



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Электроснабжение»

**О. М. Головач, Ю. Д. Головач**

## **ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к практическим занятиям  
и дипломному проектированию  
для студентов специальности 1-43 01 03  
«Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2011

УДК 621.316(075.8)  
ББК 31.27я73  
Г61

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 10 от 30.06.2010 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Автоматизированный электропривод»  
ГГТУ им. П. О. Сухого *В. В. Тодарев*

**Головач, О. М.**  
Г61      Передача и распределение электрической энергии : метод. указания к практ. занятиям и диплом. проектированию для студентов специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения / О. М. Головач, Ю. Д. Головач. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 60 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

Приведены основные технические и расчетные данные по электрооборудованию, воздушным и кабельным линиям, применяемым в электрических сетях.

Для студентов специальности 1-43 01 05 «Электроснабжение (по отраслям)» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.316(075.8)  
ББК 31.27я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2011

# 1. СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ И АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

## 1.1. Основные определения и обозначения

*Трансформатором* называется электромагнитный аппарат, посредством которого переменный ток одного напряжения преобразуется в переменный ток другого напряжения без изменения его частоты.

Трансформаторы предназначены для преобразования посредством электромагнитной индукции одной или нескольких систем переменного тока в одну или несколько других систем переменного тока. Различают *двух-, трех- и многообмоточные трансформаторы*, имеющие соответственно две, три и более гальванически не связанные обмотки. Передача энергии из первичной цепи трансформатора во вторичную происходит посредством магнитного поля.

*Автотрансформатором* называется трансформатор, две или более обмотки которого гальванически связаны так, что они имеют общую часть. Обмотки АТ связаны электрически и магнитно, и передача энергии из первичной цепи во вторичную происходит как посредством магнитного поля, так и электрическим путем. Помимо гальванически связанных обмоток автотрансформатор может иметь и другие обмотки, не имеющие гальванической связи.

**Классификация трансформаторов.** Трансформатор называется *силовым*, если он применяется для преобразования электрической энергии в электрических сетях и установках, предназначенных для приема и использования электрической энергии. К силовым относятся трансформаторы трехфазные и многофазные мощностью 6,3 кВ\*А и более, однофазные мощностью 5 кВ\*А и более. При меньших мощностях трансформаторы называют *трансформаторами малой мощности*.

Различают силовые трансформаторы *общего назначения*, предназначенные для включения в сети, не отличающиеся особыми условиями работы, или для непосредственного питания приемников электрической энергии, не отличающихся особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы, и силовые трансформаторы *специального назначения*, предназначенные для непосредственного питания сетей или приемников электроэнергии, если эти сети или приемники отличаются особыми условиями работы, характером нагрузки или режимом работы. К числу таких сетей и приемников электрической энергии относятся, например, подземные рудничные и

шахтные сети и установки, выпрямительные установки, электрические печи и т.п.

По исполнению трансформаторы могут быть *трехфазными* и *однофазными*. В трехфазном трансформаторе под обмоткой обычно понимают совокупность соединенных между собой обмоток одного напряжения разных фаз. В *двухобмоточном* трансформаторе различают обмотку ВН, присоединяемую к сети более высокого напряжения, и обмотку НН, присоединяемую к сети низкого напряжения. Обмотку трансформатора, к которой подводится электрическая энергия, называют первичной, а обмотку, от которой энергия отводится, - вторичной. В *трехобмоточном* трансформаторе различают обмотки ВН, СН (среднего напряжения) и НН.

В некоторых случаях, в основном для снижения токов короткого замыкания, применяют трансформаторы с *расщепленными обмотками*. Под ними понимают такие трансформаторы, одна из обмоток которых имеет две (и более) части, нормально гальванически не связанные между собой и имеющие отдельные выводы. Это позволяет использовать каждую часть независимо от других. При необходимости отдельные части обмотки, если их номинальные напряжения одинаковы, могут быть соединены электрически и включены на параллельную работу. Возможна также работа каждой части обмотки при отключении другой. Суммарная мощность всех частей расщепленной обмотки равна номинальной мощности трансформатора.

Трансформаторы различают:

- по числу фаз – одно- и трехфазные;
- по числу обмоток – двух и трехобмоточные;
- по исполнению – наружной и внутренней установки, герметичные, уплотненные;
- по способу охлаждения – *масляные, сухие*, с дутьевым и масляно-водяным охлаждением;
- по способу регулирования напряжения – под нагрузкой, при снятом напряжении.

Этой классификации соответствуют и условные обозначения типов трансформаторов, которые состоят из букв и цифр.

#### Обозначения типов трансформаторов

Автотрансформатор .....	А
Число фаз:	
трехфазный .....	Т
однофазный .....	О

с расщепленной обмоткой .....	Р
Охлаждение:	
естественное воздушное при открытом исполнении .....	С
естественное воздушное при закрытом исполнении .....	СЗ
естественное воздушное при герметичном исполнении .....	СГ
воздушное с принудительной циркуляцией воздуха .....	СД
естественная циркуляция воздуха и масла .....	М
принудительная циркуляция воздуха и естественная циркуляция масла .....	Д
естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с ненаправленным потоком .....	МЦ
принудительная циркуляция воды с естественной циркуляцией масла .....	МВ
естественная циркуляция воздуха и принудительная циркуляция масла с направленным потоком .....	НМЦ
принудительная циркуляция воздуха и масла с ненаправленным потоком масла .....	ДЦ
принудительная циркуляция воздуха и масла с направленным потоком масла .....	НДЦ
принудительная циркуляция воды и масла с ненаправленным потоком масла .....	Ц
естественное охлаждение с негорючим жидким диэлектриком .....	Н
охлаждение жидким негорючим диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха .....	НД
охлаждение негорючим жидким диэлектриком с принудительной циркуляцией воздуха и с направленным потоком жидкого диэлектрика .....	ННД
Трехобмоточный .....	Т
Выполнение одной из обмоток с устройством регулирования под нагрузкой (РПН) .....	Н
То же с автоматическим РПН .....	АН
Особенность исполнения:	
грозоупорное .....	Г
защищенное .....	З
сухой трансформатор с естественным охлаждением (обычно вторая буква в обозначении типа) .....	С
исполнение с литой изоляцией .....	Л
кабельный ввод .....	К
фланцевый вывод (для комплектных трансформаторных подстанций) .....	Ф
усовершенствованная конструкция .....	У
для электрификации железных дорог .....	Ж
для собственных нужд электростанций (обычно последняя буква в обозначении типа) .....	С

После обозначения типа в марке трансформатора указываются номинальная мощность, кВ·А, и класс напряжения обмоток ВН (для

автотрансформаторов с обмоткой СН 110 кВ и выше – также класс напряжения обмотки СН), кВ.

Ниже приведены условные обозначения некоторых трансформаторов:

ТМ-100/10-97У1 – трехфазный двухобмоточный трансформатор с естественным масляным охлаждением, номинальная мощность 100 кВ·А, класс напряжения 10 кВ, конструкция 1997 г., для районов с умеренным климатом, установка на открытом воздухе.

ТСЗ-100/10-95У1 – трехфазный сухой трансформатор защищенного исполнения, номинальная мощность 100 кВ·А, класс напряжения 10 кВ, конструкция 1995 г., для районов с умеренным климатом, установка в закрытых помещениях с естественной вентиляцией.

ТРДНС-40000/35-84Г1 – трехфазный двухобмоточный трансформатор с расщепленной обмоткой НН с принудительной циркуляцией воздуха в системе охлаждения, с РПН, для собственных нужд электростанций, номинальная мощность 40 МВ·А, класс напряжения 35 кВ, конструкция 1984 г., тропического исполнения, установка на открытом воздухе.

АТДЦТН-125000/220/110-98У1 – трехфазный трехобмоточный автотрансформатор с принудительной циркуляцией масла и воздуха в системе охлаждения, с РПН, номинальная мощность 125 МВ·А, с обмотками ВН 220 кВ и СН 110 кВ, конструкция 1998 г., для районов с умеренным климатом, для установки на открытом воздухе.

ТЦ-250000/500-96ХЛ1 – трехфазный двухобмоточный трансформатор с принудительной циркуляцией масла и воды в системе охлаждения, номинальная мощность 250 МВ·А, класс напряжения 500 кВ, конструкция 1996 г., для районов с холодным климатом, для установки на открытом воздухе.

В названии новых трансформаторов буква Г опускается, так как все они исполняются грозоупорными. Некоторые трансформаторы 35 кВ в обозначении имеют букву А, означающую изготовление обмотки из алюминия.

Ряды номинальных мощностей, на которые разрабатываются трансформаторы по ГОСТ 9680-77, приведены ниже, кВ·А:

10	-	16	-	25	-	40	-	63	-
100	-	160	-	250	-	400	-	630	-
1000	-	1600	-	2500	-	4000	-	6300	-
10000	-	16000	-	25000	32000	40000	-	63000	80000
100000	125000	160000	200000	250000	320000	400000	500000	630000	800000
1000000	1250000								

## 1.2. Технические данные трансформаторов

Сведения о трансформаторах, основные каталожные и расчетные данные приведены в табл. 1.1 – 1.12.

На напряжения 6 кВ и 10 кВ выпускаются:

- Силовые масляные трансформаторы общего назначения с естественным охлаждением типов ТМ, ТМФ в диапазоне мощностей 25 – 6300 кВ·А (табл. 1.1 – 1.2).

- Масляные трансформаторы в герметичном исполнении типа ТМГ, в котором масло не сообщается с воздухом и, следовательно, исключается его ускоренное окисление и увлажнение. Отличаются компактностью, занимают меньше места, чем трансформаторы традиционной конструкции. Характеристики приведены в табл. 1.3. (расчетные данные – для напряжения 10 кВ).

- Масляные трансформаторы защищенного исполнения серии ТМЗ с азотной защитой без расширителя, а также трансформаторы с негорючим жидким диэлектриком серии ТНЗ, предназначенные для комплектных трансформаторных подстанций (табл. 1.1 – 1.2).

- Сухие трансформаторы, которые изготавливают с обмотками с нагревостойкой изоляцией. Сухие трансформаторы имеют несколько большие габаритные размеры и массу, меньшую перегрузочную способность, чем масляные, и используются для работы в закрытых неотапливаемых помещениях. К преимуществам сухих трансформаторов относят их пожаробезопасность (отсутствие масла), сравнительную простоту конструкции и относительно малые затраты на эксплуатацию. Сухие трансформаторы выпускаются в диапазоне мощностей 40 – 2500 кВ·А. На новых и реконструируемых объектах применяются сухие трансформаторы с литой изоляцией и естественным воздушным охлаждением типа ТСЗЛ, **aTSE** (более полная информация приведена в [5]). Примеры технических характеристик и расчетных данных приведены в табл. 1.4 (расчетные данные – для напряжения 10 кВ).

На электростанциях и подстанциях с номинальными напряжениями 35 кВ и выше устанавливаются масляные силовые трансформаторы либо автотрансформаторы. Таблицы 1.5 – 1.12 содержат каталожные данные и расчетные параметры двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов классов напряжения 35 – 330 кВ в полном диапазоне мощностей.

Таблица 1.1

## Трехфазные масляные и с негорючим диэлектриком двухобмоточные трансформаторы напряжением 6 кВ

Тип	$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	Пределы регулиру- вания, %	Каталожные данные						Расчетные данные		
			$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ		$U_{\text{к}}$ , %	$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{х}}$ , %	$R_{\text{т}}$ , Ом	$X_{\text{т}}$ , Ом	$Q_{\text{х}}$ , квар
			ВН	НН							
ТМ-25/6	25	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4	4,5	0,60	0,13	3,2	34,6	54,8	0,8
ТМ-40/6	40	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4	4,5	0,88	0,19	3,0	19,80	35,3	1,2
ТМ-63/6	63	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4	4,5	1,28	0,26	2,0	11,6	22,9	1,26
ТМ-100/6	100	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4	4,5	1,97	0,36	2,6	7,09	14,6	2,6
ТМ-160/6	160	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	4,5	2,65	0,56	2,4	3,73	9,41	3,84
ТМ-250/6	250	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	4,5	3,70	0,82	2,3	2,13	6,12	5,75
ТМ-400/6	400	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	4,5	5,50	1,05	2,1	1,24	3,86	8,4
ТМН-400/6	400	$\pm 8 \times 1,5$	6	0,69	4,5	5,9	1,05	2,1	1,33	3,83	8,40
ТМ-630/6	630	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	5,5	7,60	1,56	2,0	0,69	3,07	12,6
ТМН-630/6	630	$\pm 8 \times 1,5$	6	0,69	5,5	8,50	1,56	2,0	0,77	3,05	12,6
ТМ-1000/6	1000	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4 – 10,5	5,5	12,2	2,45	1,4	0,44	1,93	14,0
ТМС-1000/6	1000	$\pm 2 \times 2,5$	3,15-10,5	0,4 – 0,525	8,0	12,2	2,75	1,5	0,44	2,85	15,0
ТМ-1600/6	1600	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4 – 6,3	5,5	18,0	3,30	1,3	0,25	1,21	20,8
ТМ-2500/6	2500	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4 – 10,5	5,5	26,0	4,60	1,0	0,15	0,78	25,0
ТМ-4000/6	4000	$\pm 2 \times 2,5$	6	3,15	6,5	33,5	6,40	0,9	0,075	0,58	36,0
ТМЗ-250/6	250	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4	4,5	3,70	0,74	2,3	2,13	6,12	5,75
ТМЗ-400/6	400	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4	5,5	5,50	1,08	4,5	1,24	4,79	18,0
ТМЗ-630/6	630	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4	6,5	7,60	1,68	3,2	0,69	3,65	20,2
ТМЗ-1000/6	1000	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	5,5	11,0	2,45	1,4	0,40	1,94	14,0
ТМЗ-1600/6	1600	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	5,5	16,5	3,30	1,3	0,23	1,22	20,8
ТМЗ-2500/6	2500	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	5,5	24,0	4,60	1,0	0,14	0,78	25,0
ТНЗ-630/6	630	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4	5,5	7,6	1,68	3,2	0,69	3,07	20,2
ТНЗ-1000/6	1000	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	5,5	11,0	2,45	1,4	0,40	1,94	14,0
ТНЗ-1600/6	1600	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	5,5	16,5	3,30	1,3	0,23	1,22	20,8
ТНЗ-2500/6	2500	$\pm 2 \times 2,5$	6	0,4; 0,69	5,5	24,0	4,60	1,0	0,14	0,78	25,0

