

# 1 ТРАНСФОРМАТОРЫ

## Коэффициент трансформации, ЭДС и токи в обмотках, параметры холостого хода и короткого замыкания

**Задача 1.1.** Однофазный двухобмоточный трансформатор имеет номинальные напряжения: первичное 6,3 кВ, вторичное 0,4 кВ; максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода 1,5 Тл; площадь поперечного сечения этого стержня 200 см<sup>2</sup>; коэффициент заполнения стержня сталью  $k_c = 0,95$ . Определить число витков в обмотках трансформатора и коэффициент трансформации, если частота переменного тока в сети  $f = 50$  Гц.

**Задача 1.2.** Используя приведенное в табл. 1.1 значения параметров трехфазных масляных трансформаторов серии ТМ (в обозначении марки в числителе указано номинальная мощность трансформатора в кВА, в знаменателе - высшее напряжение в кВ), определить для каждого варианта значения параметров, величины которых не указаны в этой таблице. Обмотки соединены по схемам Y/Y. Частота тока в сети  $f = 50$  Гц.

**Таблица 1.1**

Параметр	Тип трансформатора								
	ТМ-1000/35	ТМ-50/6	ТМ-100/6	ТМ-180/6	ТМ-320/6	ТМ-560/35	ТМ-750/35	ТМ-1000/6	ТМ-10/6
Основной магнитный поток $\Phi_{\max}$ , Вб	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Число витков $\omega_1$	1600	1190	-	-	522	2000	-	-	-
Число витков $\omega_2$	-	-	72	-	-	-	146	-	-
Сечение стержня магнитопровода $Q_{ст}$ , м <sup>2</sup> , при $B_{\max}=1,5$ Тл	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Напряжение $U_{1ном}$ , кВ	35	6	6	6	6	35	35	6	6
Напряжение $U_{2ном}$ , кВ	-	0,4	0,5	0,5	0,4	-	3,15	0,4	0,4
Коэффициент трансформации $k$	5,56	-	-	-	-	5,55	-	-	-

**Задача 1.3.** Однофазный двухобмоточный трансформатор номинальной мощностью  $S_{ном}$  и номинальным током во вторичной цепи  $I_{2ном}$  при номинальном вторичном напряжении  $U_{2ном}$ , имеет коэффициент трансформации  $k$ ; при числе витков в обмотках  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Максимальное значение магнитной индукции в стержне  $B_{\max}$ , а площадь поперечного сечения этого стержня  $Q_{ст}$ ; ЭДС одного витка  $E_{в\text{тк}}$ , частота переменного тока в сети  $f = 50$  Гц. Значения перечисленных параметров приведены в табл. 1.2. Требуется определить не указанные в этой таблице значения параметров для каждого варианта.

**Таблица 1.2**

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
$S_{\text{НОМ}}$ , кВА	-	120	-	240	600
$U_{2\text{НОМ}}$ , В	400	630	-	880	660
$\omega_1$	-	1800	-	-	-
$\omega_2$	-	-	169	128	140
$k$	15	-	12	23,4	9,55
$E_{\text{ВТК}}$ , В	5	-	6	-	-
$Q_{\text{СТ}}$ , м <sup>2</sup>	-	0,018	-	0,022	-
$B_{\text{МАХ}}$ , Тл	1,5	1,4	1,5	-	1,55
$I_{2\text{НОМ}}$ , А	172	-	140	-	-

**Задача 1.4.** Однофазный трансформатор включен в сеть с частотой тока 50 Гц. Номинальное вторичное напряжение  $U_{2\text{НОМ}}$ , а коэффициент трансформации  $k$  (табл. 1.3). Определить число витков в обмотках  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , если в стержне магнитопровода трансформатора сечением  $Q_{\text{СТ}}$  максимальное значение магнитной индукции  $B_{\text{МАХ}}$ . Коэффициент заполнения стержня сталью  $k_c = 0,95$ .

