактные соединения.** Активные сопротивления контактов и контактных соединений для практических расчетов приведены в приложении 4 ГОСТ 28249-93. При приближенном учете сопротивлений контактов принимают:

$R_k = 0,1$  мОм – для контактных соединений кабелей;

$R_k = 0,01$  мОм – для шинопроводов;

$R_k = 1,0$  мОм – для коммутационных аппаратов.

**Активное сопротивление дуги в месте КЗ.** Токоограничивающее действие дуги учитывается включением в расчетную цепь КЗ добавочного сопротивления  $R_d$ .

Ранее рекомендовалось принимать среднее значение сопротивления дуги  $R_d = 15$  мОм, которое включало в себя переходные сопротивления контактов, контактных соединений и сопротивление дуги.

В последующих публикациях появились новые данные, в том числе полученные экспериментально, о характере дугового КЗ и значениях  $R_d$ .

Приближенные значения  $R_d$  в соответствии с ГОСТом для различных расчетных точек КЗ в сети 0,4 кВ и мощностей питающих трансформаторов приводятся в табл. 10, данные которой получены экспериментально.

Таблица 10

Зависимость активного сопротивления дуги от расчетного условия КЗ

Расчетные условия КЗ	Активное сопротивление дуги ( $R_d$ ), мОм, при КЗ за трансформаторами мощностью, кВА					
	250	400	630	1000	1600	2500
КЗ вблизи выходов низшего напряжения трансформатора:						
– в разделке кабелей напряжением:						
0,4 кВ	15	10	7	5	4	3
0,525 кВ	14	8	6	4,5	3,5	2,5
0,69 кВ	12	7	5	4	3	2
– в шинопроводе типа ШМА напряжением:						
0,4 кВ	–	–	–	6	4	3
0,525 кВ	–	–	–	5	3,5	2,5
0,69 кВ	–	–	–	4	3	2
– КЗ в конце шинопровода типа ШМА длиной 100–150 м напряжением:						
0,4 кВ	–	–	–	6–8	5–7	4–6
0,525 кВ	–	–	–	5–7	4–6	3–5
0,69 кВ	–	–	–	4–6	3–5	2–4

### 6.3.1. Аналитические методы расчетов токов КЗ

#### *Расчет начального значения периодической составляющей тока трехфазного КЗ*

При электроснабжении электроустановки от энергосистемы через понижающий трансформатор начальное действующее значение периодической составляющей трехфазного тока КЗ ( $I_{п0}$ ) в килоамперах без учета подпитки от электродвигателей рассчитывают по формуле:

$$I_{п0} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{3}\sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}, \quad (6.16)$$

где  $U_{\text{ср.НН}}$  – среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло короткое замыкание,  $B$  (для сетей 0,4 кВ за базисное напряжение принимают напряжение 400 В);  $R_{1\Sigma}$ ,  $X_{1\Sigma}$  – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, мОм. Эти сопротивления равны:

$$R_{1\Sigma} = R_{\text{т}} + R_{\text{р}} + R_{\text{ТА}} + R_{\text{кв}} + R_{\text{ш}} + R_{\text{к}} + R_{\text{1кб}} + R_{\text{вл}} + R_{\text{д}}$$

$$\text{и } X_{1\Sigma} = X_{\text{с}} + X_{\text{т}} + X_{\text{р}} + X_{\text{ТА}} + X_{\text{кв}} + X_{\text{ш}} + X_{\text{1кб}} + X_{\text{вл}},$$

где  $R_{\text{т}}$  и  $X_{\text{т}}$  – активное и индуктивное сопротивления прямой последовательности понижающего трансформатора, мОм;  $R_{\text{ТА}}$  и  $X_{\text{ТА}}$  – активное и индуктивное сопротивления первичных обмоток трансформаторов тока, мОм;  $X_{\text{с}}$  – эквивалентное индуктивное сопротивление системы до понижающего трансформатора, мОм, приведенное к ступени низшего напряжения;  $R_{\text{р}}$  – активное и индуктивное сопротивления реакторов, мОм;  $R_{\text{кв}}$  и  $X_{\text{кв}}$  – активное и индуктивное сопротивления токовых катушек автоматических выключателей, мОм;  $R_{\text{ш}}$  и  $X_{\text{ш}}$  – активное и индуктивное сопротивления шинопроводов, мОм;  $R_{\text{к}}$  – суммарное активное сопротивление различных контактов, мОм;  $R_{\text{1кб}}$ ,  $R_{\text{вл}}$  и  $X_{\text{1кб}}$ ,  $X_{\text{вл}}$  – активные и индуктивные сопротивления прямой последовательности кабельных и воздушных линий, мОм;  $R_{\text{д}}$  – активное сопротивление дуги в месте КЗ, мОм, принимаемое по данным табл. 10 или рассчитываемое, как указано в п. 6.3.2.

Ударный ток трехфазного КЗ ( $i_{\text{уд}}$ ) в электроустановках с одним источником энергии (энергосистема или автономный источник) рассчитывают по формуле

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2}I_{п0}K_{\text{уд}}, \quad (6.17)$$

где  $K_{\text{уд}}$  – ударный коэффициент.

В практических расчетах значение  $K_{уд}$  может быть определено графически по кривой  $K_{уд} = f(X/R)$ , представленной на рис. 6.

**Учет подпитки от асинхронного двигателя.** Начальное действующее значение периодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей ( $I_{п0АД}$ ) в килоамперах рассчитывают по формуле

$$I_{п0АД} = \frac{E_{ф.АД}''}{\sqrt{(X_{АД}'' + X_{1\Sigma})^2 + (R_{АД} + R_{1\Sigma})^2}}, \quad (6.18)$$

где  $X_{АД}''$  и  $R_{АД}$  – соответственно сверхпереходное индуктивное и активное сопротивления электродвигателя, мОм;  $E_{ф.АД}''$  – сверхпереходная ЭДС асинхронного электродвигателя;  $R_{1\Sigma}$  и  $X_{1\Sigma}$  – суммарное индуктивное и суммарное активное сопротивления прямой последовательности цепи, включенной между электродвигателем и точкой КЗ, мОм.