Таблица 1.2

## Трехфазные масляные и с негорючим диэлектриком двухобмоточные трансформаторы напряжением 10 кВ

Тип	$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	Пределы регулиру- вания, %	Каталожные данные						Расчетные данные		
			$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ		$U_{\text{к}}$ , %	$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{х}}$ , %	$R_{\text{т}}$ , Ом	$X_{\text{т}}$ , Ом	$Q_{\text{х}}$ , квар
			ВН	НН							
ТМ-25/10	25	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4	4,5	0,60	0,13	3,2	96	152,3	0,80
ТМ-40/10	40	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4	4,5	0,88	0,19	3,0	55	98,1	1,20
ТМ-63/10	63	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4	4,5	1,28	0,26	2,0	32,3	63,7	1,26
ТМ-100/10	100	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4	4,5	1,97	0,36	2,6	19,7	40,5	2,60
ТМ-160/10	160	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	4,5	2,65	0,56	2,4	10,35	26,15	3,84
ТМ-250/10	250	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	4,5	3,70	0,82	2,3	5,92	17,00	5,75
ТМ-400/10	400	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	4,5	5,50	1,05	2,1	3,44	10,71	8,40
ТМН-400/10	400	$\pm 8 \times 1,5$	10	0,69	4,5	5,9	1,05	2,1	3,69	10,63	8,40
ТМ-630/10	630	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	5,5	7,60	1,56	2,0	1,92	8,52	12,6
ТМН-630/10	630	$\pm 8 \times 1,5$	10	0,69	5,5	8,50	1,56	2,0	2,14	8,46	12,6
ТМ-1000/10	1000	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4 – 10,5	5,5	12,2	2,45	1,4	1,22	5,36	14,0
ТМС-1000/10	1000	$\pm 2 \times 2,5$	3,15-10,5	0,4 – 0,525	8,0	12,2	2,75	1,5	1,22	7,91	15,0
ТМ-1600/10	1600	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4 – 6,3	5,5	18,0	3,30	1,3	0,70	3,36	20,8
ТМ-2500/10	2500	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4 – 6,3	5,5	26,0	4,60	1,0	0,42	2,16	25,0
ТМ-4000/10	4000	$\pm 2 \times 2,5$	10	6,3	6,5	33,5	6,40	0,9	0,21	1,61	36,0
ТМ-6300/10	6300	$\pm 2 \times 2,5$	10	3,15 – 10,5	6,5	46,5	9,00	0,8	0,12	1,03	50,4
ТРДНС-25000/10	25000	$\pm 8 \times 1,5$	10,5	6,3	9,5	115,0	25,0	0,5	0,02	0,42	125,0
ТМЗ-250/10	250	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4	4,5	3,7	0,74	2,3	5,92	17,00	5,75
ТМЗ-400/10	400	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4	5,5	5,5	1,08	4,5	3,44	13,31	18,0
ТМЗ-630/10	630	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4	6,5	7,6	1,68	3,2	1,92	10,14	20,2
ТМЗ-1000/10	1000	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	5,5	11,0	2,45	1,4	1,10	5,39	14,0
ТМЗ-1600/10	1600	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	5,5	16,5	3,30	1,3	0,65	3,38	20,8
ТМЗ-2500/10	2500	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	5,3	24,0	4,60	1,0	0,38	2,17	25,0
ТНЗ-630/10	630	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4	5,5	7,6	1,68	3,2	1,92	8,52	20,2
ТНЗ-1000/10	1000	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	5,5	11,0	2,45	1,4	1,10	5,39	14,0
ТНЗ-1600/10	1600	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	5,5	16,5	3,30	1,3	0,65	3,38	20,8
ТНЗ-2500/10	2500	$\pm 2 \times 2,5$	10	0,4; 0,69	5,5	24,0	4,60	1,0	0,38	2,17	25,0

Таблица 1.3

## Трехфазные масляные, герметичные двухобмоточные трансформаторы напряжением 10 кВ

Тип	$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	Пределы регулиру- вания, %	Каталожные данные						Расчетные данные		
			$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ		$U_{\text{к}}$ , %	$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{х}}$ , %	$R_{\text{т}}$ , Ом	$X_{\text{т}}$ , Ом	$Q_{\text{х}}$ , квар
			ВН	НН							
ТМГ-25/10	25	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,23; 0,4	4,5	0,63	0,13	3,2	100,8	149,1	0,8
ТМГ-40/10	40	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,23; 0,4	4,5	0,90	0,16	3,0	56,25	97,4	1,2
ТМГ-63/10	63	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,23; 0,4	4,5	1,30	0,21	2,0	32,8	63,5	1,3
ТМГ-100/10	100	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,23; 0,4	4,5	1,97	0,29	2,0	12,7	43,2	2,0
ТМГ-160/10	160	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4; 0,69	4,5	2,65	0,44	1,8	10,4	26,2	2,9
ТМВГ-250/10	250	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4; 0,69	4,7	3,70	0,525	1,1	5,92	17,8	2,8
ТМГ-400/10	400	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4	4,5	5,50	0,83	1,1	3,44	10,7	4,4
ТМГ-630/10	630	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4	5,5	7,60	1,05	1,8	1,92	8,52	11,3
ТМГ-1000/10	1000	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4	5,5	10,8	1,55	1,2	1,08	5,39	12,0

Таблица 1.4

## Трехфазные сухие двухобмоточные трансформаторы напряжением 10 кВ

Тип	$S_{\text{ном}}$ , кВ·А	Пределы регулиру- вания, %	Каталожные данные						Расчетные данные		
			$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ		$U_{\text{к}}$ , %	$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{х}}$ , %	$R_{\text{т}}$ , Ом	$X_{\text{т}}$ , Ом	$Q_{\text{х}}$ , квар
			ВН	НН							
ТСЗ-160/10	160	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,23; 0,4; 0,69	5,5	2,70	0,70	4,0	10,55	32,72	6,4
ТСЗ-250/10	250	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,23; 0,4; 0,69	5,5	3,80	1,00	3,5	6,08	21,14	8,75
ТСЗА-400/10	400	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,23; 0,4; 0,69	5,5	5,40	1,30	1,8	3,38	13,33	7,2
ТСЗА-630/10	630	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4; 0,69	5,5	7,30	2,00	1,5	1,84	8,53	9,45
ТСЗА-1000/10	1000	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4	8,0	12,0	2,50	1,1	1,20	7,91	11,0
ТСЗУ-1000/10	1000	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4; 0,69	5,5	10,4	2,45	1,0	1,04	5,40	10,0
ТСЗУ-1600/10	1600	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4; 0,69	5,5	16,0	3,40	0,7	0,63	3,38	11,2
ТСЗЛ-630/10	630	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4; 0,69	5,5	7,10	1,65	1,4	1,79	8,55	8,82
ТСЗЛ-1000/10	1000	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4; 0,69	5,5	10,2	2,00	1,0	1,02	5,41	10,0
ТСЗЛ-1600/10	1600	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4; 0,69	5,5	15,0	2,80	0,7	0,59	3,39	11,2
ТСЗЛ-2500/10	2500	$\pm 2 \times 2,5$	6; 10	0,4; 0,69	6,0	20,5	4,60	0,65	0,33	2,38	16,25

Таблица 1.5

## Трёхфазные двухобмоточные трансформаторы 35 кВ

Тип	$S_{\text{ном}}$ , МВ·А	Пределы регулиру- вания, %	Каталожные данные						Расчётные данные		
			$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ		$U_{\text{к}}$ , %	$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{х}}$ , %	$R_{\text{т}}$ , Ом	$X_{\text{т}}$ , Ом	$Q_{\text{х}}$ , квар
			ВН	НН							
ТМ-100/35	0,1	$\pm 2 \times 1,5\%$	35	0,4	6,5	1,9	0,5	2,6	241	796	2,6
ТМ-160/35	0,16	$\pm 2 \times 1,5\%$	35	0,4; 0,69	6,5	2,6; 3,1	0,7	2,4	127; 148	498	3,8
ТМ-250/35	0,25	$\pm 2 \times 1,5\%$	35	0,4; 0,69	6,5	3,7; 4,2	1,0	2,3	72; 82	318	5,7
ТМН(ТМ)-400/35	0,4	$\pm 6 \times 1,5\%$	35	0,4; 0,69	6,5	7,6; 8,5	1,9	2,0	23,5; 26,2	126	12,6
ТМН(ТМ)-630/35	0,63	$\pm 6 \times 1,5\%$	35	0,4; 0,69	6,5	11,6; 12,2	2,7	1,5	14,9; 14,2	79,6	15
ТМН(ТМ)-1000/35	1	$\pm 6 \times 1,5\%$	35	0,4; 0,69; 6,3; 11	6,5	16,5; 18	3,6	1,4	7,9; 8,6	49,8	22,4
ТМН(ТМ)-1600/35	1,6	$\pm 6 \times 1,5\%$	35	0,4; 0,69; 6,3; 11	6,5	23,5; 26	5,1	1,1	11,2; 12,4	49,2	17,6
ТМН(ТМ)-2500/35	2,5	$\pm 6 \times 1,5\%$	35	6,3; 11	6,5	23,5; 26	5,1	1,1	4,6; 5,1	31,9	27,5
ТМН(ТМ)-4000/35	4	$\pm 6 \times 1,5\%$	35	6,3; 11	7,5	33,5	6,7	1,0	2,6	23	40
ТМН(ТМ)-6300/35	6,3	$\pm 6 \times 1,5\%$	35	6,3; 11	7,5	46,5	9,2	0,9	1,4	14,6	56,7
ТД-10000/35	10	$\pm 2 \times 1,5\%$	38,5	6,3; 11	7,5	65	14,5	0,8	0,96	11,1	80
ТМН-10000/35	10	$\pm 9 \times 1,5\%$	36,75	6,3; 10,5	7,5	65	14,5	0,8	0,88	10,1	80
ТДНС-10000/35	10	$\pm 8 \times 1,5\%$	36,75	6,3; 10,5	8,0	60	12,5	0,6	0,81	10,8	60
ТД-16000/35	16	$\pm 2 \times 1,5\%$	38,5	6,3; 10,5	8,0	90	21	0,6	0,52	7,4	9,6
ТДНС-16000/35	16	$\pm 8 \times 1,5\%$	36,75	6,3; 10,5	10	85	18	0,55	0,45	8,4	88
ТДНС-25000/35	25	$\pm 8 \times 1,5\%$	36,75	6,3-6,3; 10,5-10,5	9,5	115	25	0,5	0,25	5,1	125
ТДНС-32000/35	32	$\pm 8 \times 1,5\%$	36,75	6,3-6,3; 10,5-10,5	11,5	145	30	0,45	0,79	4,8	144
ТДНС-40000/35	40	$\pm 8 \times 1,5\%$	36,75	6,3-6,3; 10,5-10,5	11,5	170	36	0,4	0,14	3,9	160
ТДНС-63000/35	63	$\pm 8 \times 1,5\%$	36,75	6,3-6,3; 10,5-10,5	11,5	250	50	0,3	0,1	2,5	220

Таблица 1.6

## Трехфазные трехобмоточные трансформаторы 35 кВ

Тип	$S_{\text{ном}}$ , МВ·А	Пределы регулиру- вания	Каталожные данные								
			$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ			$U_{\text{к}}$ , %			$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{х}}$ , %
			ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н			
ТМТН-6300/35	6,3	$\pm 8 \times 1,5\%$	35	10,5(11); 13,8	6,3(6,6)	7,5	7,5	16,5	55	12	0,85
ТМТН-10000/35	10	$\pm 8 \times 1,5\%$	36,75	10,5(11); 13,8(15,75)	6,3(6,6)	16,5/8	8/16,5	7,2/7,2	75	18	0,85
ТМТН-16000/35	16	$\pm 8 \times 1,5\%$	36,75	10,5(11); 13,8(15,75)	6,3(6,6)	17/8	8/17	7,5/7,5	115	0,65	0,65

Продолжение табл. 1.6

Тип	Расчетные данные						
	$R_{\text{т}}$ , Ом			$X_{\text{т}}$ , Ом			$\Delta Q_{\text{х}}$ , квар
	ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
ТМТН-6300/35	0,94	0,94	0,94	0	17,8	17,8	53,5
ТМТН-10000/35	0,51	0,51	0,51	11,7/11,7	10,6/0	0/10,6	85
ТМТН-16000/35	0,3	0,3	0,3	7,5/7,5	7/0	0/7	104

Таблица 1.7

## Трёхфазные двухобмоточные трансформаторы 110 кВ

Тип	$S_{\text{ном}}$ , МВ·А	Пределы ре- гулирования	Каталожные данные						Расчётные данные		
			$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ		$U_{\text{к}}$ , %	$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{х}}$ , %	$R_{\text{т}}$ , Ом	$X_{\text{т}}$ , Ом	$Q_{\text{х}}$ , квар
			ВН	НН							
ТМН-2500/110	2,5	+10×1,5% -8×1,5%	110	6,6; 11	10,5	22	5,5	1,5	42,6	508,2	37,5
ТМН-6300/110	6,3	±9×1,78%	115	6,6; 11	10,5	44	11,5	0,8	14,7	220,4	50,4
ТДН-10000/110	10	±9×1,78%	115	6,6; 11	10,5	60	14	0,7	7,95	139	70
ТДН-16000/110	16	±9×1,78%	115	6,6; 11	10,5	85	19	0,7	4,38	86,7	112
ТДНЖ-25000/110	25	±9×1,78%	115	27,5	10,5	120	30	0,7	2,5	55,5	175
ТРДН-25000/110 (ТРДНФ-25000/110)	25	±9×1,78%	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	120	27	0,7	2,54	55,9	175
ТД-40000/110	40	±2×2,5%	121	3,15; 6,3; 10,5	10,5	160	50	0,65	1,46	38,4	260
ТРДН-40000/110	40	±9×1,78%	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	172	36	0,65	1,4	34,7	260
ТРДНС-40000/110	40	±9×1,78%	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	175	42	0,7	1,44	52,8	280
ТРДЦН-63000/110	63	±9×1,78%	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	260	59	0,6	0,87	22	410
ТРДЦНК-63000/110	63	±9×1,78%	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	245	59	0,6	0,8	22	378
ТДЦ-80000/110	80	±2×2,5%	121	6,3; 10,5; 13,8	10,5	310	70	0,6	0,71	19,2	480
ТРДЦН-80000/110 (ТРДЦНК-80000/110)	80	±9×1,78%	115	6,3/6,3; 6,3/10,5; 10,5/10,5	10,5	310	70	0,6	0,6	17,4	480
ТДЦ-125000/110	125	±2×2,5%	121	10,5; 13,8	10,5	400	120	0,55	0,37	12,3	687,5
ТРДЦН-125000/110	125	±9×1,78%	115	10,5/10,5	10,5	400	100	0,55	0,4	11,1	687,5
ТДЦ-200000/110	200	±2×2,5%	121	13,8; 15,75; 18	10,5	550	170	0,5	0,2	7,7	1000
ТДЦ-250000/110	250	±2×2,5%	121	15,75	10,5	640	200	0,5	0,15	6,1	1250
ТДЦ-400000/110	400	±2×2,5%	121	20	10,5	900	320	0,45			

- Примечания: 1. Регулирование напряжения осуществляется за счёт РПН в нейтрали, за исключением трансформаторов типа ТМН-2500/110 с РПН на стороне НН и ТД с ПБЗ на стороне ВН;
2. Трансформаторы типа ТРДН могут изготавливаться также с неращеплённой обмоткой НН 38,5 кВ, трансформатор 25 МВ·А – с 27,5 кВ (для электрификации железных дорог).

