

## ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

6-1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ  
О ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКАа) Векторная диаграмма  
и соотношения основных величин

Наиболее важные соотношения, характеризующие работу трансформаторов тока, установлены, исходя из схемы замещения и векторной диаграммы.

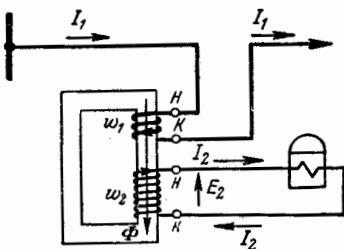


Рис. 6-1. Принципиальная схема трансформатора тока.

На рис. 6-1 нанесены положительные направления токов, э. д. с. и магнитного потока. Схема замещения (рис. 6-2) составлена в соответствии со схемой рис. 6-1. Условные обозначения приняты следующие:

- $I_1$  — первичный ток;
- $I_{1n}$  — номинальный первичный ток;
- $I_2$  — вторичный ток;

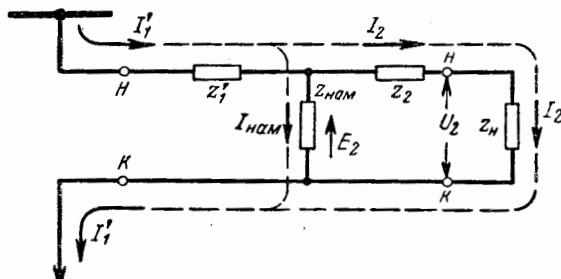


Рис. 6-2. Схема замещения трансформатора тока.

$I_{2n}$  — номинальный вторичный ток;  
 $E_2$  — э. д. с. вторичной обмотки;  
 $U_2$  — напряжение на зажимах вторичной обмотки;  
 $F$  — н. с.;

$\Phi$  — магнитный поток;  
 $B$  — магнитная индукция;

$w_1$  — число витков первичной обмотки;  
 $w_2$  — число витков вторичной обмотки;

$n_t$  — коэффициент трансформации,  $n_t = \frac{I_{1n}}{I_{2n}} \approx \frac{w_2}{w_1}$ ;

$I'_1$  — первичный ток, приведенный ко вторичной обмотке,  $I'_1 = \frac{I_1}{n_t}$ ;

$I'_{\text{нам}}$  — ток намагничивания, приведенный к вторичной обмотке,  $I'_{\text{нам}} = \frac{I_{\text{нам}}}{n_t}$ ;

$z'_1$  — полное сопротивление первичной обмотки, приведенное к вторичной обмотке;

$z_2$  — полное сопротивление вторичной обмотки,  $Z_2 = r_2 + jx_2$ ;

$z_n$  — сопротивление вторичной нагрузки трансформатора тока;

$z_{n,n}$  — сопротивление номинальной вторичной нагрузки;

$z_{\text{нам}}$  — полное сопротивление ветви намагничивания;

$r$  — активное сопротивление;

$x$  — реактивное сопротивление;

$\gamma$  — угол потерь в стали сердечника;

$\alpha$  — угол полного сопротивления вторичной цепи, включая сопротивление вторичной обмотки трансформатора тока;

$\delta$  — угловая погрешность;

$f\%$  — погрешность по току.

При построении векторной диаграммы (рис. 6-3) за исходный принят вектор вторичного тока  $I_2$ . Вектор напряжения  $U_2$  на диаграмме опережает вектор вторичного тока  $I_2$  на угол полного сопротивления вторичной нагрузки  $Z_n$ :

$$\dot{U}_2 = I_2 (r_n + jx_n). \quad (6-1)$$

Электродвижущая сила вторичной обмотки  $E_2$  отличается от  $U_2$  за счет падения напряжения в активном

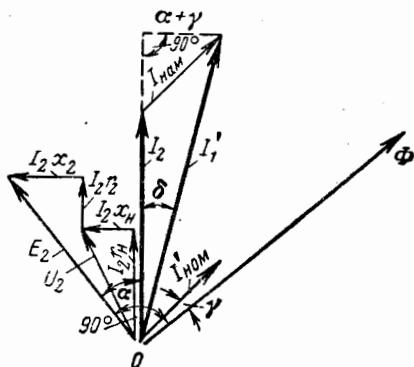


Рис. 6-3. Векторная диаграмма трансформаторов тока.

и реактивном сопротивлении вторичной обмотки от тока  $I_2$ :

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + I_2(r_2 + jx_2). \quad (6-2)$$

Абсолютная величина э. д. с. равна:

$$E_2 = I_2 \sqrt{(r_h + r_2)^2 + (x_h + x_2)^2}. \quad (6-3)$$

Вектор магнитного потока на диаграмме должен отставать на  $90^\circ$  от вектора наведенной им э. д. с.  $E_2$ , так как вектор  $E_2$  соответствует принятым на рис. 6-1 положительным направлениям токов  $I_1$  и  $I_2$ , противоположным в витках первичной и вторичной обмоток. Магнитный поток  $\Phi$  связан с э. д. с.  $E_2$  соотношением

$$\Phi = \frac{E_2 \cdot 10^8}{4,44 f w_2}. \quad (6-4)$$

Соответственно магнитная индукция в стали сердечника

$$B = \frac{\Phi}{s}, \quad (6-5)$$

где  $s$  — площадь поперечного сечения стали сердечника трансформатора тока.

Магнитный поток  $\Phi$  создается н. с.  $F$ , зависящей от характеристики намагничивания стали сердечника:

$$F = f(\Phi)$$

или

$$F = f(B). \quad (6-6)$$

Намагничающая сила  $F$  выражается в ампер-витках:

$$F = I_{\text{нам}} w_1$$

или

$$F = I'_{\text{нам}} w_2. \quad (6-7)$$

На векторной диаграмме ток намагничивания  $I'_{\text{нам}}$  опережает создаваемый им магнитный поток  $\Phi$  на угол  $\gamma$ , величина которого зависит от активных потерь в стали сердечника и может быть определена по экспериментальным кривым  $\gamma = f(B)$ . Вектор приведенного первичного тока  $I'_1$  на диаграмме получен как сумма векторов вторичного тока и тока намагничивания:

$$I'_1 = I_2 + I'_{\text{нам}}. \quad (6-8)$$

## 6) Погрешности трансформаторов тока

б) Погрешности трансформатора тока обусловлены наличием тока намагничивания  $I'_{\text{нам}}$ , вследствие чего

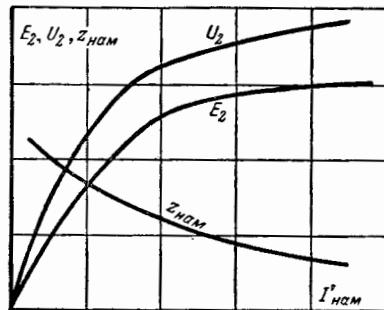


Рис. 6-4. Основные характеристики трансформаторов тока.

вектор вторичного тока  $I_2$  отличается от вектора первичного тока  $I'_1$ .

Погрешность по току выражается формулой

$$f\% = \frac{|I'_1 - I_2|}{I'_1} \cdot 100. \quad (6-9)$$

Под угловой погрешностью понимается угол  $\delta$  между векторами токов  $I_2$  и  $I'_1$ . Согласно векторной диаграмме (рис. 6-3)

$$\sin \delta \approx \frac{I'_{\text{нам}} \cos(\alpha + \gamma)}{I'_1}. \quad (6-10)$$

Положительной угловой погрешностью считается такая, когда вектор  $I_2$  опережает вектор  $I'_1$ . Величина погрешностей зависит от соотношения величин сопротивлений  $z'_{\text{нам}}$  и  $z_n$ . При увеличении сопротивлений нагрузки погрешности возрастают, так как увеличивается ток  $I'_{\text{нам}}$ . Поэтому заводами-изготовителями задается величина номинальной вторичной нагрузки  $z_{2n}$ , при которой погрешности трансформатора тока не выходят за пределы величин, установленных ГОСТ для соответствующего класса точности. Если величина номинальной вторичной нагрузки задана в вольт-амперах ( $S_n$ ), то ей соответствует  $z_{2n} = \frac{S_n}{I_{2n}^2}$ .

## б) Характеристики намагничивания и вольт-амперные характеристики трансформаторов тока

Характеристика намагничивания представляет собой зависимость н. с.  $F$  от магнитной индукции  $B$ . Согласно (6-4), (6-5) и (6-7) выражение (6-6) можно преобразовать в следующее:

$$E_2 = f(I'_{\text{нам}}). \quad (6-11)$$

Такая характеристика намагничивания значительно удобнее для практических целей. Пример такой характеристики показан на рис. 6-4. Типовые характеристики намагничивания обычно строятся на основании усредненных результатов специальных испытаний трансформаторной стали на заводах-изготовителях.

В практике эксплуатации релейной защиты для оценки исправности трансформаторов тока и анализа их работы часто пользуются вольт-амперными характеристиками

$$U_2 = f(I'_{\text{нам}}). \quad (6-12)$$

Эта характеристика снимается при подаче регулируемого синусоидального напряжения на зажимы вторичной обмотки при разомкнутой первичной обмотке. Так как при этом  $U_2$  больше  $E_2$  за счет падения напряжения в сопротивлении  $\omega_2$  от тока намагничивания  $I_{\text{нам}}$ , вольт-амперная характеристика располагается выше характеристики намагничивания (рис. 6-4). Характеристика намагничивания может быть построена по нескольким точкам вольт-амперной характеристики. При этом величина  $E_2$  для каждого значения  $I_{\text{нам}}$  определяется по выражению

$$E_2 = U_2 - I_{\text{нам}} z_2. \quad (6-13)$$

Для упрощения эта разность берется арифметической, что дает запас при расчетах погрешностей трансформаторов тока.

Характеристикам намагничивания, полученным указанным способом, следует оказывать предпочтение перед типовыми, поскольку за счет допускаемой согласно ГОСТ 7746-55 неидентичности стали, применяемой для сердечников, возможны отклонения фактической характеристики от типовой до 20%.

### г) Десятипроцентная погрешность трансформаторов тока

Критерием пригодности трансформаторов тока для релейной защиты является 10%-ная погрешность при максимальном значении тока короткого замыкания.

Условию 10%-ной погрешности трансформатора тока соответствует его работа с током намагничивания, равным 10% величины первичного тока. При этом его максимальная погрешность по току составит  $f\% = 10\%$ , когда  $\alpha + \gamma = 90^\circ$  (рис. 6-3), т. е. при  $\delta = 0$ , а максимальная угловая погрешность при любых других возможных значениях  $\alpha + \gamma$  не превысит допускаемой требованиями релейной защиты величины  $\delta = 7^\circ$ .