Значение ударного тока от асинхронных электродвигателей определяется по формуле:

$$i_{у.АД} = K_{уд.АД} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{п0АД}, \quad (6.19)$$

где  $\sqrt{2} \cdot I_{п0АД}$  – амплитудное значение тока подпитки места КЗ от электродвигателя, кА;  $K_{уд.АД}$  – ударный коэффициент, значение которого для практических расчетов может быть принято примерно равным 1 из-за быстрого затухания апериодической составляющей тока КЗ от асинхронных электродвигателей.

### 6.3.2. Расчеты дуговых КЗ с помощью снижающего коэффициента $K_c$

Данная методика приводится в ГОСТ 28249-93 на расчет токов КЗ в электроустановках напряжением до 1 кВ [1]. Она заключается в том, что предлагается определять значения наиболее вероятных токов дуговых КЗ (симметричных и несимметричных) с помощью токов металлических КЗ и снижающего (поправочного) коэффициента  $K_c$ , учитывающего уменьшение токов дуговых КЗ по сравнению с металлическими КЗ в зависимости от суммарного сопротивления расчетной сети до точки КЗ.

Зависимости коэффициента  $K_c$ , найденного экспериментально, для начального момента КЗ (кривая 1) и установившегося КЗ (кривая 2) от сопротивления цепи КЗ приведены на рис. 8.

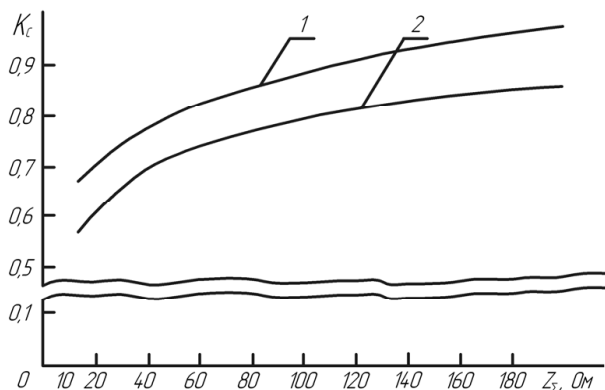


Рис. 8. Кривые зависимости  $K_c$  от сопротивления цепи КЗ:  
 1 – начало процесса дугового замыкания  $t_{кз} < 0,05$  с; 2 – установившийся процесс дугового замыкания  $t_{кз} > 0,05$  с

Для определения наиболее вероятных токов дуговых КЗ, симметричных и несимметричных, необходимо вначале определить значения суммарных сопротивлений до места КЗ и соответствующих им токов металлических КЗ. Затем по кривым (рис. 8) определить значение коэффициента  $K_c$  для требуемого вида КЗ.

В общем виде ток дугового КЗ в соответствии с данной методикой можно представить следующим выражением:

$$I_{п0min} = I_{п0max} \cdot K_c, \quad (6.20)$$

где  $I_{п0max}$  – ток металлического КЗ;  $K_c$  – снижающий коэффициент, определяемый по рис. 8.

**Пример.** Необходимо рассчитать токи трехфазного КЗ в сети 0,4 кВ собственных нужд электростанции. Расчетная схема представлена на рис. 9.

**Решение.** Расчеты выполняются в соответствии с методикой, рекомендованной ГОСТ 28249-93 на расчеты токов КЗ в сетях напряжением до 1 кВ. Короткие замыкания рассчитываются на шинах 0,4 кВ РУ (точка К1) и на вторичной силовой сборке за кабелем КЛ1 (точка К2).

В данном примере расчеты дуговых КЗ выполняются с использованием снижающего коэффициента  $K_c$ , поэтому переходные сопротивления контактов контактных соединений кабелей и

шинопроводов в расчетных выражениях определения суммарного активного сопротивления  $R_{\Sigma}$  не учитываются: эти сопротивления учтены при построении характеристик зависимости коэффициента  $K_C$  от полного суммарного сопротивления до места КЗ,  $K_C = f(Z_{\Sigma})$ , полученных экспериментальным путем.

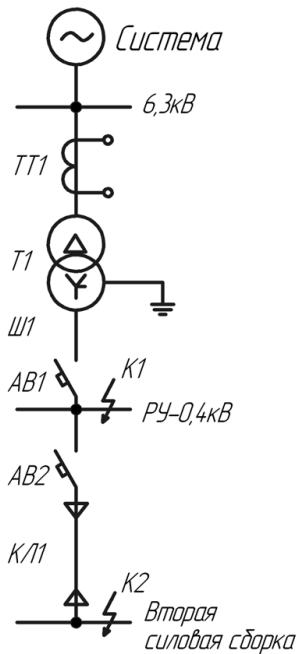


Рис. 9. Расчетная схема к примеру

### Параметры расчетной схемы

Система:

Мощность короткого замыкания

$$S_K = 100 \text{ МВА,}$$

$$U_{НВН} = 6,3 \text{ кВ.}$$

Трансформатор Т1:

ТС3-1000/6,0; схема соединения обмоток  $\Delta/Y_0$ ,

$$S_H = 1000 \text{ кВА,}$$

$$U_{НВН} = 6,3 \text{ кВ, } U_{ННН} = 0,4 \text{ кВ,}$$

$$U_K = 8 \%,$$

$$R_T = 1,9 \text{ мОм},$$
$$X_T = 12,65 \text{ мОм}.$$

*Шинопровод Ш1:*

ШМА-4-1600, длина 15 м,

$$R_{\text{уд}} = 0,03 \text{ мОм/м},$$

$$X_{\text{уд}} = 0,014 \text{ мОм/м}.$$

*Трансформатор тока ТТ1:*

$$K_{\text{ТТ}} = 150/5,$$

$$R_{\text{ТТ}} = 0,33 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{ТТ}} = 0,3 \text{ мОм}.$$