Таблица 1.8

## Трёхфазные трёхобмоточные трансформаторы 110 кВ

Тип	$S_{\text{ном}},$ МВ·А	Каталожные данные								
		$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ			$U_{\text{к}},$ %			$\Delta P_{\text{к}},$ кВт	$\Delta P_{\text{х}},$ кВт	$I_{\text{х}},$ %
		ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н			
ТМТН-6300/110	6,3	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	58	14	1,2
ТДТН-10000/110	10	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	76	17	1,1
ТДТН-16000/110*	16	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6	100	23	1,0
ТДТН-25000/110	25	115	11; 38,5	6,6; 11	10,5	17,5	6,5	140	31	0,7
ТДТНЖ-25000/110	25	115	38,5; 27,5	6,6; 11; 27,5	10,5(17)	17(10,5)	6	140	42	0,9
ТДТН-40000/110*	40	115	11; 22; 38,5	6,6; 11	10,5(17)	17(10,5)	6	200	43	0,6
ТДТНЖ-40000/110	40	115	27,5; 35,5	6,6; 11; 27,5	10,5(17)	17(10,5)	6	220	63	0,8
ТДТН-63000/110* (ТДЦТН)	63	115	38,5	6,6; 11	10,5	17	6,5	290	56	0,7
ТДТН-80000/110* (ТДЦТН, ТДЦТНК)	80	115	38,5	6,6; 11	11(17)	18,5(10,5)	7(6,5)	390	82	0,6

Продолжение таблицы 1.8

Тип	Расчётные данные						
	$R_{\text{г}},$ Ом			$X_{\text{г}},$ Ом			$Q_{\text{х}},$ квар
	ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
ТМТН-6300/110	9,7	9,7	9,7	225,7	0	131,2	75,6
ТДТН-10000/110	5	5	5	142,2	0	82,7	110
ТДТН-16000/110*	2,6	2,6	2,6	88,9	0	52	160
ТДТН-25000/110	1,5	1,5	1,5	56,9	0	35,7	175
ТДТНЖ-25000/110	1,5	1,5	1,5	57	0(33)	33(0)	225
ТДТН-40000/110*	0,8	0,8	0,8	35,5	0(22,3)	22,3(0)	240
ТДТНЖ-40000/110	0,9	0,9	0,9	35,5	0(20,7)	20,7(0)	320
ТДТН-63000/110* (ТДЦТН)	0,5	0,5	0,5	22	0	13,6	441
ТДТН-80000/110* (ТДЦТН, ТДЦТНК)	0,4	0,4	0,4	18,6(21,7)	0(10,7)	11,9(0)	480

\* при  $X_T$ , обмотки СН, равно 0, обмотки НН изготавливаются с  $U_{ном}$ , равным 6,3 или 10,5 кВ.

Примечание: Все трансформаторы имеют РПН  $\pm 9 \times 1,78\%$  в нейтрали ВН, за исключением ТДТНЖ-40000 с РПН  $\pm 8 \times 1,5\%$  на ВН.

Трансформаторы ТДТН-10000, 16000, 25000, 40000, 63000/110 имеют также ПБВ на стороне 34,5 и 38,5 кВ  $\pm(2 \times 2,5\%)$ .

Таблица 1.9

### Трёхфазные двухобмоточные трансформаторы 220 кВ

Тип	$S_{ном}$ , МВ·А	Пределы ре- гулирования	Каталожные данные					Расчётные данные			
			$U_{ном}$ обмоток, кВ		$U_{кз}$ , %	$\Delta P_{к}$ , кВт	$\Delta P_{х}$ , кВт	$I_{х}$ , %	$R_T$ , Ом	$X_T$ , Ом	$Q_x$ , квар
			ВН	НН							
ТРДН-32000/220	32	РПН в нейтрали ВН $\pm 12 \times 1\%$	230	6,3-6,3; 6,6-6,6	11,5	150	45	0,65	7,7	190,5	208
ТРДНС-40000/220	40		230	11-11; 11-6,3	11,5	170	50	0,9	5,6	152,4	360
ТРД(ДЦ)Н-63000/220 (ТРДН)	63		230	11-11; 11-6,3	11,5	300	82	0,8	3,9	96,7	504
ТРДНС-63000/220	63		230	6,3-6,3	11,5	300	82	0,8	3,9	96,7	504
ТДЦ-80000/220	80	$\pm 2 \times 2,5\%$	242	6,3; 10,5; 13,8	11	320	105	0,6	2,9	80,5	480
ТРДЦН-100000/220	100	$\pm 12 \times 1\%$	230	11-11	12	360	115	0,7	1,9	63,5	700
ТДЦ-125000/220	125	$\pm 2 \times 2,5\%$	242	10,5; 13,8; 15,75	11	380	135	0,5	1,4	51,5	625
ТРДЦН-160000/220	160	$\pm 12 \times 1\%$	230	11-11	12	525	167	0,6	1,08	39,7	960
ТДЦ(Ц)-200000/220	200	$\pm 2 \times 2,5\%$	242	13,8; 15,75; 18	11	580	200	0,45	0,77	32,2	900
ТДЦ(Ц)-250000/220	250	Без регулирова- ния	242	13,8; 15,75	11	650	240	0,45	0,6	25,7	1125
ТДЦ(Ц)-400000/220	400		242	15,75; 20	11	880	330	0,4	0,29	16,1	1600
ТЦ-630000/220	630		242	15,75; 20; 24	12,5	1300	380	0,35	0,2	11,6	2205
ТЦ-1000000/220	1000		242	24	11,5	2200	480	0,35	0,2	6,7	3500

Примечания: 1. Регулирование напряжения осуществляется за счёт РПН в нейтрали ВН либо ПБВ на стороне ВН.

2. Трансформаторы с расщеплённой обмоткой могут изготавливаться также с нерасщеплённой обмоткой НН на 38,5 кВ.

Таблица 1.10

## Трёхфазные трёхобмоточные трансформаторы и автотрансформаторы 220 кВ

Тип	$S_{ном}$ , МВ·А	Регули- рование напря- жения	Каталожные данные								
			$U_{ном}$ обмоток, кВ			$U_k$ , %			$\Delta P_k$ , кВт		
			ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н	В-С	В-Н	С-Н
ТДТН-25000/220	25	$\pm 12 \times 1\%$	230	38,5	6,6; 11	12,5	20	6,5	135	-	-
ТДТНЖ-25000/220	25	$\pm 8 \times 1,5\%$	230	27,5; 38,5	6,6; 11; 27,5	12,5	20	6,5	135	-	-
ТДТН-40000/220	40	$\pm 8 \times 1,5\%$	230	38,5	6,6; 11	12,5	22	9,5	220	-	-
ТДТНЖ-40000/220	40	$\pm 8 \times 1,5\%$	230	27,5; 38,5	6,6; 11; 27,5	12,5	22	9,5	240	-	-
АТДЦТН-63000/220/110	63	$\pm 6 \times 2\%$	230	121	6,6; 11; 27,5; 38,5	11	35,7	21,9	215	-	-
АТДЦТН-63000/220/110/0,4*	63	$\pm 8 \times 1,5\%$	230	121	0,4	11	14	14	180	-	-
АТДЦТН-125000/220 /110 (в знаменателе выпуск после 1985г.)	125	$\pm 6 \times 2\%$	230	121	6,6; 11; 38,5	11/11	31/45	19/28	290/305	-	-
АТДЦТН-125000/220/110/0,4*	125	$\pm 6 \times 2\%$	230	121	0,4	11	14	14	305	-	-
АТДЦТН-200000/220/110	200	$\pm 6 \times 2\%$	230	121	6,6; 11; 38,5	11	32	20	430	-	-
АТДЦТН-250000/220/110	250	$\pm 6 \times 2\%$	230	121	11; 38,5	11	33,4	20,8	520	-	-

Продолжение таблицы 1.10

Тип	$\Delta P_x$ , кВт	$I_x$ , %	Расчётные данные						$Q_x$ , квар
			$R_T$ , Ом			$X_T$ , Ом			
			ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
ТДТН-25000/220	50	1,2	5,7	5,7	5,7	275	0	148	300
ТДТНЖ-25000/220	50	1,2	5,7	5,7	5,7	275	0	148	300
ТДТН-40000/220	55	1,1	3,6	3,6	3,6	165	0	125	440
ТДТНЖ-40000/220	66	1,1	3,9	3,9	3,9	165	0	125	440
АТДЦТН-63000/220/110	45	0,5	1,4	1,4	2,8	104	0	195,6	315
АТДЦТН-63000/220/110/0,4	33	0,4	1,2	1,2	120	104	0		
АТДЦТН-125000/220/110 (в знаменателе выпуск после 1985г.)	85/65	0,5	0,5/0,52	0,5/0,52	1/3,2	48,6/49	0	82,5/131	625
АТДЦТН-125000/220/110/0,4	54	0,25	0,52	0,52	52	49	0		
АТДЦТН-200000/220/110	125	0,5	0,3	0,3	0,6	30,4	0	54,2	1000
АТДЦТН-250000/220/110	145	0,5	0,2	0,2	0,4	25,5	0	45,1	1250

Примечание: Регулирование напряжения осуществляется за счет РПН в нейтрали ВН ( $\pm 12 \times 1\%$ ,  $\pm 8 \times 1,5\%$ ) или на стороне СН ( $\pm 6 \times 2\%$ ).  
 Мощность обмотки НН АТ равна 50 % от номинальной.

Таблица 1.11

**Трёхфазные двухобмоточные трансформаторы 330 кВ**

Тип	$S_{\text{ном}}$ , МВ·А	Пределы ре- гулирования	Каталожные данные					Расчётные данные			
			$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ		$U_{\text{к}}$ , %	$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{х}}$ , %	$R_{\text{т}}$ , Ом	$X_{\text{т}}$ , Ом	$Q_{\text{х}}$ , квар
			ВН	НН							
ТРДНС-40000/330	40	$\pm 8 \times 1,5\%$	330	6,3-6,3; 6,3-10,5; 10,5-10,5	11	180	80	1,4	12,3	299	560
ТРДЦН-63000/330	63	$\pm 8 \times 1,5\%$	330	6,3-6,3; 6,3-10,5; 10,5-10,5	11	265	120	0,7	7,3	190	441
ТДЦ-125000/330	125	-	347	10,5; 13,8	11	360	145	0,5	2,78	106	625
ТДЦ-200000/330	200	-	347	13,8; 15,75; 18	11	560	220	0,45	1,68	66,2	900
ТДЦ-250000/330	250	-	347	13,8; 15,75	11	605	240	0,45	1,2	52,9	1125
ТЦС-400000/330, ТДЦ-400000/330	400	-	347	15,75; 20	11	810	365	0,4	0,6	33	1600
ТЦ-630000/330	630	-	347	15,75; 20; 24	11	1300	405	0,35	0,4	21	2205
ТЦ-1000000/330	1000	-	347	24	11,5	2200	480	0,4	0,26	13,2	4000
ТЦ-1250000/330	1250	-	347	24	14	2300	750	0,75	0,2	10,6	5375

Таблица 1.12

## Трёхфазные и однофазные автотрансформаторы 330 кВ

Тип	$S_{\text{ном}}$ , МВ·А	Каталожные данные								
		$U_{\text{ном}}$ обмоток, кВ			$U_{\text{к}}$ , %			$\Delta P_{\text{к}}$ , кВт		
		ВН	СН	НН	В-С	В-Н	С-Н	В-С	В-Н	С-Н
АТДЦТН-125000/330110	125	330	115	6,3;10,5;15,75;38,5	10	35	24	370	-	-
АТДЦТН-200000/330/110	200	330	115	6,3; 10,5; 38,5	10	34	22,5	600	-	-
АТДЦТН-250000/330/110	250	330	158	10,5; 38,5	10,5	54	42	660	490	400
АТДЦТН-240000/330/220	240	330	242	11; 38,5	7,3/9,6	70/74	60	430/560	260	250
АОДЦТН-133000/330/220	133	$330/\sqrt{3}$	$230/\sqrt{3}$	10,5; 38,5	9	60,4	48,5	280	125	105

Продолжение таблицы 1.12

Тип	$\Delta P_{\text{х}}$ , кВт	$I_{\text{х}}$ , %	Расчётные данные							$Q_{\text{х}}$ , квар
			$R_{\text{т}}$ , Ом			$X_{\text{т}}$ , Ом				
			ВН	СН	НН	ВН	СН	НН		
АТДЦТН-125000/330110	115	0,5	1,3	1,3	2,6	91,5	0	213,4	625	
АТДЦТН-200000/330/110	180	0,5	0,8	0,8	2,0	58,5	0	126,6	1000	
АТДЦТН-250000/330/110	165	0,5	1,07	0,08	4,3	49,0	0	186,2	1250	
АТДЦТН-240000/330/220	130	0,5	0,4/0,53	0,4/0,53	7,3/7,2	39,2/59,2	0	278,4/312,1	1200	
АОДЦТН-133000/330/220	55	0,15	0,62	0	3,5	28,7	0	136,5	599	

Примечания:

1. Регулирование напряжения осуществляется на стороне СН за счет РПН  $\pm 6 \times 2\%$ , за исключением АТ мощностью 240 МВ·А, не имеющего регулирования.
2. Для АТ мощность обмотки НН составляет 50 % номинальной, за исключением АТ мощностью 200 и 250, 240 и 133 МВ·А, для которых она составляет 40 и 25 % соответственно.