Таким образом, при работе трансформатора тока в пределах 10%-ной погрешности его погрешности по току и по углу не превышают 10% и  $7^\circ$ . В действительных условиях обычно при работе трансформатора тока с 10%-ной погрешностью

$$f\% < 10\% \text{ и } \delta < 7^\circ.$$

Так как при работе трансформатора тока с 10%-ной погрешностью разным величинам сопротивления вторичной нагрузки  $z_n$  соответствуют определенные значения первичного тока, для оценки пригодности трансформаторов тока для релейной защиты в конкретных условиях применяются кривые 10%-ных погрешностей. Кривая 10%-ных погрешностей представляет собой зависимость кратности первичного тока  $m$  от величины сопротивления внешней вторичной нагрузки:

$$m = \frac{I_1}{I_{1n}} = f(z_n). \quad (6-14)$$

Любая точка на этой кривой соответствует работе трансформатора тока с 10%-ной погрешностью. Кривые 10%-ных погрешностей для наиболее распространенных типов трансформаторов тока приведены в § 6-4. При использовании кривых 10%-ной погрешности необходимо иметь в виду, что они обычно строятся по типовым характеристикам намагничивания, которые могут иметь отличие от фактических, что особенно важно учитывать при работе трансформаторов тока в области насыщения их сердечников (начиная от кратности первичного тока 4—5 и выше).

Для каждого трансформатора тока заводами-изго-

товителями указывается так называемая 10%-ная кратность, которой соответствует 10%-ная погрешность при определенной заданной вторичной нагрузке.

Работа измерительных трансформаторов тока при больших значениях первичного тока характеризуется также кратностью насыщения, представляющей кратность  $I_1/I_{1n}$ , при которой  $f\% = 10\%$  при номинальной вторичной нагрузке  $z_{2n}$ , имеющей коэффициент мощности  $\cos \phi = 0.8$ .

### д) Максимальная кратность вторичного тока трансформатора тока

Максимальная кратность вторичного тока  $n = I_{2\max}/I_{2n}$  характеризует наибольшую величину вторичного тока при  $z_n = z_{n,n}$  и первичном токе, соответствующем гарантированному заводом-изготовителем устойчивости трансформатора тока в токам короткого замыкания. При вторичной нагрузке  $z_{n,k}$ , отличающейся от  $z_{n,n}$ , максимальная кратность вторичного тока может быть подсчитана по формуле

$$n_k = n \frac{z_2 + z_{n,k}}{z_2 + z_{n,n}}. \quad (6-15)$$

## 6-2. РАСЧЕТНАЯ ПРОВЕРКА ПРИГОДНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА ДЛЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

### а) Общие требования

К работе трансформаторов тока предъявляются различные требования, зависящие от видов подключенных к ним устройств релейной защиты. Для ряда видов релейной защиты (дифференциальные, дистанционные, направленные и др.) трансформаторы тока до определенных значений первичного тока должны удовлетворять 10%-ной погрешности. Трансформаторы тока, используемые для питания защиты переменным оперативным током, для устройства компаундирования и для других устройств, не требующих точной трансформации тока, могут работать с погрешностью больше 10%-ной, и их обычно достаточно проверять на обеспечение необходимой для надежного действия этих устройств величины вторичного тока при определенном значении первичного тока.

Трансформаторы тока, работающие с погрешностью, превышающей 10%-ную, при наличии в их вторичных цепях токовых реле типа ЭТ-520 не должны иметь погрешность выше 50%-ной при токе  $I_2$ , большем  $3.5 I_{p,\text{уст}}$ , во избежание возникновения неустойчивой вибрации реле, возникающей вследствие искажения формы кривой вторичного тока. При расчетной проверке трансформаторов тока в условиях эксплуатации необходимо:

1) при расчетах по типовым характеристикам намагничивания перестраивать их с понижением на 20%, как это показано на рис. 6-5;

2) при расчетах по кривым 10%-ной погрешности вводить коэффициент  $d$ , равный 0.8, учитывающий возможность отклонения приведенных в кривых кратностей тока от действительно допустимых на 20%.

При предварительном проектном выборе трансформаторов тока и сечения проводов и кабелей в их

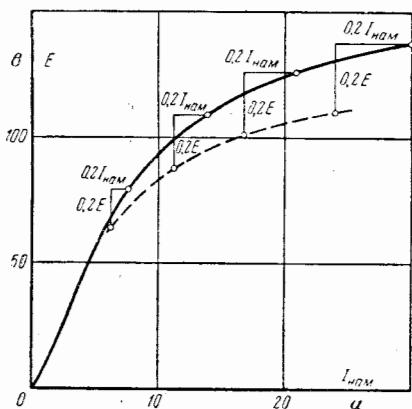


Рис. 6-5. Графическое построение пониженной на 20% характеристики намагничивания трансформатора тока.

вторичных цепях также следует производить перестройку типовых характеристик, и при применении кривых 10%-ных погрешностей принимать коэффициент  $d=0,8$ .

### б) Определение нагрузки на вторичную обмотку трансформатора тока

Внешняя нагрузка на вторичную обмотку трансформатора тока складывается из сопротивлений проводов и кабелей, реле и приборов и переходных сопротивлений в контактных соединениях.

Расчетное определение сопротивлений нагрузки выполняется поэлементно:

1. Сопротивление проводов и кабелей определяется по формуле

$$r_{\text{пр}} = \frac{l}{\gamma s}, \quad (6-16)$$

где  $r_{\text{пр}}$  — сопротивление провода (жилы кабеля),  $\text{ом}$ ;

$l$  — длина провода (кабеля),  $\text{м}$ ;

$\gamma$  — удельная проводимость,  $\text{м/ом} \cdot \text{мм}^2$ ;

$s$  — сечение провода или жилы кабеля,  $\text{мм}^2$ .

2. Сопротивление реле и приборов

$$z_p = \frac{s}{I_{\text{ном}}^2} \quad (6-17)$$

где  $z_p$  — полное сопротивление реле (прибора),  $\text{ом}$ ;

$S$  — потребление реле (прибора),  $\text{вт}$ ;

$I_{\text{ном}}$  — номинальный ток реле (прибора),  $\text{а}$ .

3. Переходное сопротивление контактов принимается равным 0,05  $\text{ом}$  для всей вторичной цепи трансформатора тока.

Суммирование всех сопротивлений производится арифметически. Это упрощает расчет, а небольшая неточность дает дополнительный запас. Нагрузка трансформаторов тока зависит от схемы их соединения и вида короткого замыкания. Действительная нагрузка трансформатора тока

$$z_n = \frac{U_2}{I_2}. \quad (6-18)$$

Расчетные выражения для подсчета вторичной нагрузки трансформаторов тока для наиболее распространенных схем вторичных токовых цепей и для разных видов коротких замыканий приведены в табл. 6-1.

### в) Выбор расчетного вида повреждения и определение расчетного первичного тока

Расчетный вид повреждения выбирается таким, при котором имеет место наибольшая погрешность трансформаторов тока. При этом следует иметь в виду, что в ряде случаев, несмотря на меньшую величину тока однофазного короткого замыкания, погрешность при этом виде повреждения может быть больше за счет большей величины нагрузки.

Расчетный первичный ток, при котором производится проверка трансформаторов тока, принимается равным:

$$I_{\text{расч}} = n I_{\text{макс}}, \quad (6-19)$$

где  $I_{\text{макс}}$  — максимальное значение тока, проходящего через трансформатор тока;

$n$  — коэффициент, учитывающий неточность расчетов и влияние апериодической составляющей тока короткого замыкания на работу трансформатора тока.

Величины  $I_{\text{макс}}$  и  $n$  выбираются соответственно типу и исполнению устройств по табл. 6-2.

### г) Проверка трансформаторов тока на 10%-ную погрешность

Для проверки необходимо определить нагрузку на вторичную обмотку трансформатора тока согласно § 6-2, б и табл. 6-1 и расчетный первичный ток согласно § 6-2, в.

#### Проверка по вольт-амперным характеристикам или по характеристикам намагничивания

Проверка производится при условии  $\alpha + \gamma = 90^\circ$ , соответствующем совпадению по фазе токов  $I'_1$ ,  $I'_2$  и  $I'_{\text{ном}}$ . Для расчета должна быть использована наиболее низкая вольт-амперная характеристика из проверяемого комплекта трансформаторов тока.

При расчете по типовой характеристике намагничивания необходимо учитывать рекомендации, приведенные в § 6-2, а. Ниже приведены два способа расчетной оценки пригодности трансформаторов тока:

1. Определение допустимой величины вторичной нагрузки  $z_{\text{н.доп}}$ .

Расчетный ток  $I'_{\text{расч}}$  приводится к вторичной обмотке:

$$I'_{\text{расч}} = \frac{I_{\text{расч}}}{n_t}.$$

Определяется ток намагничивания по условию 10%-ной погрешности:

$$I'_{\text{нам}} = 0,1 I'_{\text{расч}}. \quad (6-20)$$

По вольт-амперной характеристике или характеристике намагничивания определяется соответственно  $U_2$  или  $E_2$  и подсчитывается величина допустимой вторичной нагрузки:

$$z_{\text{н.доп}} = \frac{U_2 - I'_{\text{расч}} z_2}{0,9 I'_{\text{расч}}} \quad (6-21a)$$

Таблица 6-1

## Расчетные формулы для определения вторичной нагрузки трансформаторов тока

№ п/п.	Схема соединения трансформаторов тока и нагрузки	Вид короткого замыкания	Внешняя нагрузка на выводах вторичной обмотки трансформаторов тока
1		Трехфазное и двухфазное	$z_H = r_{np} + z_p + r_{per}$
		Однофазное	$z_H = 2r_{np} + z_p + z_{p0} + r_{per}$
2		Трехфазное и двухфазное Двухфазное за трансформатором Y/Δ	$z_H = 3(r_{np} + z_p) + r_{per}$
		Однофазное	$z_H = 2(r_{np} + z_p) + r_{per}$
3		Трехфазное	$z_H = \sqrt{3}r_{np} + z_p + r_{per}$
		Двухфазное (AB или BC) и однофазное	$z_H = 2r_{np} + z_p + r_{per}$
4		Двухфазное за трансформатором Y/Δ	$z_{HA} = 3r_{np} + z_p + r_{per}$ (при $I_A = I_C$ )
		Трехфазное	$z_H = \sqrt{3}(2r_{np} + z_p) + r_{per}$
4		Двухфазное AC	$z_H = 4r_{np} + 2z_p + r_{per}$
		Однофазное и двухфазное AB и BC	$z_H = 2r_{np} + z_p + r_{per}$
5			$z_H = 0,5z_{H.bn}$ $z_{H.bn}$ — нагрузка, подсчитанная согласно выражениям по пп. 1—4
6			$z_H = 2z_{H.bn}$ $z_{H.bn}$ — то же, что и в п. 5
7		Трехфазное и двухфазное	$z_{H\Delta} = 3r_{np} + r_{per}$ $z_{H\Delta} = r_{1np} + r_{per}$