*Кабельная линия КЛ1:*

АВВГ-(3·185+1·70),

$$l = 100 \text{ м},$$

$$R_{\text{уд}} = 0,208 \text{ мОм/м},$$

$$X_{\text{уд}} = 0,063 \text{ мОм/м}.$$

*Автоматический выключатель АВ1:*

тип «Электрон»,  $I_H = 1000 \text{ А}$ ,

$$R_{\text{КВ}} = 0,25 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{КВ}} = 0,1 \text{ мОм}.$$

*Автоматический выключатель АВ2:*

тип АЗ794С,  $I_H = 400 \text{ А}$ ,

$$R_{\text{КВ}} = 0,65 \text{ мОм},$$

$$X_{\text{КВ}} = 0,17 \text{ мОм}.$$

### ***Расчет параметров схемы замещения (прямая последовательность)***

Все сопротивления расчетной схемы приводятся к  $U_{\text{БАЗ}} = 0,4 \text{ кВ}$ .

**Система.** Сопротивление системы учитывается индуктивным сопротивлением в схеме замещения:

$$X_{\text{СЭ}} = \frac{U_{\text{Н.Н.}}^2}{S_{\text{к}}} \cdot 10^3 = \frac{0,4^2}{100} \cdot 10^3 = 1,6 \text{ мОм}.$$

**Трансформатор.** Активные и индуктивные сопротивления обмоток трансформатора.  $R_T = 1,9 \text{ мОм}$ ,  $X_T = 12,65 \text{ мОм}$ .

**Шинопровод Ш1.** Сопротивление шинпровода Ш1 определяем по известным удельным сопротивлениям шинпровода и его длине:

$$R_{\text{Ш1}} = 0,03 \cdot 15 = 0,45 \text{ мОм}, \quad X_{\text{Ш1}} = 0,014 \cdot 15 = 0,21 \text{ мОм}.$$

**Кабельная линия КЛ1.** Сопротивления линии КЛ1 определяются по известным удельным сопротивлениям кабеля и его длине:

$$R_{\text{КЛ1}} = 0,208 \cdot 100 = 20,8 \text{ мОм}, \quad X_{\text{КЛ1}} = 0,063 \cdot 100 = 6,3 \text{ мОм}.$$

Схема замещения прямой последовательности представлена на рис. 10.

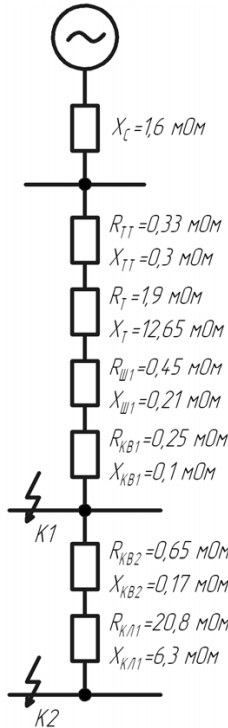


Рис. 10. Схема замещения прямой последовательности к примеру

### **Расчет токов короткого замыкания для точки К<sub>1</sub>**

Ток металлического трехфазного КЗ  $I_{\text{н0max}}$  определяется по формуле:

$$I_{\text{н0max}} = \frac{U_{\text{ср.НН}}}{\sqrt{3} \sqrt{R_{1\Sigma}^2 + X_{1\Sigma}^2}}.$$

По схеме замещения прямой последовательности суммарные сопротивления  $R_{1\Sigma}$  и  $X_{1\Sigma}$  определяем арифметическим суммированием сопротивлений до точки КЗ:



$$R_{1\Sigma} = 0,33 + 1,9 + 0,45 + 0,25 = 2,93 \text{ мОм};$$

$$X_{1\Sigma} = 1,6 + 0,3 + 12,65 + 0,21 + 0,1 = 14,86 \text{ мОм}.$$

Полное суммарное сопротивление до точки  $K_1$ :

$$Z_{\Sigma}^{(3)} = \sqrt{2,93^2 + 14,86^2} = 15,15 \text{ мОм}.$$

Ток трехфазного металлического КЗ:

$$I_{n0\max} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 15,15} = 15,27 \text{ кА}.$$

Ток трехфазного дугового КЗ определяем с использованием снижающего коэффициента  $K_C$  (рис. 8).

Расчет дугового трехфазного КЗ выполняется в следующем порядке.

1. Определяются значения снижающего коэффициента для начального момента КЗ ( $K_{C1}$ ) и для установившегося КЗ ( $K_{C2}$ ) по кривым 1, 2 рис. 8.

При  $Z_{\Sigma}^{(3)} = 15,15 \text{ мОм}$ ,  $K_{C1} = 0,67$ , а  $K_{C2} = 0,58$ .

2. Ток трехфазного дугового КЗ определяется по формуле

$$I_{n0\min} = I_{n0\max} \cdot K_C.$$

$$I_{n0\min} = 15,27 \cdot 0,67 = 10,23 \text{ кА}; \quad t \approx 0.$$

$$I_{n0\min} = 15,27 \cdot 0,58 = 8,86 \text{ кА}; \quad t_{\text{КЗ}} > 0,06 \text{ с}.$$

Ударный ток КЗ определяем по формуле:

$$i_{\text{уд}\max} = K_{\text{уд}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n0\max}.$$

Ударный коэффициент  $K_{\text{уд}}$  определяем по характеристике, приведенной на рис. 6.

Находим соотношение

$$\frac{X_{\Sigma}^{(3)}}{R_{\Sigma}^{(3)}} = \frac{14,86}{2,93} = 5,07.$$

Этому отношению соответствует  $K_{\text{уд}} = 1,6$ .