**Таблица 1.3**

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{2\text{НОМ}}$ , В	230	400	680	230	230	400	400	680	230	230
$k$	15	10	12	8	10	6	8	12	14	8
$Q_{\text{СТ}}$ , м <sup>2</sup>	0,049	0,08	0,12	0,18	0,065	0,08	0,12	0,076	0,06	0,085
$B_{\text{МАХ}}$ , Тл	1,3	1,6	1,8	1,3	1,4	1,5	1,2	1,3	1,5	1,2

**Задача 1.5.** В табл. 1.4 приведены данные некоторых параметров трехфазных масляных трансформаторов: номинальная мощность  $S_{\text{НОМ}}$ ; номинальные первичное  $U_{1\text{НОМ}}$  и вторичное  $U_{2\text{НОМ}}$  напряжения; номинальный ток первичной стороны  $I_{1\text{НОМ}}$ ; напряжение короткого замыкания  $u_k$  и его активная  $u_{k,a}$  и реактивная  $u_{k,r}$  составляющие; ток холостого хода  $i_0$ ; мощности холостого хода  $P_0$  и короткого замыкания  $P_k$ ; коэффициенты мощности холостого хода  $\cos\varphi_0$  и короткого замыкания  $\cos\varphi_k$ ; сопротивление короткого замыкания  $Z_k$  и его активная  $r_k$  и реактивная  $x_k$  составляющие; номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки  $\Delta U_{\text{НОМ}}$  при коэффициенте мощности нагрузки трансформатора  $\cos\varphi_2 = 0,8$  (характер нагрузки - индуктивный). Соединение обмоток трансформатора  $Y/Y$ . Требуется определить параметры трансформатора, значения которых в таблице не указаны.

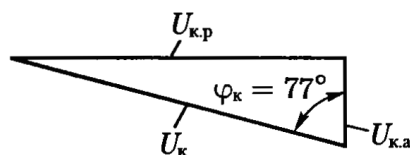
**Таблица 1.4**

Параметр	Тип трансформатора					
	ТМ-25/10	ТМ-40/6	ТМ-63/10	ТЛ1-100/6	ТМ-160/10	ТМ-250/6
$S_{ном}$ , кВА	25	-	63	-	-	250
$U_{1ном}$ , В	10	6	10	6	10	-
$u_k$ , %	4,5	-	4,5	-	4,5	-
$i_0$ , %	3,2	-	4,5	2,6	2,4	-
$P_0$ , кВт	0,13	0,175	-	-	0,51	-
$P_k$ кВт	0,6	0,88	-	-	2,65	-
$I_{1ном}$ , А	-	3,87	-	9,6	9,2	24
$I_0$ , А	-	0,115	0,16	-	-	-
$U_k$ , кВ	-	0,28	0,45	-	-	-
$Z_k$ , Ом	-	-	-	-	-	-
$\cos\varphi_k$	-	-	-	0,30	-	-
$\sin\varphi_k$	-	-	-	-	-	-
$\cos\varphi_0$	-	-	-	-	-	0,13
$u_{k,a}$ , %	-	-	-	1,95	-	-
$u_{k,p}$ , %	-	-	-	6,2	-	-
$r_k$ , Ом	-	-	-	-	-	0,0036
$x_k$ , Ом	-	-	-	-	-	0,01
$\Delta U_{ном}$ , %	-	-	-	-	-	-

**Задача 1.6.** Технические данные трехфазных трансформаторов серии ТМ приведены в табл. 1.5: номинальная мощность  $S_{ном}$ , номинальные первичное  $U_{1ном}$  и вторичное  $U_{2ном}$  напряжения, напряжение короткого замыкания  $u_k$ , мощность короткого замыкания  $P_{к.ном}$ , мощность холостого хода  $P_{0.ном}$ , ток холостого хода  $i_0$ . Определить необходимые параметры и построить треугольник короткого замыкания (обмотки соединены Y/Y; параметры приведены к рабочей температуре).