Продолжение табл. 6-1

№ п/п	Схема соединения трансформаторов тока и нагрузки	Вид короткого замыкания	Внешняя нагрузка на выводах вторичной обмотки трансформаторов тока
8		Трехфазное и двухфазное	$z_h = r_{np} + z_{AT} + \frac{r'_{np}}{n_{AT}^2} + r_{per}$ $n_{AT} = \frac{i_2}{I_2'} \quad \text{коэффициент трансформации автотрансформатора}$
9		Трехфазное и двухфазное	$z_h = 3 \left( r_{np} + z_{AT} + \frac{r'_{np}}{n_{AT}^2} \right) + r_{per}$ $n_{AT} \quad \text{см. п. 8}$
10		Трехфазное и двухфазное	$z_{hY} = r_{np} + z_{wI} + k_1 z_{w\partial} + r_{per}$ $z_{h\Delta} = 3(r_{np} + z_{wII} + k_2 z_{w\partial}) + r_{per}$ <p>Если <math>w_I &gt; w_{II}</math>, то <math>k_1 = \frac{w_I - w_{II}}{w_{II} + w_\partial}</math> и <math>k_2 = \frac{w_I - w_{II}}{w_I + w_\partial}</math></p> <p>Если <math>w_I &lt; w_{II}</math>, то <math>k_1 = \frac{w_{II} - w_I}{w_{II} + w_\partial}</math> и <math>k_2 = \frac{w_{II} - w_I}{w_I + w_\partial}</math></p>

теристике намагничивания производится построение прямой падения напряжения во вторичной цепи:

$$U_2 = 10I'_{nam}(z_2 + 0,9z_h) \quad (6-22)$$

или

$$E_2 = 9I'_{nam}(z_2 + z_h) \quad (6-23)$$

По точке пересечения построенной прямой с характеристикой (рис. 6-6) находят ток  $I'_{nam}$ , соответствующий 10%-ной погрешности.

Допустимый первичный ток

$$I_{1dop} = n_t \cdot 10I'_{nam} \quad (6-24)$$

и.т.и

$$z_{h,dop} = \frac{E_2 - 0,9I'_{1prac}z_2}{0,9I'_{1prac}} \quad (6-21b)$$

Если  $z_{h,dop} \geq z_h$ , подсчитанной согласно табл. 6-1, то трансформатор тока удовлетворяет требованиям 10%-ной погрешности.

Задаваясь разными значениями  $I'_{1prac}$ , можно построить кривую 10%-ных погрешностей.

2. Определение допустимой максимальной величины первичного тока.

На вольт-амперной характеристике или на харак-

Таблица 6-2

Определение величин  $I_{\max}$  и  $n$  для защит различных типов

Виды защит	$I_{\max}$	Время действия защиты, сек	$n$
Максимальная токовая с независимой характеристикой и токовая отсечка	$1,1 I_{\text{уст}}$	Любое	1,2—1,3
Максимальная токовая с зависимой характеристикой	Максимальное значение $I_{\text{к.з.}}$ , при котором производится согласование характеристик по времени		
Любые направленные защиты	$I_{\text{к.з.макс}} \text{ в конце I зоны или в конце защищаемого участка}$	$t_{\text{ср}} > 0,5$ $t_{\text{ср}} \leq 0,5$	1,2—1,3 1,8—2
Дифференциальные защиты с БНТ	$I_{\text{к.з.макс}} \text{ при к. з. вне зоны защиты}$	$t_{\text{ср}} \leq 0,5$	1,2—1,3
Дифференциальные защиты без БНТ		$t_{\text{ср}} \leq 0,5$ $t_{\text{ср}} > 0,5$	1,8—2 1,4—1,5
Дифференциально-фазная в. ч. защита	$I_{\text{к.з.макс}} \text{ в месте установки защиты}$	$t_{\text{ср}} < 0,15$	1,6—1,8
Ненаправленная дистанционная защита, не блокируемая при замыканиях на землю	$I_{\text{к.з.макс}} \text{ в конце I зоны}$	$t_{\text{ср}} > 0,5$ $t_{\text{ср}} \leq 0,5$	1,2—1,3 1,4—1,5
Ненаправленная дистанционная защита с блокировкой при замыканиях на землю	$I_{\text{к.з.макс}} \text{ в месте установки}^*$	$t_{\text{ср}} > 0,5$ $t_{\text{ср}} \leq 0,5$	1,2—1,3 1,4—1,5
Любые устройства, не требующие точной трансформации тока	$I_{\min}$ , при котором проверяется работа устройства	Любое	1,2—1,3

\* Во избежание отказа защиты из-за срабатывания блокировки от токов небаланса.

Если  $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{расч}}$ , погрешность трансформатора тока не превышает 10%-ной.

#### Проверка по кривым 10%-ной погрешности

Проверку можно выполнять двумя способами:

1. Определение допустимой величины вторичной нагрузки  $z_{\text{н.доп}}$ .

Подсчитывается кратность  $m$  по выражению

$$m = \frac{I_{\text{расч}}}{dI_{\text{1н}}} \quad (6-25)$$

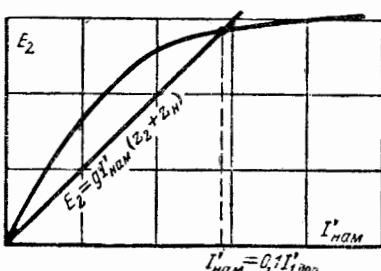


Рис. 6-6. Графическое определение тока намагничивания, соответствующего 10%-ной погрешности.

По кривой 10%-ных погрешностей определяется допустимая внешняя вторичная нагрузка  $z_{\text{н.доп}}$ , соответствующая этой кратности. Если  $z_{\text{н.доп}} \geq z_n$ , погрешность трансформатора тока не превышает 10%-ной.

2. Определение допустимой максимальной величины первичного тока.

По известной величине  $z_n$  по кривой 10%-ной погрешности определяется кратность первичного тока  $m$  и подсчитывается максимальный допустимый ток по выражению

$$I_{\text{доп}} = d m I_{\text{1н}} \quad (6-26)$$

При  $I_{\text{доп}} \geq I_{\text{расч}}$  трансформатор тока отвечает требованиям 10%-ной погрешности.

#### д) Расчетная проверка пригодности трансформаторов тока для релейной защиты при погрешности выше 10% Проверка по величине вторичного тока

Проверка производится при  $I_{\text{расч}}$ , соответствующем условию надежности действия устройства. Целью проверки является вычисление величины вторичного тока для оценки надежности работы устройства.

Проверка ведется по характеристике  $E_2 = f(I'_{\text{нам}})$  при условии совпадения по фазе токов  $I'_1$ ,  $I'_2$  и  $I'_{\text{нам}}$ . Для проверки необходимо:

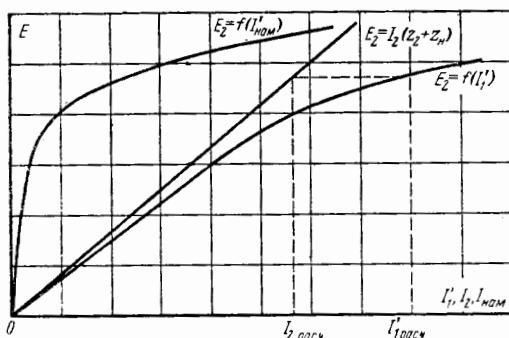


Рис. 6-7. Графическое определение вторичного тока по расчетному значению первичного тока при погрешности трансформатора тока выше 10%-ной.

1) определить  $z_n$  трансформатора тока согласно § 6-2,б; по  $I_{1\text{расч}}$  определить  $I'_{\text{расч}} = \frac{I_{1\text{расч}}}{n_t}$ ;

2) построить характеристику намагничивания с учетом рекомендаций §§ 6-1,в и 6-2,а;

3) на графике характеристики намагничивания построить прямую

$$E_2 = I_2(z_2 + z_n);$$

4) построить на том же графике зависимость  $E_2 = f(I'_1)$ , для чего в нескольких выбранных точках при соответствующем одном значении  $E_2$  определяется  $I'_1$  как сумма токов  $I_2$  (абсцисса построенной прямой) и  $I'_{\text{нам}}$  (абсцисса характеристики намагничивания);

5) определить вторичный ток  $I_{2\text{расч}}$ , соответствующий току  $I'_{1\text{расч}}$ , пользуясь кривой  $E_2 = f(I'_1)$  и прямой  $E_2 = f(I_2)$ , как показано на рис. 6-7.

#### Проверка на 50%-ную погрешность

При работе трансформаторов тока с погрешностью выше 50% возникает искажение формы кривой вторичного тока, которое может вызвать неустранимую вибрацию токовых реле типа ЭТ-520 при кратности тока  $\frac{I_p}{I_{p,\text{уст}}} \geq 3,5$ . Поэтому трансформаторы то-

ка, во вторичные цепи которых включены реле ЭТ-520, должны проверяться на 50%-ную погрешность. Проверка выполняется при выбранном на основе многочисленных опытов условии  $\alpha + \gamma = 30^\circ$ , чему соответствует угол  $60^\circ$  между токами  $I_2$  и  $I'_{\text{нам}}$ . Проверка производится по характеристике намагничивания и заключается в расчете величины  $z_{n,\text{доп}}$ . При этом ток намагничивания подсчитывается по выражению

$$I'_{\text{нам}} = 0,5 I'_{1\text{расч}}. \quad (6-27)$$

Величина допустимой нагрузки определяется выражением

$$z_{n,\text{доп}} = \frac{E_2 - 0,65 I_{1\text{расч}} z_2}{0,65 I'_{1\text{расч}}}. \quad (6-28)$$

### 6-3. РАСЧЕТ ТОКОВ НЕБАЛАНСА В РАЗЛИЧНЫХ СХЕМАХ СОЕДИНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

#### а) Ток небаланса в дифференциальных схемах

Расчет производится для максимального значения тока короткого замыкания вне зоны действия защиты. Принцип расчета заключается в определении величин вторичных токов в каждом плече дифференциальной защиты путем построения зависимости  $I_2 = f(I'_1)$  для каждого плеча. Для упрощения расчета предполагается совпадение по фазе токов  $I'_1$ ,  $I_2$ ,  $I'_{\text{нам}}$  у каждого трансформатора тока. Расчет выполняется по характеристикам  $E_2 = f(I'_{\text{нам}})$ , построенным по вольт-амперным характеристикам. При этом для каждого плеча берется самая низкая характеристика из трех фаз. При применении типовых характеристик необходимо учитывать рекомендации § 6-2,а.

#### Порядок расчета

1. Определяется нагрузка вторичных обмоток трансформаторов тока каждого плеча согласно § 6-2,б и расчетный первичный ток согласно § 6-2,в.

2. Для построения зависимости  $I_2 = f(I'_1)$  задаются несколькими значениями  $I_2$  и подсчитывают соответствующие им величины э. д. с.  $E_2$  по выражению

$$E_2 = I_2(z_2 + z_n).$$

Для каждого из полученных значений  $E_2$  по характеристике намагничивания определяют  $I'_{\text{нам}}$  и, складывая его с  $I_2$ , получают ток  $I'_1$ . Затем по величинам  $I'_1$  и  $I_2$  для каждой точки строят зависимость  $I_2 = f(I'_1)$ . Это построение может быть выполнено графически, как показано на рис. 6-8.