Определяем

$$i_{\text{уд}\max} = 1,6 \cdot \sqrt{2} \cdot 15,27 = 34,6 \text{ кА}.$$

## 7. ВЫБОР ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

При выборе электрооборудования СЭСПП следует иметь в виду, что значительная его часть может быть комплектной. Поэтому после определения параметров (напряжений и токов) СЭС необходимо выбрать соответствующее комплектное оборудование, выявить его составные элементы и только после этого произвести проверку типового и остального оборудования по условиям утяжеленного режима работы и устойчивости к токам КЗ.

Выбранные аппараты и проводники должны:

- 1) длительно проводить рабочие токи нормального и утяжеленного режимов работы без чрезмерного повышения температуры;
- 2) противостоять кратковременному электродинамическому и термическому действиям токов КЗ;
- 3) удовлетворять требованиям экономичности.

В соответствии с существующими нормами [4; 5; 6; 17; 25] электрооборудование выбирается и проверяется по параметрам, указанным в табл. 11.

В проектируемой СЭСПП необходимо выбрать и проверить следующее электрооборудование.

1. Выключатели, разъединители, отделители, короткозамыкатели, разрядники схемы внешнего электроснабжения.
2. Воздушную или кабельную линию схемы внешнего электроснабжения, соединяющую подстанцию энергосистемы и ГПП.
3. Трансформаторы собственных нужд ГПП.
4. Тип и ячейки распределительного устройства (РУ) на стороне низшего напряжения ГПП и ячейки РУ РП. Выключатели, трансформаторы тока и напряжения, устанавливаемые в этих ячейках.
5. Токоограничивающие реакторы и токопроводы напряжением 6 или 10 кВ, соединяющие силовые трансформаторы ГПП и РУ низшего напряжения ГПП или соединяющие ГПП и мощные РП. Опорные изоляторы.
6. Кабельные линии напряжением выше 1000 и до 1000 В, шинопроводы до 1000 В.
7. Цеховые трансформаторные подстанции (ТП). Коммутационные аппараты на стороне высшего и низшего напряжений этих ТП.

8. Коммутационные аппараты низковольтных распределительных пунктов.

Перед проверкой коммутационной и измерительной аппаратуры должно быть дано обоснование и сделан выбор комплектного оборудования СЭС, если такое оборудование есть.

Выбор электрооборудования производится по каталогам производителей оборудования, недостающие технические данные выбранного электрооборудования допускается принимать из справочной и технической литературы.

Таблица 11

Условия выбора и проверки электрических аппаратов или проводников

Электрический аппарат или проводник	Условия выбора и проверки
Выключатель	$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{СЕТИ.НОМ}},$ $I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ПРОД.РАСЧ}} = I_{\text{РАБ.НБ}},$ $I_{\text{ПГДОП}} \geq I_{\text{ПГ.РАСЧ}} \text{ (при допустимости перегрузки выключателя),}$ $I_{\text{ВКЛ.НОМ}} \geq I_{\text{П0}},$ $i_{\text{ВКЛ.НОМ}} \geq i_{\text{УД}},$ $I_{\text{ПРСКВ}} \geq I_{\text{П0}},$ $i_{\text{ПРСКВ}} = i_{\text{ДИН}} \geq i_{\text{УД}},$ $P_{\text{ТЕРНОМ}} \cdot t_{\text{ТЕРНОМ}} \geq B_{\text{К}},$ $I_{\text{ОТКЛ.НОМ}} \geq I_{\text{Пт}},$ $i_{\text{А.НОМ}} = \sqrt{2}\beta_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{ОТКЛ.НОМ}} \geq i_{\text{Ат}}.$ <p>Для установки, где <math>\sqrt{2}\beta_{\text{НОМ}} \cdot I_{\text{ОТКЛ.НОМ}} &lt; i_{\text{Ат}}</math>, допускается выполнение условия:</p> $\sqrt{2}(1 + \beta_{\text{НОМ}}) \cdot I_{\text{ОТКЛ.НОМ}} > i_{\text{Кт}} = \sqrt{2} \cdot I_{\text{Пт}} + i_{\text{Ат}}.$ <p>Далее проверяется: <math>U_{\text{В.НОМ}} \geq U_{\text{В}}</math></p>
Разъединитель	$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{СЕТИ.НОМ}},$ $I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ПРОД.РАСЧ}} = I_{\text{РАБ.НБ}},$ $i_{\text{ПРСКВ}} = i_{\text{ДИН}} \geq i_{\text{УД}},$ $P_{\text{ТЕРНОМ}} \cdot t_{\text{ТЕРНОМ}} \geq B_{\text{К}},$ $I_{\text{ОТКЛ.ДОП}} \geq I_{\text{РАБт}} \text{ (допускается в строго оговоренных частных случаях)}$
Отделитель	$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{СЕТИ.НОМ}},$ $I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ПРОД.РАСЧ}},$ $i_{\text{ПРСКВ}} = i_{\text{ДИН}} \geq i_{\text{УД}},$