## 2. ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

### 2.1. Общие сведения

Линия электропередачи – электроустановка, предназначенная для передачи электрической энергии на расстояние с возможным промежуточным отбором. Линии выполняют воздушными, кабельными и др.

Воздушные линии (ВЛ) выполняются преимущественно неизолированными (голыми) проводами. Провода классифицируют по материалу, из которого они изготовлены, сечению, виду изоляции или ее отсутствию, механической прочности и др.

На ВЛ напряжением до 35 кВ применяют *алюминиевые* провода марок А и АКП. ВЛ 6-35 кВ могут также выполняться сталеалюминиевыми проводами, а выше 35 кВ линии монтируются исключительно *сталеалюминиевыми* проводами. В марке сталеалюминиевых проводов указывается сечение алюминиевой и стальной части, например, АС 70/11, а также данные об антикоррозийной защите, например АСКС – такие же провода, как и АС, но с наполнителем сердечника антикоррозийной смазкой. Обозначения марок проводов для ВЛ приведены ниже.

Провод, скрученный из алюминиевых проволок .....	А
Провод марки А, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной нагревостойкости .....	АКП
Провод, состоящий из стального сердечника и алюминиевых проволок	АС
Провод марки АС, но стальной сердечник изолирован двумя лентами полиэтилентерефталатной пленки; сердечник под лентами покрыт нейтральной смазкой повышенной нагревостойкости .....	АСК
Провод марки АС, но межпроволочное пространство стального сердечника, включая его наружную поверхность, заполнено нейтральной смазкой повышенной нагревостойкости .....	АСКС
Провод марки АС, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной нагревостойкости .....	АСКП
Провод, скрученный из проволок нетермообработанного алюминиевого сплава (марка проволоки АСТ) .....	АН
Провод марки АН, но межпроволочное пространство всего провода, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной нагревостойкости .....	АНКП
Провод, скрученный из проволок термообработанного алюминиевого сплава (марка проволоки АСЗ) .....	АЖ
Провод марки АЖ, но межпроволочное пространство всего провода,	

за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной АЖКП смазкой повышенной нагревостойкости .....

Рекомендуемая область применения проводов различных марок приведена в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Рекомендуемая область применения проводов различных марок**

Область применения	Марка провода	Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Отношение сечений алюминиевой части провода к сечению стального сердечника
Районы с толщиной стенки гололеда до 20 мм	АС	До 185	6-6,25
	АЖ	240 и более	7,71-8,04
Районы с толщиной стенки гололеда более 20 мм	АС	120-185	-
		До 95	6
		120-400	4,29-4,39
500 и более	7,71-8,04		
На побережье морей, соленых озер, в районах засоленных песков, в промышленных районах, где сталеалюминиевые провода разрушаются от коррозии	АСК, АСКС, АСКП	120-300	6,11-6,25
Сети сельскохозяйственного назначения напряжением до 110 кВ	А	50-240	-
	АЖ	50-185	-

Наиболее широко применяются сталеалюминиевые провода. Проводимость стального сердечника не учитывается, а за электрическое сопротивление принимается только сопротивление алюминиевой части. Выпускаются сталеалюминиевые провода марок АС, АСКС, АСКП, АСК. Провод марки АС состоит из стального сердечника и алюминиевых проволок. АСКС, АСКП, АСК – это провода марки АС коррозионностойкие, отличающиеся специальной обработкой сердечника и межпроводочного пространства.

В обозначение марки провода вводится номинальное сечение алюминиевой части провода и сечение стального сердечника, например АС-120/19 или АСКС-150/24.

В последние годы в мировой практике в распределительных электрических сетях все большее применение находят *самонесущие изолированные* провода (СИП) для ВЛ напряжением 0,38 кВ и *защитные (покрытые)* провода для ВЛ напряжением 6-10 кВ, которые обеспечивают более высокую надежность и безопасность сетей.

Конструкция изолированных самонесущих проводов представляет собой пучок из 3-х изолированных жил (дополнительно возможен изолированный провод наружного освещения), навитых вокруг несущего троса таким образом, чтобы механическая нагрузка смонтированного провода воспринималась только несущим тросом. Жилы выполнены из одной или нескольких скрученных алюминиевых проволок круглого сечения. В качестве изоляции применяется традиционный светостабилизированный полиэтилен высокой плотности или сшитый полиэтилен черного цвета, который обладает более высокой нагревостойкостью. Несущий трос круглого сечения скручен из 7-ми проволок, изготовленных из алюминиевого сплава, и используется как нулевой провод.

В нормативных документах определены названия ВЛ-0,38 кВ с изолированными проводами как – *воздушная линия с изолированными проводами* (ВЛИ), а ВЛ-0,38 кВ с неизолированными проводами – *ВЛН*.

В электрических сетях стран СНГ наиболее распространены самонесущие изолированные провода российских производителей марок САПт, САСПт, САПс, СИП-1 и СИП-1А, СИП-2 и СИП-2А, СИП-4 и СИП-4А, западноевропейских – марки «АМКА» (Финляндия), «Торсада» (Франция).

В электрических сетях напряжением 6-10 кВ применяют защищенные провода, которые подвешивают на изоляторах. Провод покрыт изолирующей оболочкой. Такую линию именуют *защищенной воздушной линией* (ВЛЗ либо ВЛП). Защищенные провода марки СИП-3 российского производства (фирма «Заря», Санкт-Петербург) имеют многопроволочную токопроводящую жилу из алюминиевого сплава высокой прочности или сталеалюминиевую, уплотненную с изоляцией из сшитого атмосферостойкого полиэтилена. Западноевропейский аналог ВЛЗ 10 кВ – провода марка «SAX» производства Финляндии.

Провода ВЛЗ 6-10 кВ крепятся на опорах с помощью траверс, штыревых либо подвесных или полимерных стержневых изоляторов и специальной линейной арматуры. Изоляционная защита провода создает возможность значительного уменьшения расстояния между фазами (до 250 мм) и сузить трассу.

В определенных условиях (в лесных массивах или при прохождении трассы в тяжелых природных условиях, при совместной подвеске с линиями напряжением 0,38 кВ с самонесущими изолирован-

ными проводами в населенных пунктах) целесообразно применять ВЛИ 10 кВ – воздушный кабель 10 кВ.

Ввиду уменьшения расстояний между проводами фаз ВЛИ 6-10 кВ величина индуктивного сопротивления снижается примерно в три раза по сравнению с неизолированными проводами ВЛ, а следовательно улучшается режим по напряжению, увеличивается пропускная способность линий и снижаются потери электроэнергии. Пример конструктивного исполнения ВЛИ 10 кВ с изолированными проводами – кабель «САХКА» производства Финляндии:

- представляет собой кабель с пластмассовой изоляцией, состоящий из трех одножильных кабелей, скрученных вокруг стального подвесного троса;
- жила – уплотненная круглая алюминиевая, сечение 35 – 185 мм<sup>2</sup>;
- изоляция – сшитый полиэтилен;
- оболочка – атмосферостойкая, противостоящая трению пластмасса;
- подвесной трос – многопроволочный оцинкованный стальной трос.

## **2.2. Технические характеристики воздушных ЛЭП**

Расчетные данные сталеалюминиевых, алюминиевых и проводов из алюминиевых сплавов приведены в табл. 2.2 – 2.3.

Расчетные значения электрических параметров ВЛ напряжением 0,38 – 6 – 10 – 35 – 110 – 220 – 330 – 750 кВ для наиболее часто применяемых марок алюминиевых и сталеалюминиевых проводов приведены в табл. 2.4 – 2.5. При расчете были приняты среднегеометрические расстояния, указанные в примечании к табл. 2.5. Изменение индуктивного сопротивления и емкостной проводимости ВЛ в зависимости от среднегеометрического расстояния между фазами характеризуется данными табл. 2.6 – 2.7.

В табл. 2.8 – 2.9 приведены расчетные характеристики проводов и фаз ВЛ, связанные с анализом коронного разряда. Допустимые длительные нагрузки на неизолированные провода характеризуются данными табл. 2.10 – 2.12.

Технические характеристики ВЛИ 0,38 кВ с проводами СИП-1 и СИП-1А, СИП-2 и СИП-2А, СИП-4 и СИП-4А помещены в табл. 2.13. Технические данные европейской проводниковой продукции СИП 0,38 кВ, а также линейной арматуры приведены в [3]. В качестве

примера электрических характеристик в табл. 2.14 приведены электрические параметры изолированных проводов марки «АМКА».

Технические характеристики ВЛЗ 10 кВ с проводами СИП-3 помещены в табл. 2.13. Электрические параметры ВЛИ 10 – 20 кВ марки «САХКА» приведены в табл. 2.15.

Таблица 2.2

**Расчетные данные сталеалюминиевых проводов марок АС, АСК  
(ГОСТ 839-80)**

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> (алюминий/ сталь)	Алюминиевая часть провода		Расчетные данные провода				
	Число проволок	Диаметр проволоки, мм	Диаметр провода, мм	Сечение, мм <sup>2</sup>		Отношение сечения алюминия к стальной части	Сопротивление пост. току при 20 °С, Ом/км
				Алюминия	Стали		
35/6,2	6	2,8	8,4	36,9	6,15	6	0,777
50/8		3,2	9,6	48,2	8,04		0,595
70/11		3,8	11,4	68	11,3		0,422
95/16		4,5	13,5	95,4	15,9		0,301
120/19*	26	2,4	15,2	118	18,8	6,25	0,244
150/24*	26	2,7	17,1	148	24,2	6,14	0,204
185/29*	26	2,98	18,8	181	29	6,24	0,159
185/43	30	2,8	19,6	185	43,1	4,29	0,156
240/32	24	3,6	21,6	244	31,7	7,71	0,118
240/39*	26	3,4	21,6	236	38,6	6,11	0,122
240/56	30	3,2	22,4	241	56,3	4,29	0,120
300/39	24	4	24,0	301	38,6	7,31	0,096
300/48*	26	3,8	24,1	295	47,8	6,16	0,098
300/66	30	3,5	25,5	288,5	65,8	4,39	0,100
300/67	30	3,5	24,5	288,5	67,3	4,29	0,100
300/30	48	2,98	24,8	335	29,1	11,55	0,086
330/43	54	2,8	25,2	332	43,1	7,71	0,087
400/18	42	3,4	26,0	381	18,8	20,27	0,076
400/51	54	3,05	27,5	394	51,1	7,71	0,073
400/64	26	4,37	27,7	390	63,5	6,14	0,074
400/93	30	4,15	29,1	406	93,2	4,35	0,071
500/26	42	3,9	30,0	502	26,6	18,86	0,058
500/64	54	3,4	30,6	490	63,5	7,71	0,058
600/72	84	3,7	33,2	580	72,2	8,04	0,050
1000/86	76	4,1	42,4	1003,2	56,3	17,96	0,029

\* Провод марки АСК изготавливается для указанных сечений

Таблица 2.3

**Расчетные данные алюминиевых проводов марки А и проводов из  
алюминиевого сплава марок АН, АЖ (ГОСТ 839-80)**

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup> (алюминий/сталь)	Число проволок, шт.	Номинальный диаметр проволок, мм	Расчетные данные провода			
			Сечение, мм <sup>2</sup>	Диаметр провода, мм	Сопротивление постоянному току при 20 °С, Ом/км	Удельная масса провода, кг/км (без смазки)
<b>А:</b> 50	7	3	49,5	9,0	0,558	135
70	7	3,55	69,3	10,7	0,42	189
95	7	4,1	92,4	12,3	0,315	252
120	19	2,8	117,0	14,0	0,251	321
150	19	3,15	148,0	15,8	0,197	406
185	19	3,5	182,8	17,5	0,161	502
240	19	4	238,7	20,0	0,123	655
300	37	3,15	288,3	22,1	0,102	794
400	37	3,66	389,2	25,6	0,075	1072
500	37	4,15	500,4	29,1	0,050	1378
600	61	3,5	586,8	31,5	0,050	1618
700	61	3,8	691,7	34,2	0,043	1902
800	61	4,1	805,2	36,9	0,036	2020
<b>АН:</b> 50	7	3	49,5	9,0	0,624	135
120	19	2,8	117,0	14,0	0,266	321
150	19	3,15	148,0	15,8	0,211	406
185	19	3,5	182,3	17,5	0,171	502
<b>АЖ:</b> 50	7	3	49,5	9,0	0,676	135
120	19	2,8	117,0	14,0	0,288	321
150	19	3,15	148,0	15,8	0,229	406
185	19	3,5	182,3	17,5	0,185	502

Таблица 2.4

**Расчётные значения параметров воздушных линий напряжением 0,38 – 110 кВ с алюминиевыми и сталеалюминиевыми проводами**

Номинальное сечение А (АС), мм <sup>2</sup>	Длительно допустимый ток $I_{доп}$ , А	$r_0$ , Ом/км при 20°С	0,38 кВ	6 кВ	10 кВ	35 кВ	110 кВ	
			$x_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$b_0 \times 10^{-6}$ , См/км
16 (16/2,7)	105 (105)	1,108 (1,782)	–	–	–	–	–	–
25 (25/4,2)	135 (145)	1,150 (1,152)	0,319	0,319 (0,392)	0,402 (0,401)	–	–	–
35 (35/6,2)	170 (175)	0,835 (0,777)	0,308	0,380 (0,376)	0,391 (0,378)	–	–	–
50 (50/8)	215 (210)	0,578 (0,595)	0,297	0,369 (0,368)	0,380 (0,378)	–	–	–
70 (70/11)	265 (265)	0,413 (0,422)	0,283	0,355 (0,357)	0,366 (0,367)	0,420 (0,432)	(0,444)	(2,547)
95 (95/16)	320 (330)	0,311 (0,301)	0,274	0,346 (0,347)	0,357 (0,356)	0,411 (0,421)	(0,434)	(2,611)
120 (120/19)	375 (390)	0,246 (0,244)	–	0,338	0,349	0,403 (0,414)	(0,427)	(2,658)
150 (150/24)	440 (450)	0,194 (0,204)	–	–	–	0,398 (0,406)	(0,420)	(2,707)
(185/29)		(0,159)	–	–	–	–	(0,413)	(2,747)
(240/32)		(0,118)	–	–	–	–	(0,405)	(2,808)