**Таблица 1.5**

Тип трансформатора	$S_{ном}$ , кВА	$U_{1ном}$ , В	$U_{2ном}$ , В	$u_k$ , %	$P_{к.ном}$ , кВт	$P_{0.ном}$ , кВт	$i_0$ , %
ТМ-1000/10	1000	10	0,4	5,5	12,2	2,45	1,4
ТМ-1600/10	1600	10	0,4	5,5	18,0	3,3	1,3
ТМ-2500/10	2500	10	0,4	5,5	25,0	4,6	1,0
ТМ-4000/10	4000	10	0,4	5,5	33,5	6,4	0,9
ТМ-6300/10	6300	10	0,4	5,5	46,0	9,0	0,8
ТМ-630/10	630	10	0,4	5,5	7,6	1,56	2,0



**Рис. 1.6.** Треугольник напряжений короткого замыкания

## Векторная диаграмма, потери и КПД трансформатора

**Задача 1.8.** Для однофазного трансформатора номинальной мощностью  $S_{\text{НОМ}}$  и номинальным первичным напряжением  $U_{1\text{НОМ}}$ , мощностью короткого замыкания  $P_{\text{к.НОМ}}$  и напряжением короткого замыкания  $u_{\text{к}}$  рассчитать данные и построить график зависимости изменения вторичного напряжения  $\Delta U$  от коэффициента нагрузки  $\beta$ , если коэффициент мощности нагрузки  $\cos\varphi_2$ . Значения перечисленных параметров приведены в табл. 1.6 (параметры приведены к рабочей температуре).

**Таблица 1.6**

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{НОМ}}$ , кВА	600	250	800	100	180	560	320	50	120	80
$U_{1\text{НОМ}}$ , В	31,5	6,3	31,5	6,3	6,3	10	10	3,4	6,3	10
$P_{\text{к.НОМ}}$ , кВт	20	12	22	7	10	25	13	3,5	8	5,4
$u_{\text{к}}$ , %	8,5	6,5	8,5	5,5	6,5	7	6,5	5,5	5,5	6
$\cos\varphi_2$	0,75 (емк.)	0,85 (инд.)	0,80 (емк.)	0,70 (инд.)	1,0	0,85 (инд.)	0,9 (емк.)	1,0	0,80 (инд.)	0,70 (инд.)

**Задача 1.11.** В табл. 1.8 приведены данные трехфазных силовых трансформаторов серии ТМ: полная номинальная мощность  $S_{\text{НОМ}}$ ; номинальные потери холостого хода  $P_{0\text{НОМ}}$  и короткого замыкания  $P_{\text{к.НОМ}}$ ; коэффициент мощности нагрузки  $\cos\varphi_2$ . Требуется определить величину снижения КПД при номинальной нагрузке по сравнению с его максимальным значением.

**Таблица 1.8**

Тип трансформатора	$S_{\text{НОМ}}$ , кВА	$P_{0\text{НОМ}}$ , кВт	$P_{\text{к.НОМ}}$ , кВт	$\cos\varphi_2$
ТМ-100/35	100	0,465	1,97	0,80
ТМ-160/35	160	0,70	2,65	0,85
ТМ-250/35	250	1,0	3,70	0,85
ТМ-400/35	400	1,35	5,50	0,80
ТМ-630/35	630	1,90	7,60	0,75
ТМ-1000/35	1000	2,75	12,2	0,70
ТМ-1600/35	1600	3,65	18,0	0,80
ТМ-2500/35	2500	5,10	25,0	0,75
ТМ-4000/35	4000	6,70	33,5	0,85
ТМ-6300/35	6300	9,40	46,5	0,80

## Параллельная работа трансформаторов. Автотрансформаторы

**Задача 1.13.** Три трехфазных трансформатора номинальной мощностью  $S_{\text{номI}}$ ,  $S_{\text{номII}}$  и  $S_{\text{номIII}}$  и напряжением короткого замыкания  $u_{\text{кI}}$ ,  $u_{\text{кII}}$  и  $u_{\text{кIII}}$  включены на параллельную работу (табл. 1.10). Требуется определить:

1) нагрузку каждого трансформатора ( $S_{\text{I}}$ ,  $S_{\text{II}}$  и  $S_{\text{III}}$ ) в кВА, если общая нагрузка параллельной группы равна сумме номинальных мощностей этих трансформаторов ( $S_{\text{общ}} = S_{\text{номI}} + S_{\text{номII}} + S_{\text{номIII}}$ );

2) степень использования каждого из трансформаторов по мощности ( $S/S_{\text{ном}}$ );

3) насколько следует уменьшить общую нагрузку трансформаторной группы  $S_{\text{общ}}$ , чтобы устранить перегрузку трансформаторов; как при этом будут использованы трансформаторы по мощности в % от их номинальной мощности?