Электрический аппарат или проводник	Условия выбора и проверки
Отделитель	$I_{\text{ТЕРНОРМ}}^2 \cdot t_{\text{ТЕРНОРМ}} \geq B_{\text{к}},$ $I_{\text{ОТКЛ.НОРМ}} \geq I_{\text{РАБт}} \text{ (допускается в строго оговоренных частных случаях)}$
Короткозамыкатель	$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{СЕТИ.НОМ}},$ $i_{\text{ПРСКВ}} = i_{\text{ДИН}} \geq i_{\text{УД}},$ $I_{\text{ТЕРНОРМ}}^2 \cdot t_{\text{ТЕРНОРМ}} \geq B_{\text{к}}$
Предохранитель	$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{СЕТИ.НОМ}},$ $I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ПРОД.РАСЧ}},$ $I_{\text{ОТКЛ.НОРМ}} \geq I_{\text{ПРОЖ}}.$ <p>Соответствие время-токовой характеристики предохранителя расчетным условиям защищаемой цепи</p>
Выключатель нагрузки	$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{СЕТИ.НОМ}},$ $I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ПРОД.РАСЧ}},$ $i_{\text{ВКЛ}} \geq i_{\text{УД}},$ $I_{\text{ПРСКВ}} \geq I_{\text{ПО}},$ $i_{\text{ПРСКВ}} = i_{\text{ДИН}} \geq i_{\text{УД}},$ $I_{\text{ТЕРНОРМ}}^2 \cdot t_{\text{ТЕРНОРМ}} \geq B_{\text{к}},$ $I_{\text{ОТКЛ.НОМ}} = I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{РАБт}}$ <p>В отдельных случаях <math>I_{\text{ОТКЛ.НОМ}} = I_{\text{НОМ}}</math> (соотношение указывается изготовителем в эксплуатационных документах). Соответствие время-токовой характеристики предохранителя расчетным условиям защищаемой цепи (при установке выключателя нагрузки последовательно с предохранителем)</p>
Разрядник	$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{СЕТИ.НОМ}},$ $U_{\text{ПРОБ}} \leq U_{\text{ДОП.РАСЧ}},$ $U_{\text{ОСТ.НБ}} \leq U_{\text{ДОП.РАСЧ}},$ $i_{\text{СОПР.ДОП}} = i_{\text{ОТКЛ}} \geq i_{\text{СОПР.РАСЧ}}$
Трансформатор тока	$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{СЕТИ.НОМ}},$ $I_{\text{НОМ}} \geq I_{\text{ПРОД.РАСЧ}},$ $i_{\text{ДИН}} = k_{\text{ДИН}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{НОМ}} \geq i_{\text{УД}},$ $I_{\text{ТЕРНОРМ}}^2 \cdot t_{\text{ТЕРНОРМ}} = (k_{\text{ТЕР}} \cdot I_{\text{НОМ}})^2 \cdot t_{\text{ТЕРНОРМ}} \geq B_{\text{к}}$ $Z_{2\text{НОМ}} > Z_{2\text{РАСЧ}} \approx r_{2\text{РАСЧ}} \text{ (в необходимом классе точности).}$
Трансформатор напряжения	$U_{\text{НОМ}} \geq U_{\text{СЕТИ.НОМ}},$ $S_{\text{НОМ}} > Z_{2\text{РАСЧ}} \text{ (в необходимом классе точности),}$ $S_{\text{ПРЕД}} = S_{\text{МАХ}} \geq S_{2\text{НБ}} \text{ (в режиме наибольшей отдаваемой мощности)}$

Электрический аппарат или проводник	Условия выбора и проверки
Опорный изолятор	$U_{НОМ} \geq U_{СЕТИ.НОМ}$ , $F_{ДОП} = 0,6F_{РАЗР} \geq F_{РАСЧ}$ (для одиночных изоляторов), $F_{ДОП} = F_{РАЗР} \geq F_{РАСЧ}$ (для спаренных изоляторов)
Проходной изолятор	$U_{НОМ} \geq U_{СЕТИ.НОМ}$ , $I_{НОМ} \geq I_{ПРОД.РАСЧ}$ , $F_{ДОП} = 0,6F_{РАЗР} \geq F_{РАСЧ}$
Реактор	$U_{НОМ} \geq U_{СЕТИ.НОМ}$ , $I_{НОМ} \geq I_{ПРОД.РАСЧ}$ , $i_{ДИН} \geq i_{УД}$ , $I_{ТЕР.НОМ} \cdot \sqrt{t_{ТЕР.НОМ}} \geq \sqrt{B_K}$ , $X_p \geq i_p$ (определяется по условиям необходимого ограничения токов КЗ и предельно допустимой потери напряжения на реакторе в нормальном режиме работы)
Автоматический выключатель	$U_{НОМ} \geq U_{СЕТИ.НОМ}$ , $I_{НОМ} \geq I_{ПРОД.РАСЧ}$ , $i_{ВКЛ.НБ} \geq i_{УД}$ , $i_{ДИН} \geq i_{УД}$ , $P_{ТЕР.НОМ} \cdot t_{ТЕР.НОМ} \geq B_K$ , $I_{ОТКЛ.НБ} \geq I_{Пт.ОЖ}$
Контактор	$U_{НОМ} \geq U_{СЕТИ.НОМ}$ , $I_{НОМ} \geq I_{ПРОД.РАСЧ}$ , $P_{ПОДКЛ.ДОП} \geq P_{ПРОД.РАСЧ}$
Магнитный пускатель	$U_{НОМ} \geq U_{СЕТИ.НОМ}$ , $I_{НОМ} \geq I_{ПРОД.РАСЧ}$ , $P_{ПОДКЛ.ДОП} \geq P_{ПРОД.РАСЧ}$
Рубильник	$U_{НОМ} \geq U_{СЕТИ.НОМ}$ , $I_{НОМ} \geq I_{ПРОД.РАСЧ}$ , $i_{ДИН} \geq i_{УД}$ , $P_{ТЕР.НОМ} \cdot t_{ТЕР} \geq B_K$ , $I_{ОТКЛ.НОМ} \geq I_{РАБт}$ (в случае если рубильник имеет дугогасительные камеры или разрывные контакты)
Шина, провод неизолированный	$S \approx S_{ЭК} = I_{НОМ.РАСЧ} / J_{ЭК}$ (за исключением сборных шин электроустановок, сетей напряжением до 1кВ с $T_{НБ} < 400 \div 500$ ч, сетей временных сооружений и ответвлений к электроприемникам напряжением до 1 кВ, к резисторам, реакторам и т. п.)