Таблица 2.6

## Индуктивные сопротивления воздушных линий со сталеалюминиевыми проводами

Среднегеометрическое расстояние между проводниками, м	Индуктивное сопротивление, Ом/км									
	АС-35	АС-50	АС-70	АС-95	АС-120	АС-150	АС-185	АС-240	АС-300	АС-400
2,0	0,403	0,392	0,382	0,371	0,365	0,358	-	-	-	-
2,5	0,417	0,406	0,396	0,385	0,379	0,372	-	-	-	-
3,0	0,429	0,418	0,408	0,397	0,391	0,384	0,377	0,369	-	-
3,5	0,438	0,427	0,417	0,406	0,4	0,398	0,386	0,378	-	-
4,0	0,446	0,435	0,425	0,414	0,408	0,401	0,394	0,386	-	-
4,5	-	-	0,433	0,422	0,416	0,409	0,402	0,394	-	-
5,0	-	-	0,44	0,429	0,423	0,416	0,409	0,401	-	-
5,5	-	-	-	-	0,43	0,422	0,415	0,407	-	-
6,0	-	-	-	-	-	-	-	0,413	0,404	0,396
6,5	-	-	-	-	-	-	-	-	0,409	0,4
7,0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,414	0,406
7,5	-	-	-	-	-	-	-	-	0,418	0,409
8,0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,422	0,414
8,5	-	-	-	-	-	-	-	-	0,425	0,418

Таблица 2.7

**Емкостная проводимость воздушных линий со сталеалюминиевыми  
проводами**

Среднегеометрическое расстояние между проводами, м	Емкостная проводимость, См/км·10 <sup>-6</sup>							
	АС-70	АС-95	АС-120	АС-150	АС-185	АС-240	АС-300	АС-400
3,0	2,79	2,87	2,92	2,97	3,03	3,1	-	-
3,5	2,73	2,81	2,85	2,9	2,96	3,02	-	-
4,0	2,68	2,75	2,79	2,85	2,9	2,96	-	-
4,5	2,62	2,69	2,74	2,79	2,84	2,89	-	-
5,0	2,58	2,65	2,69	2,74	2,82	2,85	-	-
5,5	-	-	2,67	2,70	2,74	2,8	-	-
6,0	-	-	-	-	-	2,76	2,81	2,83
6,5	-	-	-	-	-	-	2,78	2,84
7,0	-	-	-	-	-	-	2,74	2,78
7,5	-	-	-	-	-	-	2,71	2,76
8,0	-	-	-	-	-	-	2,69	2,73
8,5	-	-	-	-	-	-	2,67	2,70

Таблица 2.8

**Минимальный диаметр проводов по условиям короны и радиопомех, мм**

Напряжение ВЛ, кВ	Фаза с проводом	
	одиночным	два и более
110	11,4 (АС-70/11)	-
150	15,2 (АС-120/19)	-
220	21,6 (АС-240/32)	-
	24,0 (АС-300/39)	
300	33,2 (АС-600/72)	2×21,6 (3×АС-240/32)
		3×15,2 (3×АС-120/19)
		3×17,1 (3×АС-150/24)
500	-	2×36,2 (2×АС-700/86)
		3×24,0 (3×АС-300/39)
		4×18,8 (4×АС-185/29)
750	-	4×29,1 (4×АС-400/93)
		5×21,6 (5×АС-240/32)

*Примечания:* 1. Для ВЛ-220 кВ минимальный диаметр провода 21,6 мм относится к горизонтальному расположению фаз, а в остальных случаях допустим с проверкой по радиопомехам.

2. Для ВЛ-330 кВ минимальный диаметр провода 15,2 мм (три провода в фазе) относится к одноцепным опорам.

Таблица 2.9

**Удельные потери мощности на корону на линиях с типовыми  
конструкциями фаз**

Напря- жение ВЛ, кВ	Марка и число проводов в фазе	Потери мощности на корону, кВт/км, при погодных условиях				Среднегодо- вые потери, кВт/км
		хорошая погода	сухой снег	дождь	изморозь	
750	4×АС-600/72	4,6	17,5	65,0	130,0	15,0
	5×АС-240/56	3,9	15,5	55,0	115,0	13,0
330	2×АС-300/39	1,0	4,5	15,0	44,0	3,8
	2×АС-400/51	0,8	3,3	11,0	33,5	2,9
220	АС-300/43	0,25	0,95	2,75	10,5	0,84
110	АС-120/19	0,02	0,1	0,3	1,0	0,08

Таблица 2.10

**Допустимые длительные токи и мощности для неизолированных проводов  
марок АС, АСК (допустимая температура нагрева +70 °С при температуре  
воздуха +25 °С)**

Сечение (алюминий/ сталь), мм <sup>2</sup>	Ток, А		Мощность, МВт, вне помещений при напряжении, кВ			
	вне помещений	внутри помеще- ний	35	110	220	330
35/6,2	175	135	10	-	-	-
50/8	210	165	12	-	-	-
70/11	265	210	15,2	47,6	-	-
95/16	330	260	18,9	59,3	-	-
120/19	390	313	21,8	68,7	-	-
150/24	450	365	25,7	80,9	-	-
185/29	510	425	29,5	92,6	-	-
240/39	610	505	-	109,2	218	328
300/48	690	585	-	-	249	374
400/18	830	713	-	-	301	452
400/51	825	705	-	-	301	452
500/26	960	830	-	-	342	513
500/64	945	815	-	-	342	513

*Примечание:* Допустимая длительная мощность рассчитана при  $U = 1,05 \cdot U_{\text{ном}}$ .

Таблица 2.11

**Поправочные коэффициенты на температуру воздуха для неизолированных проводов**

Расчетная температура воздуха, °С	Нормированная температура провода, °С	Поправочные коэффициенты при фактической температуре воздуха, °С											
		-5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
25	70	1,29	1,24	1,2	1,15	1,11	1,05	1,0	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67

Таблица 2.12

**Допустимый длительный ток для неизолированных проводов**

Номинальное сечение, мм <sup>2</sup>	Сечение (алюминий/сталь), мм <sup>2</sup>	Ток, А, для проводов марок					
		АС, АСКС, АСК, АСКП		М	А и АКП	М	А и АКП
		вне помещений	внутри помещений	вне помещений		внутри помещений	
10	10/1,8	84	53	95	-	60	-
16	16/2,7	111	79	133	105	102	75
25	25/4,2	142	109	183	136	137	106
35	35/6,2	175	135	223	170	173	130
50	50/8	210	165	275	215	219	165
70	7/11	265	210	337	265	268	210
95	95/16	330	260	422	320	341	255
120	120/19	390	313	485	375	395	300
	120/27	375	-				
150	150/19	450	365	570	440	465	355
	150/24	450	365				
	150/34	450	-				
185	185/24	520	430	650	500	540	410
	185/29	510	425				
	185/43	515	-				
240	240/32	605	505	760	590	685	490
	240/39	610	505				
	240/56	610	-				
300	300/39	710	600	880	680	740	570
	300/48	690	585				
	300/66	680	-				
330	330/27	730	-	-	-	-	-
400	400/22	830	713	1050	815	895	690
	400/51	825	705				
	400/64	860	-				
500	500/27	960	830	-	980	-	820
	500/64	945	815				
600	600/72	1050	920	-	1100	-	955
700	700/86	1180	1040	-	-	-	-

Примечание. Длительные токовые нагрузки одинаковы для проводов марок АС, АСКС, АСК и АСКП.

Таблица 2.13

Технические характеристики СИП

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Диаметр, мм	Длительно допустимый ток, А	Ток термической стойкости при односекундном КЗ, кА	Удельное активное сопротивление, r <sub>0</sub> , Ом/км	
				фазной жилы	нулевой жилы
<i>СИП-1</i>					
1×16+1×25	15	75	1,0	1,910	1,380
3×16+1×25	21	70	1,0	1,910	1,380
3×25+1×35	26	95	1,6	1,200	0,986
3×35+1×50	30	115	2,3	0,868	0,720
3×50+1×50	32	140	3,2	0,641	0,720
3×50+1×70	35	140	3,2	0,641	0,493
3×70+1×70	38	180	4,5	0,443	0,493
3×70+1×95	41	180	4,5	0,443	0,363
3×95+1×70	43	220	5,2	0,320	0,493
3×95+1×95	44	220	5,2	0,320	0,363
3×120+1×95	47	250	5,9	0,253	0,363
4×16+1×25	22	70	1,0	1,910	1,380
4×25+1×35	26	95	1,6	1,200	0,986
<i>СИП-1А</i>					
2×16	15	75	1,0	1,910	-
3×16	17	70	1,0	1,910	-
4×16	18	70	1,0	1,910	-
2×25	18	100	1,6	1,200	-
3×25	20	95	1,6	1,200	-
4×25	22	95	1,6	1,200	-
5×16	20	70	1,0	1,910	-
5×25	24	95	1,6	1,200	-
1×16+1×25	16	75	1,0	1,910	1,380
3×16+1×25	21	70	1,0	1,910	1,380
3×25+1×35	26	95	1,6	1,200	0,986
3×35+1×50	30	115	2,3	0,868	0,720
3×50+1×50	33	140	3,2	0,641	0,720
3×50+1×70	35	140	3,2	0,641	0,493
3×70+1×70	38	180	4,5	0,443	0,493
3×70+1×95	41	180	4,5	0,443	0,363
3×95+1×70	43	220	5,2	0,320	0,493
3×95+1×95	44	220	5,2	0,320	0,363
3×120+1×95	47	250	5,9	0,253	0,363
4×16+1×25	22	70	1,0	1,910	1,380
4×25+1×35	26	95	1,6	1,200	0,986

Продолжение табл. 2.13

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Диаметр, мм	Длительно допустимый ток, А	Ток термической стойкости при односекундном КЗ, кА	Удельное активное сопротивление, r <sub>0</sub> , Ом/км	
				фазной жилы	нулевой жилы
<i>СИП-2</i>					
1×16+1×25	15	105	1,5	1,910	1,380
3×16+1×25	21	100	1,5	1,910	1,380
3×25+1×35	26	130	2,3	1,200	0,986
3×35+1×50	30	160	3,2	0,868	0,720
3×50+1×50	33	195	4,6	0,641	0,720
3×50+1×70	35	195	4,6	0,641	0,493
3×70+1×70	38	240	6,5	0,443	0,493
3×70+1×95	41	240	6,5	0,443	0,363
3×95+1×70	43	300	6,9	0,320	0,493
3×95+1×95	44	300	6,9	0,320	0,363
3×120+1×95	47	340	7,2	0,253	0,363
4×16+1×25	22	100	1,5	1,910	1,380
4×25+1×35	26	130	2,3	1,200	0,986
<i>СИП-2А</i>					
2×16	15	105	1,5	1,910	-
3×16	18	135	2,3	1,910	-
4×16	17	100	1,5	1,910	-
2×25	20	130	2,3	1,200	-
3×25	18	100	1,5	1,200	-
4×25	22	130	2,3	1,200	-
5×16	20	100	1,5	1,910	-
5×25	24	130	2,3	1,200	-
1×16+1×25	16	105	1,5	1,910	1,380
3×16+1×25	21	100	1,5	1,910	1,380
3×25+1×35	26	130	2,3	1,200	0,986
3×35+1×50	30	160	3,2	0,868	0,720
3×50+1×70	35	195	4,6	0,641	0,493
3×70+1×70	38	240	6,5	0,443	0,493
3×70+1×95	41	240	6,5	0,443	0,363
3×95+1×70	43	300	6,9	0,320	0,493
3×95+1×95	44	300	6,9	0,320	0,363
3×120+1×95	47	340	7,2	0,253	0,363
4×16+1×25	22	100	1,5	1,910	1,380
4×25+1×35	26	130	2,3	1,200	0,986

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Диаметр, мм	Длительно допустимый ток, А	Ток термической стойкости при односекундном КЗ, кА	Удельное активное сопротивление, r <sub>0</sub> , Ом/км	
				фазной жилы	нулевой жилы
<i>СИП-4, СИПн-4</i>					
2×25	19	95	1,6	1,200	1,200
2×35	20	115	2,3	0,868	0,868
2×50	23	140	3,2	0,641	0,641
2×70	27	180	4,5	0,443	0,443
2×95	31	220	6,0	0,320	0,320
2×120	34	250	7,6	0,253	0,253
3×25	20	95	1,6	1,200	1,200
3×35	22	115	2,3	0,868	0,868
3×50	25	140	3,2	0,641	0,641
3×70	29	180	4,5	0,443	0,443
3×95	33	220	6,0	0,320	0,320
3×120	36	250	7,6	0,253	0,253
4×25	23	95	1,6	1,200	1,200
4×35	24	115	2,3	0,868	0,868
4×50	29	140	3,2	0,641	0,641
4×70	32	180	4,5	0,443	0,443
4×95	39	220	6,0	0,320	0,320
4×120	41	250	7,6	0,253	0,253
<i>СИПс-4</i>					
2×25	19	130	2,3	1,200	1,200
2×35	20	160	3,2	0,868	0,868
2×50	23	195	4,6	0,641	0,641
2×70	27	240	6,5	0,443	0,443
2×95	31	290	7,0	0,320	0,320
2×120	34	340	7,6	0,253	0,253
3×25	20	130	2,3	1,200	1,200
3×35	22	160	3,2	0,868	0,868
3×50	25	195	4,6	0,641	0,641
3×70	29	240	6,5	0,443	0,443
3×95	33	290	7,0	0,320	0,320
3×120	36	340	7,6	0,253	0,253
4×25	23	130	2,3	1,200	1,200
4×35	24	160	3,2	0,868	0,868
4×50	29	195	4,6	0,641	0,641
4×70	32	240	6,5	0,443	0,443
4×95	39	290	7,0	0,320	0,320
4×120	41	340	7,6	0,253	0,253
<i>СИП-3</i>					
35	11,5	200	3,2	0,986	-
50	12,6	245	4,3	0,720	-
70	14,6	310	6,4	0,493	-
95	16,0	370	8,6	0,363	-
120	17,4	430	11,0	0,288	-
150	18,8	485	13,5	0,263	-