3. По величинам тока короткого замыкания для каждого плеча определяют  $I'_{1\text{расч}} = \frac{I_{2\text{расч}}}{n_t}$  и, пользуясь кривыми  $I_2 = f(I'_1)$ , находят вторичные токи  $I_{2\text{расч}}$  трансформаторов тока:

$$I_{2\text{расч}} = k_{\text{сх}} n_{\text{ат}} I_2, \quad (6-29)$$

где  $k_{\text{сх}}$  — коэффициент схемы.

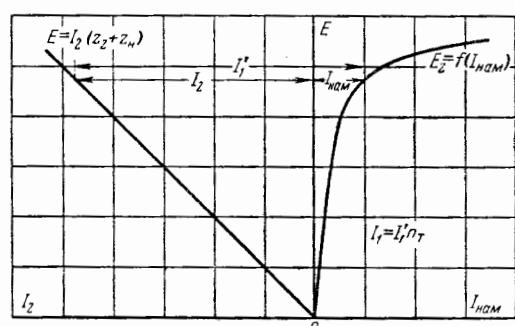


Рис. 6-8. Графическое построение зависимости вторичного тока от первичного  $I_2 = f(I'_1)$ .

При соединении трансформаторов тока в треугольник  $k_{ct} = \sqrt{3}$ . При соединении трансформаторов тока в звезду  $k_{ct} = 1$ .  $n_{at}$  — коэффициент трансформации автотрансформатора. При отсутствии автотрансформатора  $n_{at} = 1$ .

5. Ток небаланса равен:

$$I_{nb} = \pm I'_{2n} \pm I''_{2n} \pm I'''_{2n} \pm I^{IV}_{2n}. \quad (6-30)$$

Знаки плюс и минус перед вторичными токами  $I_{2n}$  должны соответствовать направлению первичных токов в плечах схемы. При направлении первичного тока в зону защиты для соответствующего тока  $I_{2n}$  берется знак плюс. При направлении первичного тока из зоны защиты соответствующий ток  $I_{2n}$  имеет знак минус.

В ряде случаев для расчета токов небаланса может быть применен упрощенный метод, основанный на том, что ток небаланса представляет собой разность токов намагничивания. Исходя из этого, ток небаланса считают равным току намагничивания трансформатора тока одного плеча, где  $I'_{nam}$  — максимальный, и предполагая токи намагничивания в других плечах равными нулю. Ток намагничивания  $I'_{nam}$  определяется из характеристики  $E_2 = f(I'_{nam})$  по величине

$$E_2 = \frac{I_{1\text{расч}}}{n_t} (z_2 + z_n).$$

Ток небаланса равен:

$$I_{nb} = k_{ct} n_{at} I'_{nam}. \quad (6-31)$$

Этот способ дает завышенные величины  $I_{nb}$  и поэтому не всегда применим.

Еще более простой способ, дающий еще более завышенные величины  $I_{nb}$ , заключается в том, что ток намагничивания считают равным 10% величины  $I'_{1\text{расч}}$  (поскольку трансформаторы тока дифференциальной защиты должны отвечать требованию 10%-ной погрешности). В этом случае

$$I_{nb} = k_{ct} n_{at} \cdot 0,1 I'_{1\text{расч}}. \quad (6-32)$$

## б) Ток небаланса в нулевом проводе

При трехфазном коротком замыкании ток небаланса в нулевом проводе представляет собой сумму  $I'_{nam}$  трех фаз, и его можно определить по характеристикам  $E_2 = f(I'_{nam})$ . Для расчета используются характеристики двух фаз (наиболее низкая и наиболее высокая). Расчет производится в следующем порядке:

1. При использовании типовых характеристик намагничивания наиболее низкую характеристику получают, понижая типовую на 20%, как это показано на рис. 6-7, а наиболее высокую строят, повышая аналогичным способом типовую характеристику  $E_2 = f(I'_{nam})$  на 20%.

2. Для каждой из двух характеристик строится согласно рис. 6-7 зависимость  $E_2 = f(I')$  и определяются токи намагничивания  $I_{nam}$  (максимальный  $I'_{nam,\text{макс}}$  и минимальный  $I'_{nam,\text{мин}}$ ) при

$$I'_{1\text{расч}} = \frac{I_1^{(3)} n}{n_t}$$

3. Определяются гармонические составляющие тока намагничивания.<sup>1</sup>

Ток небаланса в нулевом проводе содержит в основном первую и третью гармоники. Ток небаланса первой гармоники подсчитывается по формуле

$$I_{nb} = 0,66 (I'_{nam,\text{макс}} - I'_{nam,\text{мин}}). \quad (6-33)$$

Ток небаланса третьей гармоники определяется по выражению

$$I_{III,nb} = 0,34 (I'_{nam,\text{мин}} + 2I'_{nam,\text{макс}}). \quad (6-34)$$

4. Определяется полный ток небаланса, как

$$I_{nb} = \sqrt{I_{nb}^2 + I_{III,nb}^2}. \quad (6-35)$$

Если рабочие точки находятся за перегибом характеристики  $E_2 = f(I'_{nam})$ , то при отлинии  $I'_{nam,\text{макс}}$  от  $I'_{nam,\text{мин}}$  менее чем в 2 раза можно не учитывать составляющую первой гармоники. Тогда  $I_{nb} = I_{III,nb}$  и подсчитывается по (6-34). Если рабочие точки находятся ниже перегиба кривой  $E_2 = f(I'_{nam})$ , то составляющая третьей гармоники чисто мала и ее учитывать не нужно. В этом случае

$$I_{nb} = I'_{nam,\text{макс}} - I'_{nam,\text{мин}}. \quad (6-36)$$

В ряде случаев, когда отстройка от токов небаланса большой величины не представляет затруднений, для упрощения можно принимать ток небаланса равным предельно высокому значению:

$$I_{nb} = I'_{nam,\text{макс}}. \quad (6-37)$$

При этом ток намагничивания находят по характеристике  $E_2 = f(I'_{nam})$  по величине  $E_2 = \frac{nI^{(3)}}{n_t} (z_2 + z_n)$ .

Расчет тока небаланса в нулевом проводе при двухфазном коротком замыкании может быть выполнен по приведенному выше способу расчета тока небаланса в дифференциальных схемах. При этом каждая фаза должна приниматься за плечо дифференциальной защиты.

## 6-4. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ РАСПРОСТРАНЕННЫХ ТИПОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

### Общие сведения

Типовые кривые намагничивания (рис. 6-9—6-12) представляют собой зависимость э. д. с.  $E'$ , наведенной в одном витке при сечении трансформаторной стали  $1 \text{ см}^2$ , от н. с.  $F$  на  $1 \text{ см}$  магнитного пути, выражаемой в удельных ампер-витках ( $\text{ав}/\text{см}$ ). Величина  $E'$  для удобства пользования кривыми выражена в  $\text{мв}/\text{см}^2$  на виток. Для построения типовых характеристик намагничивания для любого сердечника необходимо по нескольким точкам на типовой кривой намагничивания определить соответствующие величины

<sup>1</sup> Воскресенский А. А., Токи небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока, «Электрические станции», 1950, № 2.

Воскресенский А. А., О выборе трансформаторов тока по кривым кратностей, «Электрические станции», 1957, № 5.

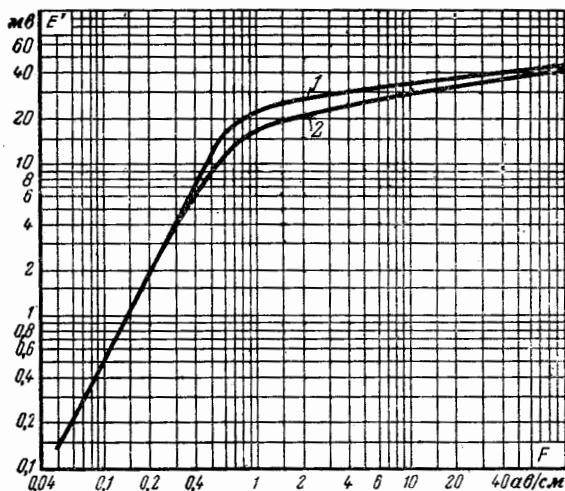


Рис. 6-9. Типовые кривые намагничивания трансформаторной стали для сердечников трансформаторов тока ТПФ-10, ТПФУ-10, ТПФМ-10 класса 0,5, ТФ-10 и ТФУ-10.

1 — сердечники класса Д и 0,5; 2 — сердечники классов З, 1, 3.

з. д. с.  $E_2$  в вольтах и тока намагничивания  $I'_{\text{нам}}$  в амперах, пользуясь выражениями:

$$E_2 = \frac{E'sw}{1,000}; \quad (6-38)$$

$$I'_{\text{нам}} = F \frac{L}{w}, \quad (6-39)$$

где  $s$  — сечение стали сердечника,  $\text{см}^2$ ;

$L$  — средняя длина пути магнитного потока в сердечнике,  $\text{см}$ ;

$w$  — число витков вторичной обмотки.

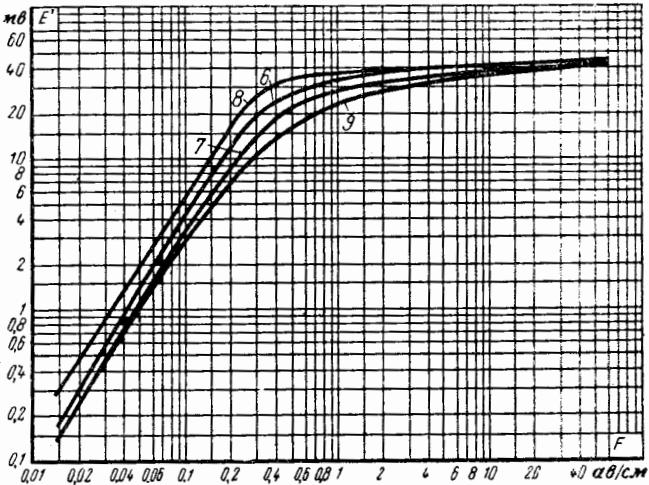
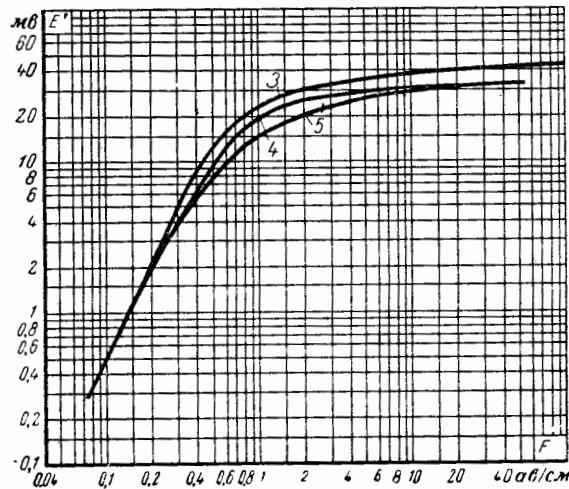


Рис. 6-11. Типовые кривые намагничивания трансформаторной стали для сердечников трансформаторов тока.