Электрический аппарат или проводник	Условия выбора и проверки
Шина, провод неизолированный	Сечение проводников воздушных линий 330–1150 кВ выбирается по экономическим интервалам. $I_{\text{дл.доп}} = I_{\text{прод.доп}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $\sigma_{\text{доп}} \geq \sigma_{\text{расч}}$ $\vartheta_{\text{кр.доп}} \geq \vartheta_{\text{к}} \text{ или } S \geq S_{\text{тер.мин}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{C_{\text{т}}}$
Кабель, провод изолированный	$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети.ном}}$ $S \approx S_{\text{эж}} = \frac{I_{\text{норм.расч}}}{J_{\text{эж}}}$ $I_{\text{дл.доп}} = I_{\text{прод.доп}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $I_{\text{пг.доп}} \geq I_{\text{пг.расч}}$ $\vartheta_{\text{кр.доп}} \geq \vartheta_{\text{к}} \text{ или } S \geq S_{\text{тер.мин}} = \frac{\sqrt{B_{\text{к}}}}{C_{\text{т}}}$
Закрытый шинный токопровод	$U_{\text{ном}} \geq U_{\text{сети.ном}}$ $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{прод.расч}}$ $i_{\text{дин}} \geq i_{\text{уд}}$ $P_{\text{тер.норм}} \cdot t_{\text{тер.норм}} \geq B_{\text{к}}$

### Примечания

1. В правых частях неравенства величины  $I_{\text{п0}}$ ,  $i_{\text{уд}}$ ,  $B_{\text{к}}$ ,  $I_{\text{пр}}$ ,  $i_{\text{ар}}$ ,  $U_{\text{в}}$ ,  $I_{\text{п0.ож}}$ ,  $I_{\text{пр.ож}}$ ,  $\vartheta_{\text{к}}$  должны быть представлены расчетными значениями, т. е. наибольшими в условиях конкретной установки или цепи.
2. В таблице приняты следующие обозначения  $I_{\text{п0.ож}}$  – действующее значение периодической составляющей ожидаемого тока КЗ в начальный момент;  $I_{\text{пр.ож}}$  – действующее значение периодической составляющей ожидаемого тока КЗ в момент начала расхождения дугогасительных контактов аппарата;  $I_{\text{рабт}}$  – рабочий ток цепи в момент начала расхождения дугогасительных контактов аппарата;  $U_{\text{проб}}$  – импульсивное пробивное напряжение разрядника;  $U_{\text{ост.нб}}$  – наибольшее остающееся напряжение на разряднике при прохождении через него тока;  $U_{\text{доп.расч}}$  – допустимое расчетное напряжение на изоляции элементов электроустановки, защищаемых данным разрядником;  $i_{\text{сопр.расч}}$  – расчетное значение сопровождающего тока разрядника;  $i_{\text{сопр.доп}}$  – предельно допустимое значение сопровождающего тока, который разрядник может оборвать;  $P_{\text{подкл.доп}}$  – допустимая мощность электродвигателей, подключаемых к сети данным аппаратом;  $P_{\text{подкл.расч}}$  – расчетная мощность электродвигателей, подключаемых к сети данным аппаратом;  $T_{\text{нб}}$  – время использования наибольшей нагрузки.

## 8. ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

**Задача 1.** Рассчитать по длительно допустимому току трехфазную кабельную линию, проложенную в земле в одной траншее с двумя другими кабелями для питания цеховой электроустановки. Расчетная мощность установки  $P = 120$  кВт, напряжение  $U = 380$  В,  $\cos \varphi = 0,8$ .

Расстояние между кабелями (число кабелей 3) составляет 100 мм.

Поправочный коэффициент на число работающих кабелей составляет 0,85.

**Задача 2.** Определить расчетную нагрузку группы 3-фазных электроприемников длительного режима работы по следующим данным:

2 эл. двиг. – 4 кВт;  $k_{и} = 0,1$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = 1$ ;

2 эл. двиг. – 3 кВт;  $k_{и} = 0,15$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = 1,1$ ;

2 эл. двиг. – 10 кВт;  $k_{и} = 0,2$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = 0,8$ .

**Задача 3.** Определить расчетные нагрузки группы электроприемников ( $P_p$ ;  $Q_p$ ;  $S_p$ ) длительного режима работы.

Эффективное число электроприемников  $n_3 = 400$ , групповой коэффициент использования  $K_{и} = 0,35$ , установленная мощность электроприемников  $P_{и} = 600$  кВт;  $\operatorname{tg} \varphi = 0,8$ .

**Задача 4.** Определить расчетную активную мощность группы электроприемников. В группе 8 электродвигателей. Эффективное число электроприемников равно 3.

Установленная мощность приемников длительного режима 30 кВт, повторно-кратковременного режима – 20 кВт. Коэффициент загрузки электроприемников длительного режима  $K_3 = 0,9$ , повторно-кратковременного режима  $K_3 = 0,75$ .

**Задача 5.** Определить расчетные нагрузки группы электроприемников ( $P_p$ ;  $Q_p$ ;  $S_p$ ) по следующим данным:

а)  $2 \times 50$  кВт,  $2 \times 30$  кВт,  $K_{и} = 0,4$ ,  $\operatorname{tg} \varphi = 1,1$ ;

б)  $1 \times 30$  кВт,  $5 \times 20$  кВт,  $K_{и} = 0,3$ ,  $\operatorname{tg} \varphi = 1$ ;

в) 14 электродвигателей разной мощности – от 7 до 15 кВт

общей мощности 170 кВт,  $K_{и} = 0,2$ ,  $\operatorname{tg} \varphi = 0,8$ ;

г)  $1 \times 20$  кВт,  $k_{и} = 0,25$ , ПВ = 60 %,  $\operatorname{tg} \varphi = 1$ .

**Задача 6.** Определить расчетную нагрузку шкафа, к которому подключены две кран-балки, каждая из которых оборудована тремя двигателями: 4,5 + 15 + 22 кВт при ПВ = 25 %,  $\cos \varphi = 0,45$  и тельфер с двигателем мощностью 10 кВт при ПВ = 40 %,  $\cos \varphi = 0,45$ . Режим работы кранов и тельфера – средний.

**Задача 7.** Определить расчетные нагрузки распределительного шинпровода ШРА.

Технические данные подключенного оборудования приведены в табл. 12.