4)

**Таблица 1.10**

Параметр	Варианты				
	1	2	3	4	5
Трансформатор I					
Номинальная мощность $S_{\text{номI}}$ , кВА	5000	5600	3200	1800	560
Напряжение короткого замыкания $u_{\text{кI}}$ , %	5,3	5,3	4,3	4,4	4,0
Трансформатор II					
Номинальная мощность $S_{\text{номII}}$ , кВА	3200	3200	4200	3200	420
Напряжение короткого замыкания $u_{\text{кII}}$ , %	5,5	5,5	4,3	4,0	4,2
Трансформатор III					
Номинальная мощность $S_{\text{номIII}}$ , кВА	1800	3200	5600	4200	200
Напряжение короткого замыкания $u_{\text{кIII}}$ , %	5,7	5,5	4,0	3,8	4,5

**Задача 1.14.** Однофазный понижающий автотрансформатор номинальной (проходной) мощностью  $S_{\text{ном}}$  при номинальном первичном напряжении  $U_1$  и номинальном вторичном напряжении  $U_2$  имеет число витков в обмотке  $\omega_1$ , из которых  $\omega_2$  витков являются общими для первичной и вторичной цепей (см. рис. 1.4); ЭДС, индуцируемая в одном витке обмотки трансформатора  $E_{\text{втек}}$ . Требуется определить недостающие в табл. 1.11 значения параметров, а также определить, во сколько раз масса и потери этого автотрансформатора меньше, чем у двухобмоточного трансформатора такой же мощности и напряжений; определить мощности автотрансформатора, передаваемые из первичной во вторичную цепь электрическим и электромагнитным путями. При решении задачи током холостого хода пренебречь.

**Таблица 1.11**

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{НОМ}}$ , кВА	100	180	320	560	1000	800	600	700	400	200
$U_1$ , В	0,5	3,0	6,0	10	35	10	10	6,0	3,0	3,0
$U_2$ , В	0,23	0,4	0,4	0,4	3,0	0,4	0,6	0,6	0,23	0,23
$E_{\text{ВТК}}$ , В	5,5	5,5	8,5	6,5	5,5	6,5	8,5	5,5	6,5	5,5
$\omega_1$	6,5	5,5	5,5	5,5	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,5
$\omega_2$	0,65	1,2	1,6	2,5	5,2	3,6	2,8	3,2	2,0	1,5

**Задача 1.15.** В табл. 1.12 указаны значения следующих параметров понижающего автотрансформатора: номинальная (проходная) мощность  $S_{\text{НОМ}}$ , коэффициент трансформации  $k_A$ , токи в первичной  $I_{1\text{НОМ}}$  и вторичной  $I_{2\text{НОМ}}$  цепях, ток в общей части витков  $I_{12}$ , напряжения первичное  $U_1$  и вторичное  $U_2$ , мощности расчетная  $S_{\text{расч}}$  и передаваемая электрическим путем  $S_э$ . Используя указанные в таблице значения параметров, определить недостающие значения параметров.

**Таблица 1.12**

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{НОМ}}$ , кВА	2,64	-	-	2,2	-	3,5	-	3,5	-	2,8
$S_э$ , кВА	-		1,3	0,85	-	-	0,65	-	-	-
$S_{\text{расч}}$ , кВА	-		0,5	-	0,8	-	-	-	1,1	-
$U_1$ , В	-	220	380	-	-	380	-	380	-	-
$U_2$ , В	127	-	-	250	-	-	300	-	220	-
$I_{1\text{НОМ}}$ , А	12	8								12,7
$I_{2\text{НОМ}}$ , А	-	-	-	-	-	12	-	11	15	-
$I_{12\text{НОМ}}$ , А	-	-	-	-	6	-	-	-	-	-
$k_A$	-	1,35	-	-	1,25	-	1,30	-	-	1,80