6 — сердечники 0,5 ТФН-35, кроме ТФН-35-0,5/3; все сердечники трансформаторов тока ТФНД-110-Д/Д/0,5, ТФНД-154-Д/Д/0,5, ТФНД-220-Д/Д/0,5 и ТФНД-400-Д/Д/Д/0,5; 7 — сердечники ТВ-110, ТВД-110; 8 — сердечники ТВ-35 МКП, ТВД-35 МКП, ТВМ-110, ТВДМ-110, ТВД-220; 9 — сердечники Р и 0,5 трансформаторов тока ТПЛ-10 и ТПОЛ-10.

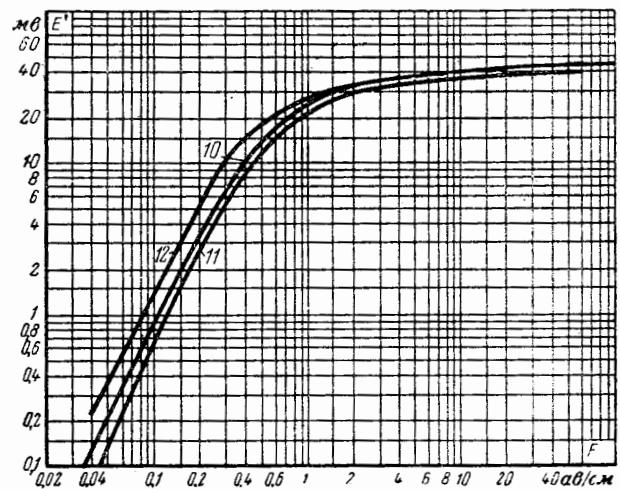


Рис. 6-12. Типовые кривые намагничивания трансформаторной стали для сердечников трансформаторов тока.

10 — сердечники Д и 1 трансформаторов тока ТФНД-110-Д/1; 11 — сердечники класса 1 и 3 ТФН-35 и сердечники ТНД-110; 12 — сердечники ТПФМ-10 классов 1 и 3 сердечники ТВД-35, ТНДМ-110 и ТНДМ-110.

Рис. 6-10. Типовые кривые намагничивания трансформаторной стали для сердечников трансформаторов тока ТПОФ-10, ТПШФ-10, ТПШФ-20, ТВ-35, ТМГД-35, ТН-110, ТВ-274 и ТВД-274, для сердечника Д трансформаторов тока ТФН-35 и для сердечника 0,5 ТФН-35-0,5/3.

3 — сердечники Д, ТМГД-35, сердечник Д для ТФН-35 и сердечник 0,5 для ТФН-35-0,5/3; 4 — сердечники 0,5 и 1; 5 — сердечники 3, 3 и ТВ-35, ТН-110, ТВ-274, ТВД-274.

## а) Трансформаторы тока ТПФ-10

## 1. Трансформаторы тока с сердечниками классов Д и З

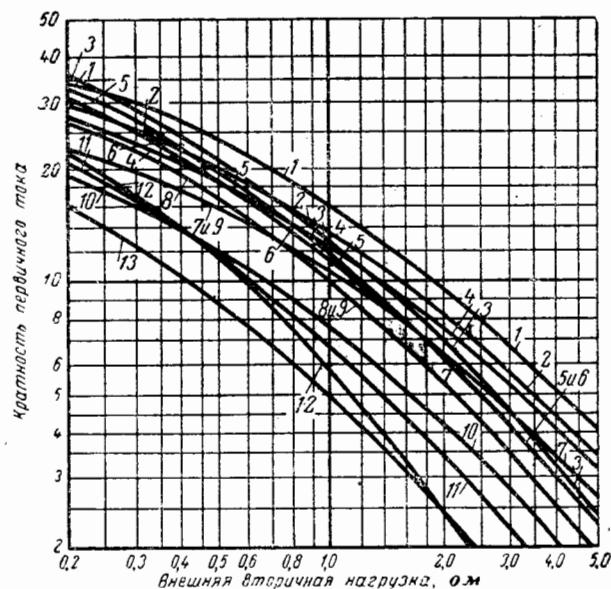
Тип	Варианты исполнения						
	Д З	3/Д	Д/Д 3/0,5	—	Д/0,5 3/3	—	Д/3
ТПФД-10							
ТПФЗ-10							
ТПФЗД-10							

## Параметры вторичных обмоток

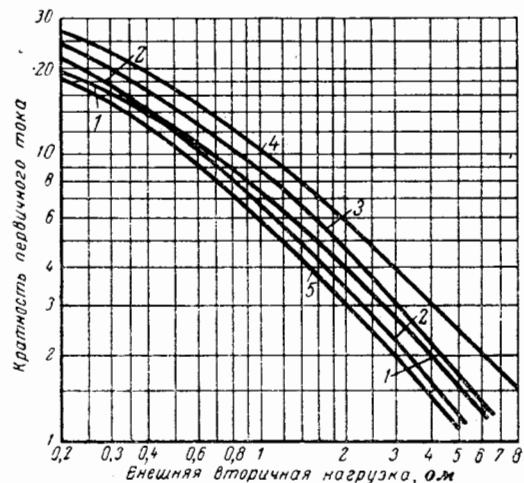
$n_T$	Классы сердечника Д и З				Классы сердечника 0,5 и 3				
	W	r	x	z	w_{0,5}	w_3	r	x	z
75/5	172,5				179	177			
100/5	170	0,41			179	177			
150/5	165		0,41	0,58	179	177	0,3	0,3	0,43
200/5	140	0,19			159	157			
300/5	150		0,19	0,27	179	177			
400/5	120				159	157			

## Параметры сердечников

Класс сердечника	Д	З	0,5	3
$s, \text{ см}^2$	20,4	20,4	10,2	10,2
$L, \text{ см}$	43	43	43	43
Номер кривой намагничивания на рис. 6-9	1	2	1	2



a)

Рис. 6-13. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока.  
а — ТПФ-10 и ТПФУ-10; б — ТПФМ-10.

б)

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-13, а, соответствующие разным  $n_t$

Класс сердечника	Д и З				0,5		3	
$n_t$	75/5, 100/5, 150/5	200/5	300/5	400/5	75/5, 100/5, 150/5, 300/5	200/5, 400/5	75/5 100/5 150/5, 300/5	200/5 400/5
№ кривой	1	4	2	7	9	10	10	11

## 2. Трансформаторы тока с сердечниками классов 0,5—3

### Параметры вторичных обмоток

$n_t$	Варианты исполнения							
	0,5; 0,5/0,5; 0,5/3				1; 1/1; 1/3; 3			
	w	r	x	z	w	r	x	z
5-7,5-15-30/5	156				120			
10-20-40-200/5	160	0,3	0,3	0,43	120	0,2	0,15	0,25
50-75-100-150-300/5	180				120			
400/5	160				160	0,3	0,3	0,43

### Параметры сердечников

Класс сердечника	0,5	1	3
$s, \text{ см}^2$	10,2	10,2	10,2
$L, \text{ см}$	43	43	43
Номер кривой намагничивания на рис. 6-9	1	2	2

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-13, а, соответствующие разным  $n_t$

Класс сердечника	0,5		1		3		
Вариант исполнения	Все		Все		0,5/3		1/3,3
$n_t$	5—7,5— 10—15— 20—30— 40/5	50—75— 100—150/5	5—7,5—10— —15—20—30— 40—50—75— 100—150—200— 300/5	400/5	50—75— 100—150/5	5—7,5— 10—15— 30—40/5	5—7,5—10— 15—20—30— 40—50—75— 100—150—200— 300—400/5
№ кривой	10	9	11	10	10	11	10

## б) Трансформаторы тока ТПФУ-10

### 3. Трансформаторы тока с сердечниками классов Д и З

Тип	Варианты исполнения					
ТПФУД-10	Д	Д/Д	Д/0,5	Д/1	Д/3	
ТПФУЗ-10	З	3/0,5	3/1	3/3		
ТПФУЗД-10	З/Д	—	—	—	—	

## Параметры вторичных обмоток

$n_t$	Класс сердечника									
	Д и З				0,5, 1 и 3					
	$w$	$r$	$x$	$z$	$w_{0,5}$	$w_1$	$w_3$	$r$	$x$	$z$
75/5	112,5									
100/5	110									
150/5	105	0,19	0,19	0,27	119	118,5	117	0,2	0,15	0,25
200/5	100									
300/5	90									

## Параметры сердечников

Класс сердечника	Д	З	0,5	1	3
$s, \text{ см}^2$	20,4	20,4	10,2	10,2	10,2
$L, \text{ см}$	43	43	43	43	43
Номер кривой намагничивания на рис. 6-9	1	2	1	2	2

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-13, а, соответствующие разным  $n_t$ 

Сердечники	Д и З				0,5; 1; 3
$n_t$	75/5 100/5	150/5	200/5	300/5	75/5; 100/5; 150/5 200/5; 300/5
Номер кривой	3	5	6	8	11

## 4. Трансформаторы тока с сердечниками классов 0,5—3

## Параметры вторичных обмоток

$n_t$	Варианты исполнения: 0,5; 0,5/0,5; 0,5/1; 0,5/3		Варианты исполнения 1; 1/1; 1/3			Вариант исполнения 3	
	$w$	$r, x, z$	$w_1$	$w_3$	$r, x, z$	$w$	$r, x, z$
5/5			103,5	102		57,5	
7,5/5			106,5	105		57	
10/5			104,5	103		57	
15/5			103,5	102		56,5	
20/5			102,5	101		56	
30/5					$r=0,2$	55	$r=0,1$
40/5	$w_{0,5}=119$	$r=0,2$				58	$x=0,1$
50/5	$w_1=118,5$	$x=0,15$	118,5	117	$x=0,15$	63	$z=0,14$
75/5					$z=0,25$	67,5	
100/5						68	
150/5						73,5	
200/5						58	
300/5	$w_3=117$	$z=0,25$					

## Параметры сердечников

Класс сердечника	0,5	1	3
Варианты исполнения			
$s, \text{ см}^2$	Все	Все	0,5/3, 1/3
$L, \text{ см}$	10,2	10,2	10,2
Номер кривой намагничивания на рис. 6-9	43	43	43
	1	2	2

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-13, а, соответствующие разным  $n_t$

Класс сердечника	0,5	1	3		
Варианты исполнения	Все	Все	1/3		3
$n_t$	30—40—50— 75—100— 150—200— 300/5	5—7,5— 10—15— 20/5	30—40—50—75— 100—150—200— —300/5	5—7,5— 10—15— 20/5	30—40—50— 75—100—150— 200—300/5
Номер кривой	11	13	11	13	11