Таблица 2.14

## Электрические параметры изолированных проводов «АМКА»

Марка про- вода	Токопроводящие жилы				Нулевая жила			Ток установившего- ся режима при t = 25 °С, А	Ток термической стойкости (односе- кундный) при t = 70 °С, кА	Общее реактивное сопротивление СИП, Ом/км
	Сопротивление постоянному току		Реактивное сопротивле- ние прямой последова- тельности, Ом/км	Реактивное сопротивление нулевой по- следователь- ности, Ом/км	Сопротивление по- стоянному току		Реактивное сопротивление нулевой по- следователь- ности, Ом/км			
	+20 °С, Ом/км	+70 °С, Ом/км			+20 °С, Ом/км	+70 °С, Ом/км				
1×16+25	1,910	2,300	0,090	-	1,380	1,620	0,074	75	1,03	0,095
3×16+25	1,910	2,300	0,108	0,055	1,620	1,620	0,074	70	1,03	0,099
4×16+25	1,210	2,300	0,108	0,030	0,380	0,974	0,074	70	1,03	0,074
3×25+35	1,200	1,440	0,106	0,045	0,986	1,160	0,073	90	1,60	0,091
4×25+35	1,200	1,440	0,106	0,025	0,966	0,973	0,074	90	1,60	0,073
3×35+50	0,868	1,040	0,104	0,045	0,720	0,846	0,073	115	2,25	0,091
3×50+70	0,641	0,770	0,101	0,045	0,493	0,579	0,071	140	3,22	0,091
3×70+95	0,443	0,532	0,097	0,045	0,363	0,427	0,070	180	4,50	0,092
3×120+95	0,253	0,304	0,092	0,030	0,363	0,427	0,078	250	5,90	0,088

Таблица 2.15

## Электрические характеристики проводов «SAXKA»

Марка провода	Сечение провода, мм <sup>2</sup>	Сопротивление постоянному току при +20 °С, Ом/км	Сопротивление переменному току при +90 °С, Ом/км	Максимальное сопротивление при +20 °С, Ом/км	Реактивное сопротивление, Ом/км	Рабочая емкость, мкФ/км	Зарядный ток, А	Ток замыкания на землю, А	Допускаемый ток нагрева, А	Максимально допустимый ток КЗ (в 1с), кА
SAXKA 12 кВ (10 кВ – $U_{ном}$ )	3×35			0,868	0,14	0,21			115	3,4
	3×70			0,443	0,13	0,26			175	6,7
	3×120			0,253	0,12	0,32			250	11,4
	3×185			0,164	0,11	0,37			320	17,5
SAXKA 24 кВ (20 кВ – $U_{ном}$ )	3×35			0,868	0,16	0,15			120	3,4
	3×70	0,443	0,571	0,443	0,14	0,18	0,7	2,0	180	6,7
	3×120	0,253	0,328	0,253	0,13	0,22	0,8	2,5	250	11,4
	3×185	0,164	0,215	0,164	0,12	0,25	0,9	2,8	325	17,5
SAXKA 36 кВ (30 кВ – $U_{ном}$ )	3×35			0,868	0,18	0,12			120	3,4
	3×70			0,443	0,16	0,15			180	6,7
	3×120			0,253	0,15	0,18			250	11,4
	3×185			0,164	0,14	0,20			325	17,5

### 3. КАБЕЛЬНЫЕ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Кабельная линия (КЛ) – линия для передачи электроэнергии, состоящая из одного или нескольких параллельных кабелей, выполненная каким-либо способом прокладки. Кабель – готовое заводское изделие, состоящее из одной, трех или четырех одно- или многопроволочных медных или алюминиевых жил, изолированных друг от друга и окружающей среды, герметизированных свинцовыми, алюминиевыми или пластмассовыми оболочками и защищенных, как правило, броней из стальных лент или оцинкованной проволоки. Изоляцию кабелей изготавливают из бумажных лент, пропитанных маслоканифольным составом, резины и пластмассы.

Маркировка силовых кабелей обычно включает буквы, обозначающие материал, из которого изготовлены жилы, изоляция, оболочка, и тип защитного покрова. Маркировка кабелей высокого напряжения отражает также особенности их конструкции. Основные буквенные обозначения типов кабелей приведены ниже.

#### Обозначения марок кабелей

##### Маслонаполненные

Прокладываемые в трубопроводе .....	Т
Шланг из поливинилхлоридного пластика .....	Шв
То же с усиленным защитным слоем .....	Шву
Покров асфальтированный .....	А
То же бронированный круглыми проволоками .....	К
Оболочка свинцовая .....	С
То же алюминиевая, алюминиевая гофрированная .....	А, Аг
Давление масла низкое .....	Н
То же высокое .....	ВД
Маслонаполненный с медной жилой .....	М

##### С бумажной изоляцией и вязкой пропиткой

Усовершенствованный .....	У
Без наружного покрова .....	Г
Тип покрова .....	Б, Бл, Б2л, Бн, Пн, К, Шв, Швс
Оболочка свинцовая .....	С
То же алюминиевая .....	А
Изолированные жилы совместно .....	–
То же отдельно .....	О
Жила медная .....	–
То же алюминиевая .....	А
Изоляция обыкновенная .....	–
То же пропитанная с нестекающим составом .....	Ц
Маслонаполненный с медной жилой .....	М

### С пластмассовой изоляцией

Шланг из поливинилхлоридного пластика .....	Шв
Без наружного покрова .....	Г
Бронированный .....	Бб
Оболочка из полиэтилена, самозатухающего и вулканизованного полиэтилена, поливинилхлоридного пластика, алюминия .....	Пн, Пс, Пв, В, А
Жила медная .....	—
То же алюминиевая .....	А

После буквенных обозначений марки кабеля указывается число и сечение токоведущих жил. Например:

АБ-3×70 – кабель с бумажной изоляцией в алюминиевой оболочке с тремя медными жилами сечением по 70 мм<sup>2</sup>, бронированной стальными лентами с защитным покровом;

ВПГ-1-3×35+1×25 – кабель с тремя медными жилами сечением по 35 мм<sup>2</sup> и четвертой жилой сечением 25 мм<sup>2</sup>, полиэтиленовой (П) изоляцией на 1 кВ, оболочкой из полихлорвинила (В), небронированный;

АВБбШв-1-4×95 – кабель с четырьмя алюминиевыми жилами сечением по 95 мм<sup>2</sup>, изоляцией из ПВХ пластика на 1 кВ, бронированный двумя оцинкованными стальными лентами, защитным шлангом из ПВХ пластика.

В настоящее время применяют, как правило, *кабели с алюминиевыми жилами* в алюминиевой оболочке. Применение кабелей с *медными жилами* требует специального обоснования. Для КЛ, прокладываемых в земле и воде, применяют бронированные кабели. Применение кабелей в свинцовой оболочке предусматривается для прокладки подводных линий, в шахтах, опасных по газу и пыли, в особо опасных коррозионных средах. В остальных случаях при невозможности использовать *кабели в алюминиевых или пластмассовых оболочках* их замена на *кабели в свинцовых оболочках* требует специального обоснования.

В последние годы в электрических сетях энергосистем и системах электроснабжения промышленных предприятий получают широкое распространение *кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена* (русскоязычное обозначение СПЭ, английское – XLPE). Кабели с СПЭ-изоляцией имеют срок службы не менее 30 лет, отвечают современным экологическим требованиям, экономичны при ремонтах и обслуживании, рассчитаны на длительную работу при температуре жи-

лы 90°С (а их бумажно-масляные аналоги допускают нагрев до 70°С), обладают большей пропускной способностью, чем кабели с бумажной и маслонаполненной изоляцией.

Конструкция кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена включает круглую медную или алюминиевую (многопроволочную или цельнотянутую) жилу, полупроводящий слой по жиле, изоляцию из сшитого полиэтилена, полупроводящий слой по изоляции, экран из медных проволок и медную ленту, разделительный слой, полиэтиленовую оболочку. Обозначения марок СПЭ-кабелей – ПвП (ПвПу), АпВп (АпВПу), ПвВ (ПвВнг) и др.

Основные типы силовых кабелей напряжением 6-10 кВ и выше приведены в табл. 3.1, стандартные сечения кабелей – в табл. 3.2 – 3.3.

Расчетные электрические параметры, нагрузочные характеристики кабелей напряжением 6 – 110 кВ различных конструкций приведены в табл. 3.4 – 3.19.

Таблица 3.1

**Основные типы кабелей**

Изоляция	Исполнение
Резиновая и пластмассовая	Трехжильные с пластмассовой изоляцией, облегченные для электрификации сельского хозяйства 10 кВ Трехжильные и одножильные 6 – 35 кВ Одножильные 110 – 220 кВ
Бумажная	С вязкой пропиткой: с поясной изоляцией трехжильные 6 – 10 кВ; трехжильные с отдельно освинцованными жилами 20 – 35 кВ. Маслонаполненные: одножильные с центральным маслопроводящим каналом низкого и высокого давления 110 – 220 кВ; трехжильные высокого давления в стальной трубе с маслом под давлением 110 – 220 кВ.

Таблица 3.2

## Стандартные сечения кабелей напряжением 6, 10 кВ

Обозначение марок	Число жил	Номинальное напряжение кабелей, кВ	
		Номинальное сечение жил, мм <sup>2</sup>	
		6	10
ААГ, ААШв, ААШп, ААБл, ААБ2лШв, ААБ2лШп, ААБлГ, ААБ2л, АСГ, СГ, АСШв, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБн, СБн, АСБлн, Сблн, АСБГ, СБГ, АСБ2л, СБ2л, АСБ2лШв, СБ2лШв, АСБ2лГ, СБ2лГ	3	10-240	16-240
СШв, СБШв	3	10-240	16-240
ААПл, ААП2л, ААПлГ, ААП2лГ, ААП2лШв, АСП, СП, АСПл, СПл, АСП2л, СП2л, АСПлн, АСПГ, СПГ, АСКл, СКл, АСП2лГ, СП2лГ	3	16-240	16-240
СПШв	3	16-240	16-240
АОАБ, ОАБ, АОАБ2л, ОАБ2л, АОАБ2лГ, ОАБ2лГ, АОСБ, ОСБ, АОСБл, ОСБл, АОСБн, ОСБи, АОСБГ, ОСБГ, АОАШвБ, ОАШвБ	3	-	-
АОСК, ОСК	3	-	-
ААШв-В, ААП2лШв-В, ААБл-В, ААБ2л-В, СБ-В, АСБл-В, СБл-В, АСБн-В, СБн-В, ААГ-В, АСБлн-В, СБлн-В, АСБГ-В, СБГ-В, АСБ2л-В, СБ2л-В, ААШп-В	3	16-120	-
ААБв, ААБвГ	3	10-240	16-240
ААШв-В, ААБлГ-В, АСБГ-В, СБГ-В	3	-	-
ААПл-В, ВВПлГ-В, АСП-В, СП-В, АСПл-В, АСПлн-В, АСП2л-В, СП2л-В	3	16-120	-
АСПГ-В, СПГ-В, АСП2л-В, СП2лГ-В	3	-	-

Таблица 3.3

## Стандартные сечения кабелей на напряжения до 1 кВ

Обозначение марок	Сечение жил, мм <sup>2</sup>
ААГ, ААШп, ААШв, ААБлГ, ААП2лШв, ААБл, ААБ2л, АСГ, СГ, АСБ, СБ, АСБл, СБл, АСБн, АСБлн, СБлн, АСБГ, СБГ, АСБ2л, СБ2л, АСШв, СШв, СБШв	10-185
ААПл, ААП2л, ААПлГ, АСП, СП, АСПл, СПл, АСПлн, СПлн, АСПГ, СПГ, АСП2л, СПШв, АСКл	16-185
АСКл, СКл	25-185
ААШв-В, ААП2лШв-В, АСБ-В, СБ-В, АСБл-В, АСБн-В, СБн-В, АСБлн-В, АСБ2л-В, СБ2л-В	10-120
ААБлГ-В	16-120
АСБГ-В, СБГ-В	10-185
ААПл-В, ААПлГ-В, СП-В, АСП-В, АСПл-В, СПн-В, АСПлн-В, СПлн-В, АСПГ-В, СПГ-В, АСП2л-В	16-120



Таблица 3.5

## Расчетные характеристики маслонаполненных кабелей с пластмассовой изоляцией напряжением 110 – 220 кВ

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Активное сопротивление на 1 км длины при 20°С, Ом		Индуктивное сопротивление и зарядная мощность 1 км кабеля напряжением, кВ							
			маслонаполненного				с пластмассовой изоляцией			
			110		220		110		220	
	$X_0$ , Ом	$q_0$ , квар	$X_0$ , Ом	$q_0$ , квар	$X_0$ , Ом	$q_0$ , квар	$X_0$ , Ом	$q_0$ , квар		
150	0,122	-	0,200	1180	0,160	3600	-	-	-	-
185	0,099	-	0,195	1210	0,155	3650	-	-	-	-
240	0,077	-	0,190	1250	0,152	3780	-	-	-	-
270	0,068	0,092	0,185	1270	0,147	3850	0,120	450	0,120	1100
300	0,061	-	0,180	1300	0,145	3930	-	-	-	-
350	0,051	0,086	0,175	1330	0,140	4070	0,116	755	0,116	1900
400	0,046	-	0,170	1360	0,135	4200	-	-	-	-
425	0,042	-	0,165	1370	0,132	4260	-	-	-	-
500	0,037	0,060	0,160	1420	0,128	4450	0,110	830	0,110	2100
550	0,032	-	0,155	1450	0,124	4600	-	-	-	-
625	0,029	0,048	0,150	1500	0,120	4770	0,100	1040	0,100	2600
700	0,026	-	0,145	1550	0,116	4920	-	-	-	-
800	0,022	0,040	0,140	1600	0,112	5030	-	1250	-	3700

Примечание. Маслонаполненные кабели изготавливаются с медными жилами, кабели с пластмассовой изоляцией – с алюминиевыми жилами.