Таблица 12

Наименование электроприемника (ЭП)	Количество ЭП, шт.	Единичная мощность ЭП (установленная), кВт
Фрезерные станки	14	12,6
Шлифовальные станки	8	7,5
Сверлильные станки	8	5,8
Прессы	12	10
Печи сопротивления	6	30

**Задача 8.** Определить расчетные и средние нагрузки завода капронового волокна, состоящего из цехов (табл. 13) с соответствующими установленными мощностями  $P_y$ .

Таблица 13

Пример расчета нагрузок завода капронового волокна

Наименование цехов	Установленная мощность $P_y$ , кВт
1. Химический цех	3100
2. Прядильный цех	1200
3. Крутильный цех	1500
4. Цех регенерации отходов	2400

**Задача 9.** Определить расчетную нагрузку шинного завода, состоящего от следующих цехов:

- подготовительный цех (синхронные двигатели 6 кВ) – 4600 кВт;
- то же (двигатели асинхр. низкого напряжения) – 1560 кВт;
- автокамерный цех (двигатели 6 кВ) – 5200 кВт;



- то же (двигатели низкого напряжения) – 2100 кВт;
- цех вулканизации – 1300 кВт.

Коэффициент разновременности максимума нагрузки принять равным 0,85.

**Задача 10.** Асинхронный электродвигатель рассчитан для работы в повторно-кратковременном режиме с ПВ = 25 % при мощности  $P_{н25} = 10$  кВт. Определить мощность, которую электродвигатель может развивать, не перегреваясь сверх нормы, при продолжительности включения ПВ = 60 % (ПВ<sub>60</sub>).

**Задача 11.** Определить расчетную нагрузку, создаваемую многоточечной сварочной машиной МТП-600,  $S_y = 600$  кВА,  $K_3 = 0,7$ ; ПВ = 0,03.

**Задача 12.** Определить расчетную нагрузку сварочной машины точечной сварки типа МТМС-10х35, состоящей из 10 однофазных трансформаторов ( $U_n = 380$  В, ПВ = 12,5 %,  $S_n = 33$  кВА,  $K_3 = 1,5$ ). По условиям технологического режима одновременно бывают включены только 5 трансформаторов и сварка производится в две очереди. При расчете принять фактическое ПВ<sub>ф</sub> = 2ПВ, так как сварка производится в два цикла.

**Задача 13.** Определить расчетную нагрузку троллея, от которого питаются два мостовых крана с тяжелым режимом работы, оборудованные тремя двигателями каждый (28 + 33 + 16 при ПВ = 0,4).

**Задача 14.** Два однофазных электроприемника паспортной мощностью соответственно: первый  $S_{1ПВ} = 80$  кВА, ПВ1 = 0,5;  $\cos \varphi_1 = 0,5$ ; второй  $S_{2ПВ} = 30$  кВА, ПВ2 = 0,65;  $\cos \varphi_2 = 0,53$  включены в фазы АВ и ВС. Определить значение  $P_p$ .

**Задача 15.** Три однофазные печи сопротивления мощностью 30, 60 и 90 кВт включены соответственно в фазы А, В и С. Определить условную трехфазную номинальную мощность  $P_{ном, усл}$ .

**Задача 16.** Для освещения производственного помещения площадью  $12 \times 6 = 72$  м<sup>2</sup> применяют светильники ЛДОР с двумя люминесцентными лампами ЛБ-40, подвешенными на высоте 3,6 м над освещаемой поверхностью. Предполагается расположить

светильники в два ряда. В двух метрах от каждой торцевой стены основные работы не производятся. Требуется обеспечить в пределах рабочей зоны освещенность  $E = 300$  лк, приняв коэффициент запаса  $K_{\text{зап}} = 1,5$ .

**Задача 17.** Спроектировать электрическое освещение сборочно-монтажного цеха машиностроительного завода. Площадь цеха  $1200 \text{ м}^2$  ( $A = 30 \text{ м}$ ,  $B = 40 \text{ м}$ ), высота  $H = 5 \text{ м}$  (чистый бетонный потолок, бетонные стены с окнами, пол из чугунных плит).

**Задача 18.** Пользуясь методом коэффициента использования светового потока, определить необходимое число светильников типа ЛДОР с лампами 2 x ЛБ-40 ( $\Phi_{\text{л}} = 2480 \text{ лм}$ ) и интервал между ними для следующих условий:  $S = 20 \times 8 \text{ м}$ ;  $h = 3 \text{ м}$ ;  $E = 150 \text{ лк}$ ;  $K_{\text{зап}} = 1,5$ ;  $Z = 1,1$ ;  $K_{\text{отр}} = 50/30/10 \%$ .

**Задача 19.** Пользуясь точечным методом расчета, определить число и расположение люминесцентных светильников ЛДР с лампой ЛБ-40 для освещения механического цеха размером  $40 \times 15 \text{ м}$ , высота подвески светильников  $h = 4 \text{ м}$ ,  $E = 200 \text{ лк}$ ,  $K_{\text{зап}} = 1,5$ ,  $M = 1,1$ .

**Задача 20.** Провести расчет трехфазного КЗ для представленной схемы. Значение сверхпереходной ЭДС для системы  $E''_{\text{в.с}} = 1,0$ ,  $S_{\text{б}} = 1000 \text{ МВА}$ ,  $S_{\text{к}} = 5000 \text{ МВА}$ . Для трансформатора типа ТДН 110/10 даны следующие значения:  $S_{\text{т}} = 16 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_{\text{к.т}} = 10,5 \%$ . Для двухцепной воздушной линии известны следующие параметры:  $x_{\text{уд}} = 0,4 \text{ Ом/км}$ ,  $l = 10 \text{ км}$ .