### в) Трансформаторы тока типа ТПФМ-10

Параметры вторичных обмоток

$n_t$	Класс сердечника			
	0,5 и 1	3	0,5 и 1	3
	$w$		$z$	
5—300/5 400/5	119 159	116 155	0,25 0,4	0,2 0,2

Параметры сердечников

$n_t$	0,5 и 1	3	0,5; 1; 3	0,5	1 и 3
	$s$	$L$	Номер кривой намагничивания		
5—300/5 400/5	10,2 10,2	7,3 5,1	43 43	1 на рис. 6-9	12 на рис. 6—12

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-13, б, соответствующие разным  $n_t$

Класс сердечника	0,5		1		3
$n_t$	5-300/5	400/5	5-300/5	400/5	5-300/5 400/5
Номер кривой	2	1	3	4	5

### г) Трансформаторы тока ТФ-10

Параметры вторичных обмоток

$n_t$	D	3 и 0,5	1	3	D, 3 и 0,5			1 и 3		
	$w$	$r$	$x$	$z$	$r$	$x$	$z$	$r$	$x$	$z$
15—30—50—75—100—150—300/5	178	178,5	177,5	177	0,28	0,5	0,57	0,25	0,4	0,47
20—40—200—400/5	158	158,5	157,5	157	0,25	0,4	0,47	0,23	0,4	0,46
600/5	119	119	118,5	117	0,21	0,2	0,29	0,18	0,2	0,27

Параметры сердечников

Класс сердечника	Д и 0,5		3		1 и 3		
$n_t$	15/5—400/5	600/5	15/5—400/5	600/5	15/5—400/5	600/5	15/5—400/5
$s, \text{ см}^2$	11,8	19,7	11,8	19,7	7,9	11,8	7,9
$L, \text{ см}$	51,5	51,5	51,5	51,5	51,5	51,5	51,5
Номер кривой намагничивания на рис. 6-9	1	1	2	2	2	2	2

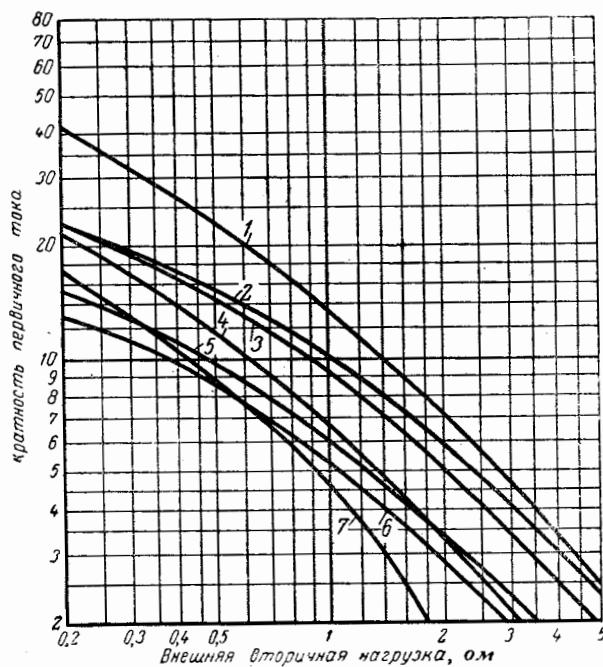


Рис. 6-14. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТФ-10 и ТФУ-10.

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-14, соответствующие разным  $n_t$

$n_t$	15—30—50—75—100— 150—300/5	20—40—200—400/5	600/5
Класс сердечника Номер кривой	Д и 0,5 2	1 и 3 5	Д и 0,5 3

д) Трансформаторы тока ТФУ-10  
Параметры вторичных обмоток

Исполнения 3 и 3/3					Все исполнения, кроме 3 и 3/3					
$n_t$	$w$	$r$	$x$	$z$	$n_t$	Класс сердечника	$w$	$r$	$x$	$z$
15—20—30—50— 75—100—150/5	58	0,22	0,05	0,225	15—20—30— 40—50—75— 100—150—	Д 3	119	0,21	0,2	0,29
40/5	62				200—300/5	1 3	118,5 117	0,18	0,2	0,27

Параметры сердечников

Класс сердечника	Все исполнения, кроме 3 и 3/3				Исполнения 3 и 3/3
	Д	З	1	3	
$s, \text{ см}^2$ $L, \text{ см}$ Номер кривой намагничивания на рис. 6-9	19,7 51,5 1	19,7 51,5 2	11,8 51,5 2	11,8 51,5 2	19,7 51,5 2

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-14, соответствующие разным  $n_t$

Все исполнения, кроме 3 и 3/3					Исполнения 3 и 3/3	
$n_t$	15/5—300/5				15/5—150/5	
Класс сердечника	Д и 0,5				1 и 3	3
Номер кривой	1				4	7

**е) Трансформаторы типа ТПОФ-10**  
Параметры вторичных обмоток

$n_t$	$\omega$					$z=r(x=0)$				
	Класс сердечника					Класс сердечника				
	Д	З	0,5	1	3	Д	З	0,5	1	3
400/5	—	—	—	79	77	—	—	—	0,2	0,15
600/5	120	120	119,5	119	116	0,3	0,3	0,36	0,27	0,19
750/5	150	150	150	149	146	0,34	0,34	0,35	0,27	0,23
1 000/5	200	200	199	198	195	0,38	0,38	0,38	0,3	0,26
1 500/5	300	—	299	—	285	0,46	—	0,42	—	0,37
1 500/10	—	150	—	—	—	0,18	—	—	—	—

Параметры сердечников

Класс сердечника	$L, \text{ см}$	$s, \text{ см}^2$						Номер кривой намагничивания на рис. 6-10
		400/5	600/5	750/5	1 000/5	1 500/5	1 500/10	
Д	—	—	36,3	32,4	24,2	16,2	—	3
З	—	—	36,3	32,4	24,2	—	24,2	5
0,5	55,8	—	48,4	32,4	24,2	12,1	—	4
1	—	40,4	24,2	16,2	12,1	—	—	4
3	24,2	12,1	12,1	8,1	8,1	—	—	5

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-15, соответствующие разным  $n_t$

Класс сердечника	$n_t$					
	400/5	600/5	750/5	1 000/5	1 500/5	1 500/10
Д	—	2	1	1	1	—
З	—	4	3	3	—	10
0,5	—	1	3	3	6	—
1	5	7	8	8	—	—
3	11	14	12	13	9	—

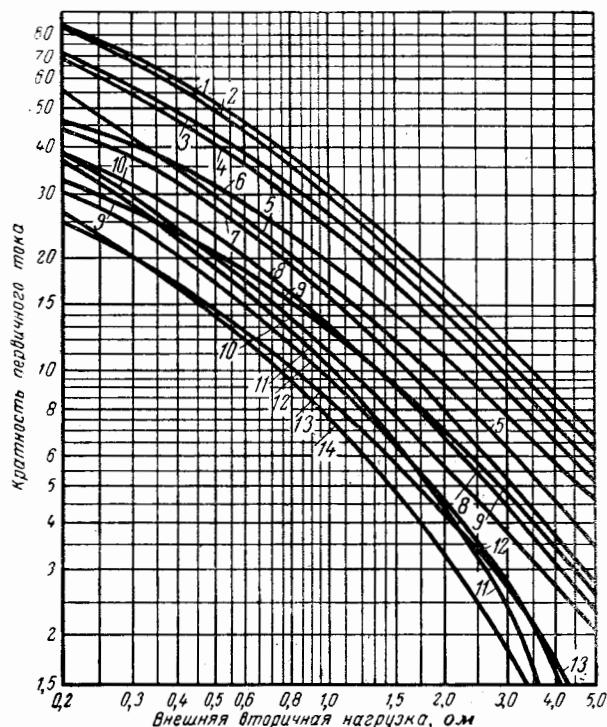


Рис. 6-15. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТПОФ-10.

## ж) Трансформаторы тока ТПЛ-10; исполнения: Р и 0,5/Р

## Параметры вторичных обмоток

$n_t$	$w$	$r^*$	$x^*$	$z^*$
5—7,5—10—15—20—30—40—50—75—100—150— —200—300/5 400/5	119	0,2	0,15	0,25
	159	0,3	0,3	0,43

\* Величины  $r$ ,  $x$  и  $z$ —ориентировочные.

## Параметры сердечников

Класс сердечника	$s, \text{ см}^2$	$L, \text{ см}$	Номер кривой намагничивания на рис. 6-11
P 0,5	7,85 12,6	40 40	9

Кривые 10%-ных погрешностей для сердечников Р приведены на рис. 6-16 для  $n_t$  от 5/5 до 400/5 (кривая 1)

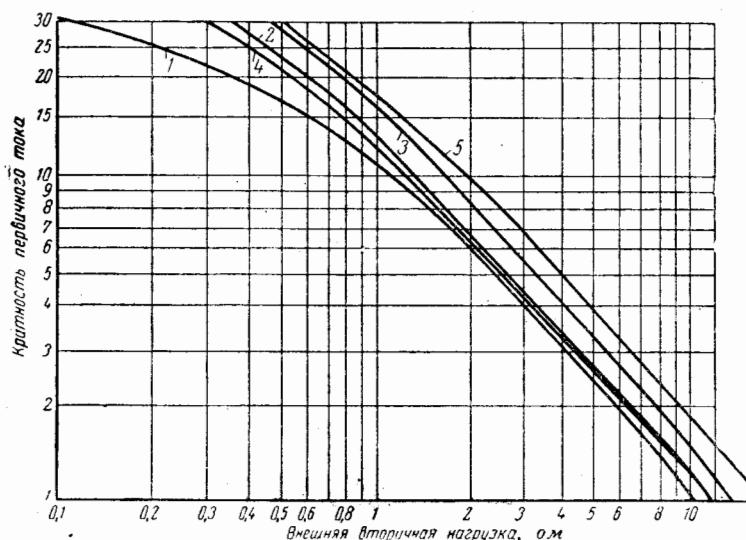


Рис. 6-16. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТПЛ-10 и ТПОЛ-10.