## 2 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ БЕСКОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН

**Задача 2.1.** Статор трехфазной бесколлекторной машины переменного тока с внутренним диаметром  $D_1$ , длиной  $l_1$  имеет число пазов  $Z_1$ , число полюсов  $2p$  (табл. 2.1). Определить ЭДС одной фазы обмотки статора, если шаг обмотки по пазам  $y_1 = \tau$ , число витков в катушке  $\omega_k$ , магнитная индукция в воздушном зазоре машины  $B_\delta$ , а частота тока в питающей сети  $f_1 = 50$  Гц.

**Таблица 2.1**

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$D_1$ , м	0,20	0,25	0,32	0,18	0,36	0,48	0,26	0,32	0,28	0,52
$l_1$ , м	0,20	0,20	0,30	0,20	0,30	0,32	0,24	0,36	0,30	0,40
$Z_1$	36	48	48	36	48	54	30	42	48	60
$2p$	4	4	4	2	8	6	2	4	6	8
$\omega_k$	4	3	3	3	2	2	4	3	4	2
$B_\delta$ , Тл	0,75	0,80	0,70	0,75	1,0	1,0	0,80	0,75	1,0	0,80

**Задача 2.3.** Рассчитать параметры и начертить развернутую схему трехфазной двухслойной петлевой обмотки статора по данным, приведенным в табл. 2.2. Соединение катушечных групп последовательное (число параллельных ветвей  $a = 1$ ).

**Таблица 2.2**

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Число полюсов $2p$	2	4	4	4	6	8	4	4	2	4
Укорочение шага пазов	2	2	1	1	1	1	2	0	1	0
Число пазов $Z_1$	18	32	24	36	36	48	36	24	18	36

## 4 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### Синхронные генераторы

**Задача 4.1.** Параметры трехфазного синхронного генератора (табл. 4.1): номинальное (линейное) напряжение на выходе  $U_{1\text{ном}}$  при частоте тока 50 Гц, обмотка статора соединена «звездой», номинальный ток статора  $I_{1\text{ном}}$ , КПД генератора при номинальной нагрузке  $\eta_{\text{ном}}$ , число полюсов  $2p$ , мощность на входе генератора  $P_{1\text{ном}}$ , полезная мощность на выходе генератора  $P_{\text{ном}}$ , суммарные потери в режиме номинальной нагрузки  $\sum P_{\text{ном}}$ , полная номинальная мощность на выходе  $S_{2\text{ном}}$ , коэффициент мощности нагрузки, подключенной к генератору,  $\cos\varphi_{1\text{ном}}$ , вращающий момент первичного двигателя при номинальной загрузке генератора  $M_{1\text{ном}}$ . Требуется определить параметры, значения которых в табл. 4.1 не указаны.

**Таблица 4.1**

Параметр	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{\text{ном}}$ , кВА	330	-	270	470	-	600	780	450	700	500
$U_{1\text{ном}}$ , В	6,3	3,2	0,4	-	0,7	3,2	6,3	0,4	-	3,2
$\eta_{\text{ном}}$ , %	92	-	-	91	90	93	-	-	93	92
$2p$	6	8	-	6	10	12	6	-	6	10
$P_{\text{ном}}$ , кВт	-	-	206	-	-	-	667,4	369,5	-	-
$\sum P_{\text{ном}}$ , кВт	-	27	18							
$\cos\varphi_{1\text{ном}}$	0,9	-	0,85	0,9	-	0,92	-	0,9	0,92	0,85
$I_{1\text{ном}}$ , А	-	72,2	-	43,1	190	-	-	-	64,2	-
$P_{1\text{ном}}$ , кВт	-	340	-	-	190	-	717,6	-	-	-
$M_{1\text{ном}}$ , Н·м	-	-	-	-	-	-	-	7735	-	-

**Задача 4.6.** Трехфазный синхронный генератор мощностью  $S_{\text{ном}}$  работает параллельно с сетью напряжением  $U_1$  в режиме точки с координатами  $I_{1*}$  и  $I_{в*}$  на U-образной характеристике (рис. 4.6), построенной в относительных единицах.