Таблица 3.6

**Допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке, прокладываемых в земле**

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Ток, А, для кабелей					
	одножильных до 1 кВ	двухжильных до 1 кВ	трехжильных напряжением, кВ			четырёхжильных до 1 кВ
			до 3	6	10	
6	-	60	55	-	-	-
10	110	80	75	60	-	65
16	135	110	90	80	75	90
25	180	140	125	105	90	115
35	220	175	145	125	115	135
50	275	210	180	155	140	165
70	340	250	220	190	165	200
95	400	290	260	225	205	240
120	460	335	300	260	240	270
150	520	385	335	300	275	305
185	580	-	380	340	310	345
240	675	-	440	390	355	-
300	770	-	-	-	-	-
400	940	-	-	-	-	-
500	1080	-	-	-	-	-
625	1170	-	-	-	-	-
800	1310	-	-	-	-	-

Таблица 3.7

**Допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией в свинцовой оболочке, прокладываемых в воде**

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Ток, А, для кабелей			
	трехжильных напряжением, кВ			четырёхжильных до 1 кВ
	до 3	6	10	
16	-	105	90	-
25	160	130	115	150
35	190	160	140	175
50	235	195	170	220
70	290	240	210	270
95	340	290	260	315
120	390	330	305	360
150	435	385	345	-
185	475	420	390	-
240	550	480	450	-

Таблица 3.8

**Допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами с бумажной изоляцией в свинцовой или алюминиевой оболочке, прокладываемых в воздухе**

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Ток, А, для кабелей					
	одножильных до 1 кВ	двухжильных до 1 кВ	трехжильных напряжением, кВ			четырёхжильных до 1 кВ
			до 3	6	10	
6	-	42	35	-	-	-
10	75	55	46	42	-	45
16	90	75	60	50	46	60
25	125	100	80	70	65	75
35	155	115	95	85	80	95
50	190	140	120	110	105	110
70	235	175	155	135	130	140
95	275	210	190	165	155	165
120	320	245	220	190	185	200
150	360	290	255	225	210	230
185	405	-	290	250	235	260
240	470	-	330	290	270	-
300	555	-	-	-	-	-
400	675	-	-	-	-	-
500	785	-	-	-	-	-
625	910	-	-	-	-	-
800	1080	-	-	-	-	-

Таблица 3.9

**Допустимый длительный ток для кабелей с алюминиевыми жилами, резиновой или пластмассовой изоляцией, в свинцовой, полихлорвиниловой или резиновой оболочках при прокладке их в воздухе**

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Ток, А, для кабелей		
	одножильных	двухжильных	трехжильных
2,5	23	21/34	19/29
4	31	29/42	27/38
6	38	38/55	32/46
10	60	55/80	42/70
16	75	70/105	60/90
25	105	90/135	75/115
35	130	105/160	90/140
50	165	135/205	110/175
70	210	165/245	140/210
95	250	200/295	170/225
120	295	230/340	200/295
150	340	270/390	235/335
185	395	310/440	270/385
240	465	-/-	-/-

Таблица 3.10

Допустимый длительный ток для кабелей с медными жилами с бумажной изоляцией в свинцовой оболочке, прокладываемых в земле

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Ток, А, для кабелей					
	одножильных до 1 кВ	двухжильных до 1 кВ	трехжильных напряжением, кВ			четырёхжильных до 1 кВ
			до 3	6	10	
6	-	80	70	-	-	-
10	140	105	95	80	-	85
16	175	140	120	105	95	115
25	235	185	160	135	120	150
35	285	225	190	160	150	175
50	360	270	235	200	180	215
70	440	325	285	245	215	265
95	520	380	340	295	265	310
120	595	435	390	340	310	350
150	675	500	435	390	155	395
185	755	-	490	440	400	450
240	880	-	570	510	460	-
300	1000	-	-	-	-	-
400	1220	-	-	-	-	-
500	1400	-	-	-	-	-
625	1520	-	-	-	-	-
800	1700	-	-	-	-	-

Таблица 3.11

Допустимый длительный ток для кабелей с медными жилами с бумажной изоляцией в свинцовой оболочке, прокладываемых в воде

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Ток, А, для кабелей			
	трехжильных напряжением, кВ			четырёхжильных до 1 кВ
	до 3	6	10	
16	-	135	120	-
25	210	170	150	195
35	250	205	180	230
50	305	255	220	285
70	375	310	275	350
95	440	375	340	410
120	505	430	395	470
150	565	500	450	-
185	615	545	510	-
240	715	625	585	-

Таблица 3.12

Допустимый длительный ток для кабелей с медными жилами с изоляцией в свинцовой оболочке, прокладываемых в воздухе

Сечение токопроводящей жилы, мм <sup>2</sup>	Ток, А, для кабелей					
	одножильных до 1 кВ	двухжильных до 1 кВ	трехжильных напряжением, кВ			четырёхжильных до 1 кВ
			до 3	6	10	
6	-	55	45	-	-	-
10	95	75	60	55	-	60
16	120	95	80	65	60	80
25	160	130	105	90	85	100
35	200	150	125	110	105	120
50	245	185	155	145	135	145
70	305	225	200	175	165	185
95	360	275	245	215	200	215
120	415	320	285	250	240	260
150	470	375	330	290	270	300
185	525	-	375	325	305	340
240	610	-	430	375	350	-
300	720	-	-	-	-	-
400	880	-	-	-	-	-
500	1020	-	-	-	-	-
625	1180	-	-	-	-	-
800	1400	-	-	-	-	-

Таблица 3.13

**Поправочные коэффициенты на температуру окружающей среды**

Условная температура среды, °С	Нормированная температура жил, °С	Поправочные коэффициенты на токи при расчетной температуре среды, °С											
		-5 и ниже	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45	+50
15	80	1,14	1,11	1,08	1,04	1,00	0,96	0,92	0,88	0,83	0,78	0,73	0,68
25	80	1,24	1,20	1,17	1,13	1,09	1,04	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,74
25	70	1,29	1,24	1,20	1,15	1,11	1,05	1,00	0,94	0,88	0,81	0,74	0,67
15	65	1,18	1,14	1,10	1,05	1,00	0,95	0,89	0,84	0,77	0,71	0,63	0,55
25	65	1,32	1,27	1,22	1,17	1,12	1,06	1,00	0,94	0,87	0,79	0,71	0,61
15	60	1,20	1,15	1,12	1,06	1,00	0,94	0,88	0,82	0,75	0,67	0,57	0,47
25	60	1,36	1,31	1,25	1,20	1,13	1,07	1,00	0,93	0,85	0,76	0,66	0,54
15	55	1,22	1,17	1,12	1,07	1,00	0,93	0,86	0,79	0,71	0,61	0,50	0,36
25	55	1,41	1,35	1,29	1,23	1,15	1,08	1,00	0,91	0,82	0,71	0,58	0,41
15	50	1,25	1,20	1,14	1,07	1,00	0,93	0,84	0,76	0,66	0,54	0,37	-
25	50	1,48	1,41	1,34	1,26	1,18	1,09	1,00	0,89	0,78	0,63	0,45	-

Таблица 3.14

**Поправочные коэффициенты на количество работающих кабелей, лежащих рядом в земле (в трубах или без труб)**

Расстояние между кабелями в свету, мм	Коэффициент снижения длительно допустимого тока при количестве кабелей					
	1	2	3	4	5	6
100	1,00	0,90	0,85	0,80	0,78	0,75
200	1,00	0,92	0,87	0,84	0,83	0,81
300	1,00	0,93	0,90	0,87	0,86	0,85

Таблица 3.15

Удельные емкостные токи замыкания на землю кабелей 6 – 35 кВ с бумажной изоляцией и вязкой пропиткой

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	Кабели с поясной изоляцией		Кабели с отдельно освинцованными жилами
	6 кВ	10 кВ	35 кВ
10	0,33	-	-
16	0,37	0,52	-
25	0,46	0,62	-
35	0,52	0,69	-
50	0,59	0,77	-
70	0,71	0,90	3,70
95	0,82	1,00	4,10
120	0,89	1,10	4,40
150	1,10	1,30	4,80
185	1,20	1,40	5,20
240	1,30	1,60	-
300	1,50	1,80	-
400	1,70	2,00	-
500	2,00	2,30	-

Таблица 3.16

Емкость кабеля с изоляцией из СПЭ, мкФ/км

Сечение жилы, мм <sup>2</sup>	10 кВ	20 кВ	35 кВ	110 кВ
35	0,21	-	-	-
50	0,23	0,17	0,14	-
70	0,26	0,19	0,16	-
95	0,29	0,21	0,18	-
120	0,31	0,23	0,19	-
150	0,34	0,26	0,20	-
185	0,37	0,27	0,22	0,131
240	0,41	0,29	0,24	0,141
300	0,45	0,32	0,26	0,151
400	0,50	0,35	0,29	0,172
500	0,55	0,39	0,32	0,186
630	0,61	0,43	0,35	0,202
800	0,68	0,49	0,40	0,221

Таблица 3.17

## Расчетные параметры СПЭ-кабелей напряжением 10 – 110 кВ

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Сопротивление постоянному току при 20°С, Ом/км		Индуктивное сопротивление, Ом/км, при расположении кабелей						
			10 кВ		20 кВ		35 кВ		110 кВ
	медная жила	алюминиевая жила	горизонтально	треугольником	горизонтально	треугольником	горизонтально	треугольником	треугольником
35	0,524	0,868	0,238	0,158	-	-	-	-	-
50	0,387	0,641	0,184	0,126	0,217	0,141	0,228	0,152	-
70	0,268	0,443	0,177	0,119	0,210	0,133	0,220	0,144	-
95	0,193	0,320	0,170	0,112	0,202	0,125	0,211	0,135	-
120	0,153	0,253	0,166	0,108	0,199	0,123	0,208	0,132	-
150	0,124	0,206	0,164	0,106	0,193	0,116	0,202	0,125	-
185	0,0991	0,164	0,161	0,103	0,188	0,111	0,196	0,120	0,157
240	0,0754	0,125	0,157	0,099	0,183	0,106	0,192	0,115	0,151
300	0,0601	0,100	0,154	0,096	0,179	0,103	0,187	0,111	0,145
400	0,0470	0,0778	0,151	0,093	0,173	0,097	0,181	0,105	0,138
500	0,0366	0,0605	0,148	0,090	0,169	0,093	0,176	0,100	0,135
630	0,0280	0,0464	0,145	0,087	0,165	0,089	0,172	0,096	0,129
800	0,0221	0,0367	0,142	0,083	0,160	0,085	0,167	0,091	0,123

Таблица 3.18

**Нагрузочная способность СПЭ-кабелей напряжением 10 – 110 кВ,  
прокладываемых в воздухе**

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Длительно допустимый ток А (расположение кабелей – треугольником)							
	10 кВ		20 кВ		35 кВ		110 кВ	
	алюм. жила	медн. жила	алюм. жила	медн. жила	алюм. жила	медн. жила	алюм. жила	медн. жила
35	155	195	-	-	-	-	-	-
50	185	245	190	250	190	250	-	-
70	235	300	240	310	240	310	-	-
95	285	370	295	375	295	375	-	-
120	330	425	340	430	340	430	-	-
150	370	475	395	490	395	490	-	-
185	425	545	450	560	450	560	480	600
240	505	645	515	650	515	650	555	690
300	580	740	595	745	595	745	630	775
400	675	845	700	880	700	880	735	895
500	780	955	795	980	795	980	825	995
630	910	1115	900	1130	900	1130	935	1115
800	1050	1270	1025	1285	1025	1285	1060	1245

Таблица 3.19

**Нагрузочная способность СПЭ-кабелей напряжением 10 – 110 кВ,  
прокладываемых в земле**

Площадь сечения, мм <sup>2</sup>	Длительно допустимый ток А (расположение кабелей – треугольником)							
	10 кВ		20 кВ		35 кВ		110 кВ	
	алюм. жила	медн. жила	алюм. жила	медн. жила	алюм. жила	медн. жила	алюм. жила	медн. жила
35	145	185	-	-	-	-	-	-
50	170	220	175	225	175	225	-	-
70	210	270	215	270	215	270	-	-
95	250	320	255	325	255	325	-	-
120	280	360	290	365	290	365	-	-
150	320	410	330	415	330	415	-	-
185	360	460	370	465	370	465	395	500
240	415	530	425	540	425	540	455	575
300	475	600	480	615	480	615	515	650
400	540	680	550	700	550	700	600	755
500	610	750	620	780	620	780	675	840
630	680	830	690	860	690	860	760	935
800	735	920	760	970	760	970	850	1030

## 4. КОМПЕНСИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

Компенсирующими устройствами (КУ) называются установки, предназначенные для компенсации емкостной или индуктивной составляющей переменного тока. В качестве средств компенсации реактивной мощности применяют шунтовые *батареи конденсаторов*, *синхронные компенсаторы*, *статические компенсаторы* реактивной мощности, *шунтирующие реакторы*. Обозначения типов КУ приведены ниже.