## з) Трансформаторы тока ТПОЛ-10

## Параметры вторичных обмоток

$n_t$	$w$	$z=r (x=0)$	
		P	0,5
600/5	120	0,21	0,18
800/5	160	0,27	0,19
1 000/5	200	0,26	0,21
1 500/5	300	0,37	0,3

## Параметры сердечников

Класс сердечника	$s, \text{ см}^2$				$L, \text{ см}$	Номер кривой намагничивания на рис. 6-11
	600/5	800/5	1 000/5	1 500/5		
P 0,5	14,17 8,1	14,17 6,07	8,1 6,07	8,1 6,07	33,8	9

Номера кривых 10%-ных погрешностей для сердечников класса на рис. 6-16, соответствующие разным  $n_t$

$n_t$	600/5	800/5	1 000/5	1 500/5
Номер кривой	2	3	4	5

### и) Трансформаторы тока ТПШФ-10 и ТПШФ-20

#### Параметры вторичных обмоток

##### Классы сердечников Д и З

$I_{\text{ном}}, \text{a}$	$U_{\text{ном}}, \text{kV}$	Д				З			
		$w$	$r$	$x$	$z$	$w$	$r$	$x$	$z$
2 000	<u>10</u> — 20	398	0,69	0,61	0,92	200	0,18	0,15	0,23
3 000	<u>10</u> — 20	597	0,87	0,75	1,15	300	0,24	0,19	0,31
4 000	<u>10</u> — 20	<u>797</u> 796	0,72	0,7	1	400	0,27	0,25	0,37
5 000	<u>10</u> — 20	996	0,7	0,85	1,1	500	0,28	0,3	0,41
6 000	20	1 196	1,04	1	1,44	—	—	—	—

##### Классы сердечников 0,5 и 3

$I_{\text{ном}}, \text{a}$	$U_{\text{ном}}, \text{kV}$	0,5				3			
		$w$	$r$	$x$	$z$	$w$	$r$	$x$	$z$
2 000	<u>10</u> — 20	398	0,59	0,61	0,86	<u>393</u> 395	0,3	0,3	0,42
3 000	<u>10</u> — 20	597	0,75	0,75	1,06	<u>593</u> 595	0,46	0,4	0,6
4 000	<u>10</u> — 20	<u>797</u> 795	0,56	0,7	0,9	790	0,5	0,4	0,64
5 000	<u>10</u> — 20	996	0,7	0,85	1,1	990	0,62	0,55	0,81
6 000	20	1 196	0,9	1	1,35	—	—	—	—

Номинальный вторичный ток сердечника класса З 10 а, остальных сердечников 5 а.

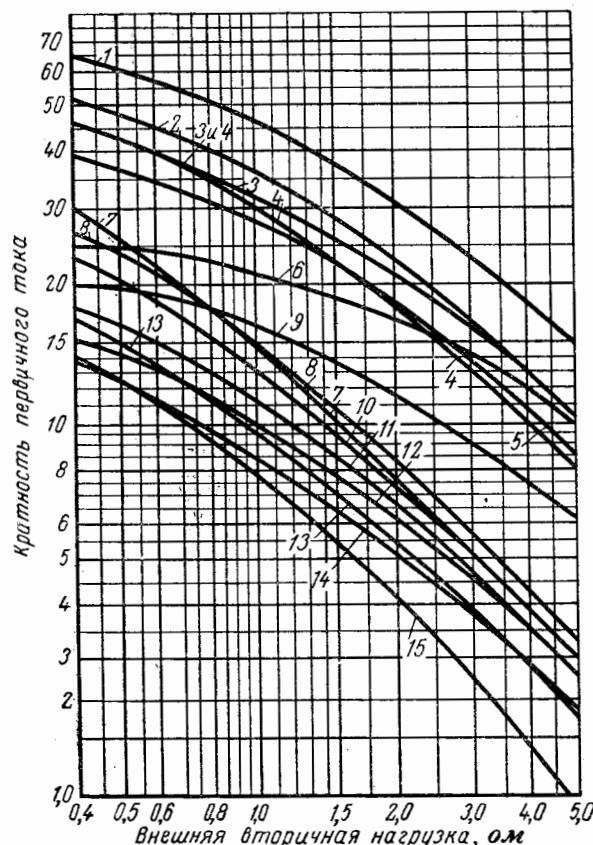
#### Параметры сердечников

##### Классы сердечников Д и З

$I_{\text{ном}}, \text{a}$	$U_{\text{ном}}, \text{kV}$	Д			З		
		$s$	$L$	Номер кривой намагничивания на рис. 6-10	$s$	$L$	Номер кривой намагничивания на рис. 6-10
2 000	<u>10</u> — 20	<u>24</u> 30	<u>91</u> 97		<u>24</u> 30	<u>91</u> 97	
3 000	<u>10</u> — 20	<u>18</u> 23	<u>91</u> 97		<u>18</u> 23	<u>91</u> 97	
4 000	<u>10</u> — 20	<u>12</u> 12,7	107	3	<u>12</u> 12,7	107	5
5 000	<u>10</u> — 20	<u>7,2</u> 7,6	107		<u>7,2</u> 7,6	107	
6 000	20	6	108		—	—	

Классы сердечников 0,5 и 3  
Продолжение таблицы

$I_{1\text{ном}}, \text{а}$	$U_{1\text{ном}}, \text{кВ}$	0,5			3		
		$s$	$L$	Номер кривой намагничивания на рис. 6-10	$s$	$L$	Номер кривой намагничивания на рис. 6-10
2 000	10	18	91	4	4	83	
	20	23	97		5,1	93	
	10	12	91		4	83	5
	20	23	97		5,1	93	
	10	7,2			2,4	102	
	20	7,6	107		2,5		
	10	7,2	107		2,4	102	
	20	7,6			2,5		
	6 000	20	4		—	—	
			108				



Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-17, соответствующие разным  $I_{1\text{н}}$

Класс сердечника	$I_{1\text{н}}$				
	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
Д	1	1	1	3	6
З	7	8	10	13	—
0,5	4	5	2	5	9
3	15	11	14	12	—

к) Трансформаторы тока ТФН-35  
1) Исполнения ТФНД-35 Д/0,5; ТФНУД-35 Д/0,5 и ТФНУ-35 0,5/1

#### Параметры вторичных обмоток

$n_T$	Класс сердечника				0,5			
	Д и 1*		0,5		$w$	$r$	$x$	$z$
От 15/5 по 600/5	238	0,47	0,3	0,56	239	0,4	0,25	0,47
750/5	298	0,6	0,3	0,67	299	0,5	0,3	0,58
1 000/5	397	0,8	0,5	0,95	399	0,62	0,35	0,71

Рис. 6-17. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТПШФ-10 и ТПШФ-20.

#### Параметры сердечников

Класс сердечника	Д	0,5		1*
$n_T$ , $\text{см}^2$	$15/5 \div 1 000/5$	$15/5 \div 750/5$	$1 000/5$	$15/5 \div 600/5$
$s$ , $\text{см}^2$	25,5	13	8	25,5
$L$ , $\text{см}$	77	45,5	48	77
Номер кривой намагничивания	3 на рис. 6-10	6 на рис. 6-11	11 на рис. 6-12	

\* Для сердечника 1  $n_T = 15/5 - 600/5$ .

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-18, соответствующие разным  $n_t$

Класс сердечника	Д			0,5			1
$n_t$	15/5÷600/5 3	750/5 2	1 000/5 1	15/5÷600/5 5	750/5 4	1 000/5 6	15/5÷600/5 3

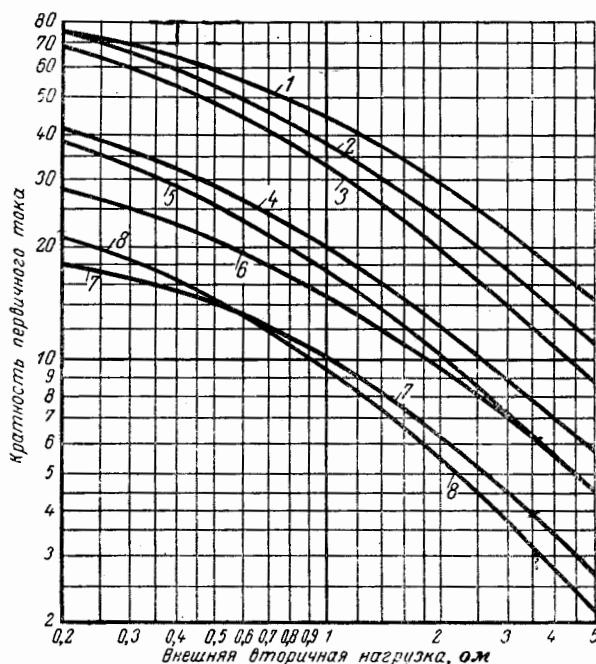


Рис. 6-18. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТФН-35.

## 2) Исполнение ТФН-35 0,5/3

### Параметры вторичных обмоток

$n_t$	Класс сердечника							
	0,5				3			
	w	r	x	z	w	r	x	z
15—30—50—150—300—750/5	299	0,6	0,3	0,67	295	0,44	0,3	0,53
40—200—400/5	319	0,65	0,35	0,74	315	0,48	0,34	0,59
600/5	359	0,73	0,44	0,85	355	0,54	0,44	0,7
1 000/5	398	0,75	0,5	0,9	396	0,8	0,44	0,92

### Параметры сердечников

Класс сердечника	0,5			3
$n_t$ , см <sup>2</sup>	15/5÷750/5 28,7	1 000/5 24	15/5÷1 000/5 6,4	
L, см	53,5	55,5	85	

Кривая намагничивания

3 на рис. 6-10

11 на рис. 6-12

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-18, соответствующие разным  $n_t$

Класс сердечника	0,5			3		
$n_t$	15/5 ÷ 400/5 2	600/5 1	750/5 и 1 000/5 2	15/5 ÷ 600/5 7	750/5 и 1 000/5 8	
Номер кривой						

### л) Трансформаторы тока ТВ-35 и ТВД-35

#### Параметры вторичных обмоток

$n_t$	50/2,5*	75/2,5*	100/2,5*	150/5	200/5	300/5	400/5	600/5
Исполнение по $I_{1n}$ , а	50—150	50—150	50—150 100—300	50—150 100—300	100—300 200—600	100—300 200—600	200—600	200—600
$w$	18	28	38	28	39	58	79	119
$r$	0,06	0,1	0,12	0,12	0,1	0,14	0,14	0,25
$x$	0,1	0,1	0,1	0,16	0,15	0,2	0,2	0,1
$z$	0,116	0,142	0,156	0,2	0,14	0,17	0,24	0,27

\* Трансформаторы тока включаются по два параллельно. Число витков и величины  $r$ ,  $x$ ,  $z$  даны для каждого отдельного трансформатора тока.

#### Параметры сердечников

Класс сердечника	$s$ , см <sup>2</sup>	$L$ , см	Номер кривой намагничивания
ТВД ТВ	34 34	41 41	12 на рис. 6-12 5 на рис. 6-10

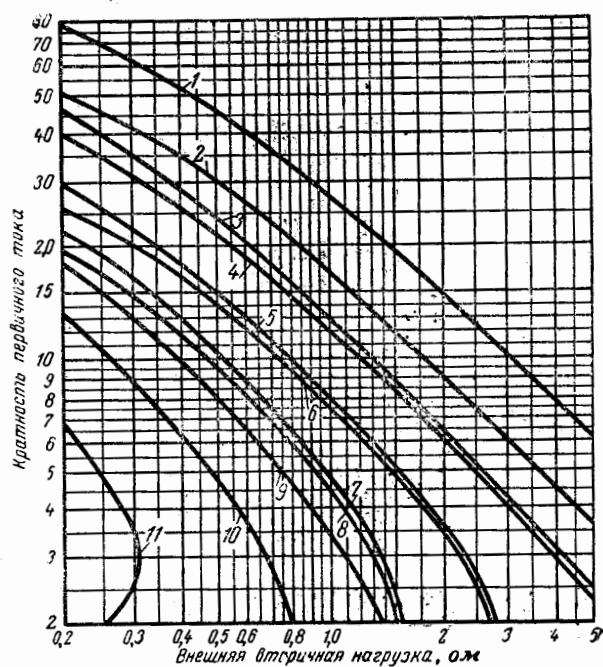


Рис. 6-19. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТВД-35.