Требуется определить: силу тока в цепи статора  $I_1$  и его активную и реактивную составляющие; мощность  $S_r$ , отдаваемую генератором в сеть, и ее активную и реактивную составляющие; коэффициент мощности генератора  $\cos\varphi_r$ . Необходимые для решения задачи значения параметров приведены в табл. 4.6.

Ответить на вопросы:

а) в каких случаях целесообразна работа синхронного генератора, включенного на параллельную работу с сетью, с перевозбуждением, а в каких - с недозавозбуждением?

б) почему с возрастанием активной мощности генератора увеличивается значение тока возбуждения, соответствующее  $\cos\varphi_r = 1$ ?

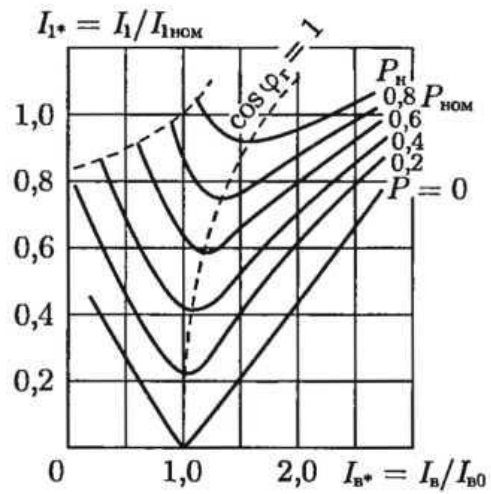


Рис. 4.6. U-образные характеристики трехфазного генератора, включенного на параллельную работу с сетью

Таблица 4.6

Параметр	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
$S_{\text{ном}}$ , кВА	500	1000	1300	300	800	2000
$U_c$ , кВ	0,4	6,3	10,5	0,4	6,3	10,5
$I_{1*}$	0,6	0,8	0,5	0,8	0,88	0,6
$I_{в*}$	1,9	2,0	1,4	1,15	2,0	1,9

## Синхронные двигатели и компенсаторы

**Задача 4.8.** Трехфазный синхронный двигатель серии СДН2 имеет данные каталога: номинальная мощность  $P_{\text{ном}}$ , число полюсов  $2p$ , КПД  $\eta_{\text{ном}}$ ; кратности - пускового тока  $I_{\text{п}} / I_{\text{ном}}$ , пускового момента  $M_{\text{п}} / M_{\text{ном}}$ , максимального синхронного момента  $M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$ , асинхронного момента при скольжении  $s = 5\%$  (момент входа в синхронизм)  $M_{5\%} / M_{\text{ном}}$ ; соединение обмоток статора «звездой». Значения перечисленных величин приведены в табл. 4.8.

Определить: частоту вращения, номинальный и пусковой токи в цепи статора, номинальный, максимальный синхронный, пусковой моменты и асинхронный момент входа в синхронизм (при  $s = 5\%$ ). Напряжение питающей сети  $U_c = 10$  кВ при частоте 50 Гц, коэффициент мощности  $\cos\varphi_1 = 0,8$ .

**Таблица 4.8**

Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$ , кВт	$2p$	$\eta_{\text{ном}}$ , %	$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	$M_{5\%}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{п}}/M_{\text{ном}}$	$I_{\text{п}}/I_{\text{ном}}$
16-36-12	500	12	93,7	1,9	1,3	1,0	5,2
16-44-12	630	12	94,2	1,9	1,3	1,0	5,1
17-31-12	800	12	94,3	1,9	1,1	1,0	4,7
17-39-12	1000	12	94,9	1,8	1,0	1,0	4,5
17-49-12	1250	12	95,3	1,9	1,2	1,1	5,2
18-64-12	2500	12	96,2	1,8	1,4	1,2	6,5
16-36-10	630	10	94,4	1,8	1,4	0,75	5,0
16-44-10	800	10	94,9	1,8	1,3	0,75	5,0
17-44-10	1250	10	95,5	1,9	1,2	1Д	5,4
17-51-10	1600	10	95,9	1,8	1,2	1,0	5,2