### Синхронные компенсаторы

Компенсатор .....	К
Синхронный .....	С
Охлаждение водородное .....	В
Возбуждение бесщеточное .....	Б
нереверсивное (положительное)	
реверсивное (положительное и отрицательное) .....	О
Номинальная мощность, Мвар	
Номинальное напряжение, кВ	

### Статические компенсаторы

Статический .....	С
Тиристорный .....	Т
Компенсатор .....	К
Номинальная потребляемая мощность .....	
при номинальном напряжении, Мвар	
Номинальная генерируемая мощность .....	
при номинальном напряжении, Мвар	
Номинальное напряжение, кВ	

### Конденсаторы

Конденсатор косинусный .....	К
Пропитка синтетическим диэлектриком .....	С
Удвоенная мощность .....	2
Для наружной установки .....	А
нереверсивное (положительное) .....	
реверсивное (положительное и отрицательное) .....	О
Номинальная мощность, Мвар	
Номинальное напряжение, кВ	

### Шунтирующие реакторы

Реактор .....	Р
Токоограничивающий .....	Т
Охлаждение масляное .....	М
естественное или дутьевое .....	Д

Трехфазный или однофазный .....	Т/О
Управляемый .....	У
Класс напряжения, кВ	
Номинальная мощность, кВ·А	

Синхронный компенсатор представляет собой ненагруженный синхронный электродвигатель с широким диапазоном регулирования тока возбуждения. Машина способна работать как в режиме перевозбуждения, потребляя из сети опережающий ток (емкостный квадрант), что соответствует выдаче реактивной мощности, так и в режиме недовозбуждения (индуктивный квадрант), что соответствует потреблению из сети реактивной мощности. Наличие в устройстве реверсивного возбудителя позволяет увеличить диапазон регулирования реактивной мощности и использовать все возможности синхронной машины, заложенные в конструкцию. Некоторые данные о синхронных компенсаторах приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

#### Синхронные компенсаторы

Тип	Мощность, МВ·А		$U_{ном}$ , кВ
	при опережающем токе	при отстающем токе	
КС 2,8-6У3	2,8	1,0	6,3
КС 5-6У3	5,0	1,5	6,3
КС 10-6У3	10	5,5	6,3
КС 10-10У3	10	5,5	10,5
КС 16-6У3	16	9,0	6,3
КС 16-10У3	16	9,0	10,5
КС 25-10У3	25	16	10,5
КСВ 32-10У1	32	17	10,5
КСВБ 50-11У1	50	20	11,0
КСВБО 50-11У1	50	33	11,0
КСВБ 60-11У1	60	30	11,0
КСВБО 60-11У1	60	-	11,0
КСВ 75-11У1	75	-	11,0
КСВБ 100-11У1	100	50,0	11,0
КСВБО 100-11У1	100	82,5	11,0
КСВБ 160-15У1	160	80,0	15,75
КСВБО 160-15У1	160	132	15,75
КСВБ 320-20У1	320	-	20,0
КСВБО 320-20У1	320	-	20,0

Наиболее часто для компенсации реактивной нагрузки потребителей и потерь реактивной мощности в электрических сетях применяются батареи статических конденсаторов. Шунтовые конденсатор-

ные батареи белорусского и российского исполнения комплектуются из конденсаторов типа КСА-0,66-20 и КСА2-0,66-40. Для комплектования установок продольной компенсации, предназначенных для уменьшения индуктивного сопротивления линий электропередачи, используются конденсаторы типа КСП-0,6-40.

Промышленностью выпускаются комплектные конденсаторные установки серии УК-0,38 на напряжение 380 В мощностью 110 ... 900 квар и серии УК-6/10 мощностью 450 ... 10000 квар. Некоторые данные о комплектных конденсаторных установках помещены в табл. 4.2 – 4.3.

Новым современным типом компенсирующих устройств являются СТК – статические тиристорные компенсаторы реактивной мощности с непрерывным регулированием. СТК присоединяются к линии электропередачи через отдельный трансформатор или к обмотке НН автотрансформатора. Установленная мощность СТК может наращиваться путем увеличения отдельных модулей. В табл. 4.4 представлены данные о СТК на номинальные напряжения 10-35 кВ.

Шунтирующие реакторы (РШ) – это индуктивности, предназначенные для компенсации емкостной проводимости линий электропередачи высокого напряжения. Их включают непосредственно по концам ЛЭП сверхвысоких напряжений, подключают также к шинам высокого и среднего напряжения узловых подстанций и к третичным обмоткам автотрансформаторов. Выпускаются промышленностью и эксплуатируются РШ «сухие» (без магнитопровода и масла) типа ВРГ, которые присоединяются к обмотке АТ на подстанции через вакуумные выключатели, и с масляным охлаждением. Применяются как нерегулируемые, так и регулируемые РШ. Изменение проводимости сетевой обмотки и мощности реактора осуществляется дискретно встроенным устройством РПН либо плавно путем подмагничивания магнитопровода с применением непрерывного автоматического регулирования параметров реактора. В табл. 4.5 приведены технические данные шунтирующих реакторов на напряжения 10 – 750 кВ.

Таблица 4.2.

**Комплектные конденсаторные установки напряжением до 1000 В**

Тип установки	Номинальная мощность, квар	Число × мощность регулируемых ступеней, квар
УК-0,38-110Н	110	1×110
УК-0,38-150Н	150	1×150
УК-0,38-220Н	220	2×110
УК-0,38-320Н	320	3×110
УК-0,38-430Н	430	4×110
УК-0,38-540Н	540	5×110
УК-0,38-300НЛ, НП	300	2×150
УК-0,38-450НЛ, НП	450	3×150
УК-0,38-600НЛ, НП	600	4×150
УК-0,38-900НЛ, НП	900	6×150

Таблица 4.3

**Комплектные конденсаторные установки напряжением выше 1000 В**

Тип установки	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность, квар
УК-6-450 ЛУЗ, ПУЗ	6	450
УК-6-675 ЛУЗ, ПУЗ	6	675
УК-6-900 ЛУЗ, ПУЗ	6	900
УК-6-110 ЛУЗ, ПУЗ	6	1125
УК-6-900 Л, П	6	900
УК-6-1350 Л, П	6	1350
УК-6-1800 Л, П	6	1800
КУ-6-2000	6	2000
КУ-6-4100	6	4100
КУ-10-330	10	330
КУ-10-500	10	500
УК-10-450 ЛУЗ, ПУЗ	10	450
УК-10-675 ЛУЗ, ПУЗ	10	675
УК-10-900 ЛУЗ, ПУЗ	10	900
УК-10-110 ЛУЗ, ПУЗ	10	1125
УК-10-900 Л, П	10	900
УК-10-1350 Л, П	10	1350
УК-10-1800 Л, П	10	1800
УК-10-270 ЛУЗ	10	2700
КУ-10-3200	10	3200
КУ-10-6500	10	6500

Таблица 4.4

## Технические данные статических компенсаторов реактивной мощности

Тип установки	Номинальное напряжение, кВ	Номинальная мощность трехфазной группы, Мвар	
		режим потребления	режим выдачи
СТК	11	50	40
СТК	15,75	80	40
СТК	11	100	50
СТК	38,5	160	

Таблица 4.5

## Технические данные шунтирующих реакторов

Тип	Номинальное напряжение, кВ	Мощность, МВ·А
РОМ-1200/6	$6,6/\sqrt{3}$	1,1
РТМ-3300/6	6,6	3,3
РОМ-1200/10	$11/\sqrt{3}$	1,1
РТМ-3300/10	11	3,3
ВРГ-29700/10	11	29,7
РТД-20000/35	38,5	20
РТУ-32000/35	38,5	32
РТУ-25000/110	121	25
РТУ-32000/110	121	32
РТУ-63000/110	121	63
РОДБС-33333/110	$121/\sqrt{3}$	33,3
РТУ-63000/220	242	63
РТУ-100000/220	242	100
РТМ-40000/330	347	40
РТУ-100000/330	347	100
РТУ-180000/330	347	180
РОДЦ-110000/750	$787/\sqrt{3}$	110

## 5. РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Для регулирования напряжения на подстанциях применяют специальные *последовательные регулировочные трансформаторы*. Они прибавляют к напряжению нерегулируемого трансформатора или автотрансформатора (или вычитают из него) некоторое добавочное напряжение. По этой причине распространенным также является другое название этих электрических аппаратов – *вольтдобавочные трансформаторы* (ВДТ).

ВДТ может использоваться как регулировочный трансформаторный агрегат, работающий в блоке с основным трансформатором (автотрансформатором) подстанции для реализации требуемой функции регулирования напряжения, а также в качестве линейного регулятора в электрической сети.

В первом случае наиболее часто ВДТ включают в нейтраль обмотки ВН основного трансформатора ( $U_{ВН} = 220 - 750$  кВ). При этом последовательный трансформатор может рассчитываться на сравнительно умеренное напряжение (35 кВ), однако должен пропускать значительную проходную мощность. Во втором случае ВДТ включается в рассечку электрической линии и вводит в сеть некоторую дополнительную э.д.с., т.е. присоединение осуществляется на полное напряжение сети.

В зависимости от подаваемого на питающую обмотку ВДТ напряжения на его регулировочной обмотке создаются продольная, поперечная либо продольно-поперечная э.д.с. Различные схемы подключения обмоток трансформатора позволяют получить фазовые сдвиги э.д.с.  $0^\circ$  ( $180^\circ$ ),  $30^\circ$  ( $210^\circ$ ),  $60^\circ$  ( $240^\circ$ ), и  $90^\circ$  ( $270^\circ$ ). Регулирование, при котором напряжение сети изменяется только по значению без изменения фазы, называют *продольным*. При фазовом сдвиге добавочной э.д.с.  $90^\circ$  ( $270^\circ$ ) регулируемое напряжение сети изменяет фазу, оставаясь практически неизменным по значению (только *поперечное* регулирование). При фазовых углах  $30^\circ$  ( $210^\circ$ ),  $60^\circ$  ( $240^\circ$ ) одновременно изменяются и модуль и фаза регулируемого напряжения (*продольно-поперечное регулирование*).

### Обозначения типов регулировочных трансформаторов

Последовательный регулировочный трансформатор (трансформаторный агрегат).....	ВР
Линейный регулировочный .....	Л
Трехфазный .....	Т
Охлаждение масляное с дутьем и естественной циркуляцией масла .....	Д

Регулирование под нагрузкой .....	Н
Поперечное регулирование .....	П
Исполнение грозоупорное .....	Г
с усиленным вводом (для новых конструкций) .....	У
Номинальная мощность, кВ·А	
Класс напряжения, кВ	

Ниже в табл. 5.1 и 5.2 представлены технические характеристики и расчетные данные последовательных регулировочных трансформаторов серии ВРТДНУ и линейных регуляторов типа ЛТДН. Более полно информация о выпускаемых промышленностью регулировочных трансформаторах представлена в [5].

Таблица 5.1

## Последовательные регулировочные трансформаторы

$S_{ном},$ МВ·А	Тип регулирующего трансформатора	Тип силового автотрансформатора	Каталожные данные									расчётные данные $Q_x,$
			Номинальное напряжение автотрансформатора, кВ			Номинальное напряжение обмоток, кВ		$U_k,$ %	$\Delta P_k,$ кВт	$\Delta P_x,$ кВт	$I_x,$ %	
			ВН	СН	НН	возбуждающей	регулирующей					
240	ВРТДНУ-240000/35/35	АТДЦТГ-240000/220/110	230	121	11	11	$\pm 24,2$	10,9-0-10,5	154	40	3,8	9120
			230	121	38,5	38,5	$+24,9 \div -26,2$	11,1-0-11,3	178	47	3,8	9120
		АТДЦТГ-240000/330/220 (АТДЦТ)	330	242	11	11	$+31,4 \div -33,1$	10,0-0-10,1	85	30	4,0	9600
			347	242	11	11	$+38,3 \div -40,4$	12,8-0-13,0	132	29	3,8	9120
			347	242	38,5	38,5	$+24,9 \div -26,2$	11,1-0-11,3	178	47	3,8	9120
92	ОДЦТНП-92000/150	АОДЦТН-333000/750/330	$750\sqrt{3}$	$330\sqrt{3}$	15,75	-	-	6,67	185	110	0,7	644

Таблица 5.2

## Линейные регулировочные трансформаторы

Тип	$S_{ном},$ МВ·А	$U_{ном},$ кВ	Каталожные данные						Расчётные данные			
			$\Delta P_k,$ кВт		$\Delta P_x,$ кВт		$I_x,$ %		$X,$ Ом	$Q_x,$ квар		
			Положение переключателя							Положение переключателя		
			1	23	1; 23	11-13	1	11-13		1; 23	11-13	
ЛТМН-16000/10	16	6,6; 11	35	20	9,5	3,5	5,0	2,35	0,04-0,10	800	376	
ЛТДН-40000/10 (ЛТЦН)	40	6,6; 11	70	38	18,5	7,0	3,5	2,5	0,02-0,04	1400	1000	
ЛТДН-63000/35	63	38,5	110	60	25	12	3,1	2,1	0,33	1953	1323	
ЛТДН-100000/35	100	38,5	140	75	40	16	3,5	1,5	0,20	3500	1500	

Примечание: Каталожные и расчётные данные приведены к  $U_{ном}$  и проходной мощности. Положения 1 и 23 соответствуют максимальному и минимальному напряжениям  $\pm 10 \times 1,5\% U_{ном}$ ; 11-13 – нулевые положения переключателя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок – Мн.: УП «ДИЭКОС», 2003. – 632 с.
2. Справочник по проектированию электрических сетей / Под редакцией Д.Л.Файбисовича. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2006. – 320 с.
3. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ и 110 – 1150 кВ. Том 2 / Под редакцией И.Т. Горюнова, А.А. Любимова – М.: Папирус Про, 2003. – 640 с.
4. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ и 110 – 1150 кВ. Том 4 / Под редакцией И.Т.Горюнова, А.А.Любимова – М.: Папирус Про, 2005. – 640 с.
5. Макаров Е.Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ и 110 – 1150 кВ. Том 6 – М.: ИД «Энергия», 2006. – 624 с.
6. Фадеева, Г.А. Проектирование распределительных электрических сетей: учеб. пособие / Г.А.Фадеева, В.Т.Федин; под общ. Ред. В.Т.Федина. – Минск: Выш. шк., 2009. – 365 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

1	Силовые трансформаторы и автотрансформаторы .....	3
2	Воздушные линии электропередачи .....	19
3	Кабельные линии электропередачи .....	36
4	Компенсирующие устройства .....	50
5	Регулировочные трансформаторы .....	55
	Литература .....	59

**Головач Ольга Михайловна  
Головач Юрий Дмитриевич**

## **ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**

**Методические указания  
к практическим занятиям  
и дипломному проектированию  
для студентов специальности 1-43 01 03  
«Электроснабжение (по отраслям)»  
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 17.01.11.

Рег. № 55Е.

E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)

<http://www.gstu.by>