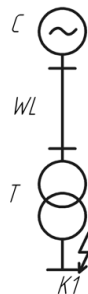


Схема к задаче 20

**Задача 21.** В соответствии с приведенными исходными данными:

- выбрать сечение кабельной линии по экономической плотности тока;
- проверить выбранное сечение на нагрев;
- рассчитать значения токов трехфазного короткого замыкания в точках К1 и К2 (см. схему ниже);
- проверить сечение кабельной линии на стойкость к действию токов короткого замыкания.

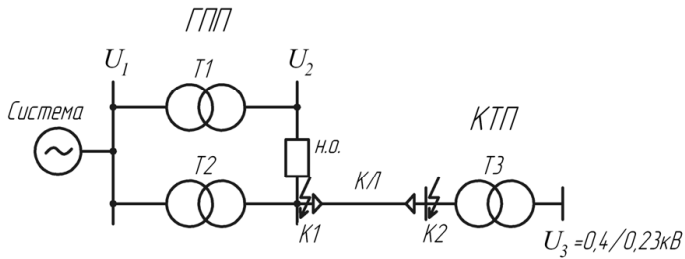


Схема к задаче 21

Дано:

Мощность энергетической системы:  $S_{н.с} = 600$  МВА.

Внутреннее сопротивление системы до шин  
напряжением  $U_1$  ГПП предприятия:  $X_c = 1,7$ .

На ГПП установлены трансформаторы (число  $x$  – мощность  
трансформатора):  $x = 2 \times 10$  МВА.

Напряжение высшей стороны  $U_1$ :  $U_1 = 35$  кВ.

Напряжение низшей стороны  $U_2$ :  $U_2 = 6$  кВ;  $U_k = 7,5$  %.

Длина кабельной линии от ГПП до КТП:  $L = 1,2$  км.

Мощность трансформатора на КТП:  $S_{н} = 630$  кВА.

Напряжение:  $U_3 = 0,4/0,23$ .

Число пользования максимума нагрузки:  $T_m = 3800$  ч.

Время срабатывания релейной защиты:  $t_{р.з} = 0,5$  с.

Время отключения выключателя:  $t_{п.в} = 0,1$  с.

Постоянная времени затухания апериодической  
составляющей тока КЗ:  $T_a = 0,05$  с.

## Библиографический список

1. ГОСТ 28249 – 93. Короткие замыкания в электроустановках переменного напряжения до 1 кВ. – Введ. 1995-01-01. – М. : Стандартинформ, 2006. – 45 с.
2. ГОСТ Р 52735 – 2007. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением выше 1 кВ. – Введ. 2008-07-01. – М. : Стандартинформ, 2007. – 36 с.
3. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введ. 2014-07-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – 16 с.
4. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок. – Введ. 2014-08-04. – М. : Норматика, 2014. – 96 с.
5. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы 6-го и 7-го изд. с изм. и доп. по сост. на 1 марта 2007 г. – М. : КНОРУС, 2007. – 488 с.
6. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. – М. : Омега-Л, 2014. – 272 с.
7. РД 153-34.0-20.527-98. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования. – М. : НЦ ЭНАС, 2004. – 152 с.
8. РТМ 36.18.32.4-92. Указания по определению электрических нагрузок. – М. : ВНИИПИ Тяжпромэлектропроект, 1992. – 14 с.
9. НТП ЭПП-94. Нормы технологического проектирования. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий. – М. : Тяжпромэлектропроект, 1994. – 67 с.
10. СО 153-34.20.118-2003. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. – М. : ФГУП НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. – 53 с.
11. Алиев, И.И. Кабельные изделия : справочник / И.И. Алиев, С.Б. Казанский. – М. : Радиософт, 2002. – 224 с.
12. Андреев, В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения : учеб. для вузов / В.А. Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2006. – 639 с.

13. Жежеленко, И.В. Методы вероятностного моделирования в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей / И.В. Жежеленко, Е.А. Кротков, В.П. Степанов. – Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2001. – 288 с.
14. Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский. – М. : Издательский дом МЭИ, 2006. – 320 с.
15. Кнорринг, Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения / Г.М. Кнорринг. – М. : Оникс, 2012. – 344 с.
16. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий : учеб. для вузов / Б.И. Кудрин. – М. : Интермет Инжиниринг, 2007. – 670 с.
17. Макаров, Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ : учеб.-произв. изд. : в 6 т. / Е.Ф. Макаров. – М. : Папирус Про, 2005. – Т. 4. – 637 с.
18. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций. Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования : учеб. пособие для вузов / Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – 5 изд. – М. : Энергоатомиздат, 2013. – 608 с.
19. Ополева, Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения : справочник / Г.Н. Ополева. – М. : ФОРУМ, 2008. – 479 с.
20. Рожин, А.Н. Внутрицеховое электроснабжение : учеб. пособие для выполнения курсового и дипломного проектов / А.Н. Рожин, Н.С. Бакшаева. – Киров : Изд-во ВятГУ, 2006. – 259 с.
21. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад. – 4-е изд., испр. и доп. – СПб. : ПЭИПК, 2013. – 350 с.
22. Справочник по проектированию электрических сетей и электрооборудования/ под ред. Ю.Г. Барыбина [и др.] – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.
23. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю.Б. Айзенберга. – 3-е изд. перераб. и доп. – М. : Знак, 2006. – 950 с.
24. Экономия энергоресурсов промышленных предприятий : справочно-методическое пособие / под ред. С.К. Сергеева. – Н. Новгород : НГТУ, НИЦЕ, 2001. – 296 с.

25. Электротехнический справочник. В 4 т. Т. 3. Производство и распределение электрической энергии / под общ. ред. В.Г. Герасимова [и др.]. – М. : МЭИ, 2009. – 964 с.
26. Вахнина, В.В. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий : учеб. пособие для вузов / В.В. Вахнина. – 2-е изд., стер. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 68 с.
27. Вахнина, В.В. Проектирование осветительных установок : учеб. пособие / В.В. Вахнина, О.В. Самолина, А.Н. Черненко. – Тольятти : ТГУ, 2008. – 90 с.