Номера кривых 10%-ных погрешностей для сердечников ТВД на рис. 6-19, соответствующие разным  $I_{1n}$

$I_{1n}$	50	75	100	150	200	300	400	600
Вариант исполнения	50—150	50—150 100—300	50—150	100—300	200—600	100—300	200—600	
Номер кривой	11	10	9	7	8	5	6	4

Номера кривых 10%-ных погрешностей для сердечников ТВ на рис. 6-20, соответствующие разным  $I_{1n}$

$I_{1n}$	75	100	150	200	300	400	600
Вариант исполнения	50—150	50—150 100—300	50—150	100—300	200—600	100—300	200—600
Номер кривой	10	9	7	8	5	6	4

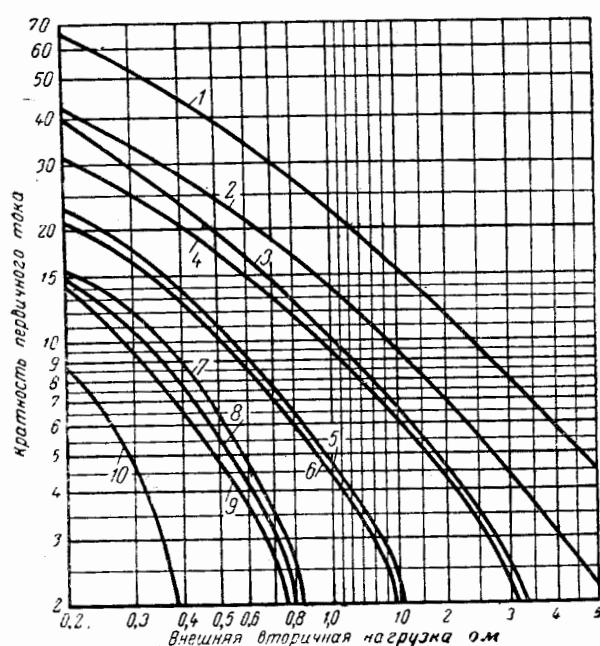


Рис. 6-20. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТВ-35.

### м) Трансформаторы тока ТВ-35 МКП и ТВД-35 МКП

Параметры вторичных обмоток

$n_T$	Вариант исполнения по $I_{1n}$	$w$	$r$	$x$	$z$
75/5	75—200	14	0,02	0,1	0,102
	75—200		0,026	0,1	0,104
100/5	100—300	19	0,026	0,15	0,15
	75—200		0,04	0,15	0,16
150/5	100—300	29	0,05	0,1	0,11
	75—200		0,05	0,15	0,16
200/5	100—300	39	0,05	0,2	0,21
	200—600		0,05	0,2	0,21
300/5	100—300	59	0,07	0,1	0,12
	200—600		0,07	0,3	0,31
400/5	200—600	79	0,095	0,3	0,32
	200—600		0,142	0,1	0,17
600/5	600—1 500	120	0,185	0,4	0,45
	600—1 500		0,245	0,1	0,27
750/5	600—1 500	150	0,326	0,6	0,68
	600—1 500		0,495	0,1	0,51
1 000/5	600—1 500	200			
1 500/5	600—1 500	300			

### Параметры сердечников ТВД и ТВ

$s = 32,3 \text{ см}^2$

$L = 50 \text{ см}$

кривая намагничивания 8 на рис. 6-11

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-21, соответствующие разным  $n_T$

$n_T$	Вариант исполнения	Номер кривой	$n_T$	Вариант исполнения	Номер кривой
100/5	75—200	13	300/5	100—300	7
	100—300	14		200—600	8
	75—200			200—600	6
150/5	100—300	12	400/5	200—600	4
	75—200	9		600—1 500	5
				600—1 500	3
200/5	100—300	10	750/5	600—1 500	2
	75—200	11		1 000/5	1
	200—600	—		1 500/5	

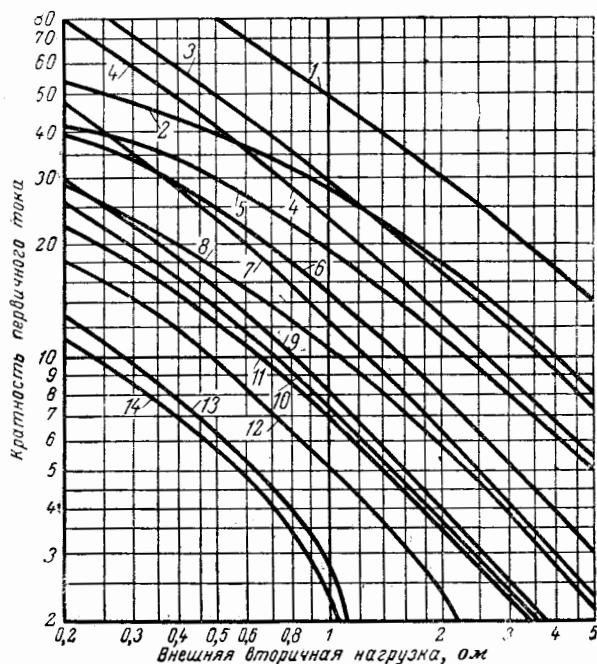


Рис. 6-21. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТВД-35-МКП и ТВ-35МКП.

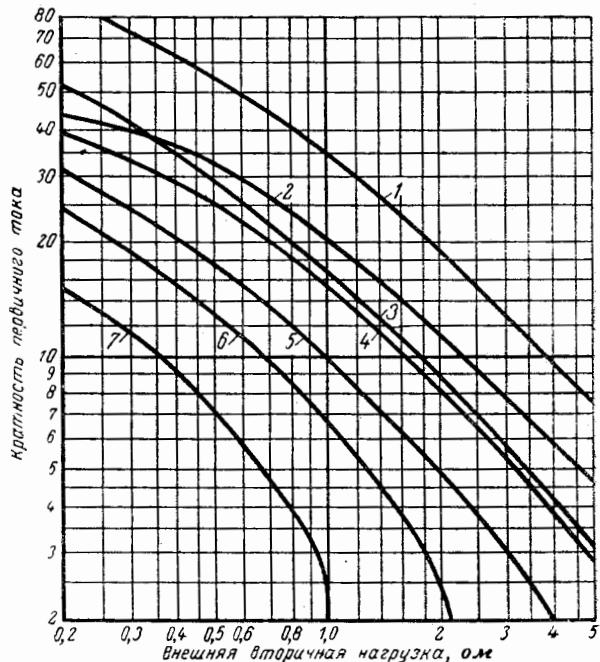


Рис. 6-22. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТМГД-35.

### в) Трансформаторы тока ТМГД-35

Параметры вторичных обмоток

$n_T$	100/5	150/5	200/5		300/5		400/5	600/5
Вариант исполнения по $I_{1n}$	100÷300		100÷300	200÷600	100÷300	200÷600		200÷600
$w$	20	30		40		60	80	120
$z$		0,18		0,18		0,18	0,18	0,3

Параметры сердечников

$$s=48 \text{ см}^2$$

$$L=56,5 \text{ см}$$

кривая намагничивания 3 на рис. 6-10

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-22, соответствующих разным  $n_T$

$n_T$	100/5	150/5	200/5		300/5		400/5	600/5
Вариант исполнения	100÷300		100÷300	200÷600	100÷300	200÷600		200÷600
Номер кривой	7	6		5	3	4	2	1

## о) Трансформаторы тока ТФНД-110

1) С номинальным первичным током до 600 а  
Параметры вторичных обмоток

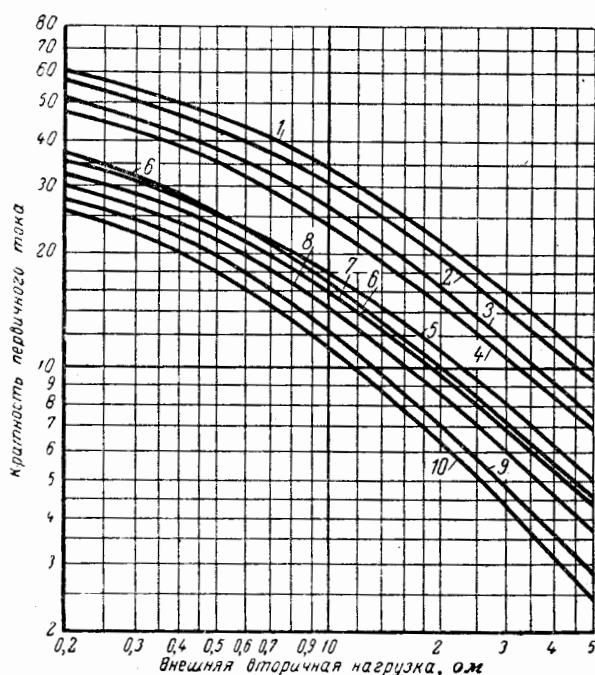
$n_t$	w	Исполнение Д/1				Исполнение Д/Д/0,5			
		Класс сердечника	r	x	z	Класс сердечника	r	x	z
50÷100/5; 75÷150/5 100÷200/5; 150÷300/5 300÷600/5	359	Д	0,6	0,5	0,78	$\Delta_1$	0,46	0,5	0,68
		1	0,45	0,5	0,67	$\Delta_2$	0,38	0,4	0,55
200÷400/5	319	Д	0,55	0,5	0,75	$\Delta_1$	0,4	0,5	0,65
		1	0,4	0,5	0,64	$\Delta_2$	0,34	0,4	0,53

## Параметры сердечников

Исполнение	Д/1			Д/Д/0,5		
	Д	1	80	13,8	8,3	0,5
Класс сердечника $s, \text{ см}^2$ $L, \text{ см}$	18,7	9,35	80	93,5	93,5	5,3
Номер кривой намагничивания	10 на рис. 6-12			6 на рис. 6-11		66,8

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-23, соответствующие разным  $n_t$ 

Исполнение	Д/1				Д/Д/0,5			
	$n_t$	Все, кроме 200—400/5	200—400/5	Все, кроме 200—400/5	200—400/5			
Класс сердечника	Д	1	5	Д	2	1	Д <sub>1</sub>	Д <sub>2</sub>
Номер кривой				2	7	6	3	9

Рис. 6-23. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТФНД-110 с  $I_{1\text{ном}}$  до 600 а.

## 2) С номинальным первичным током от 750 а до 2000 а; исполнение Д/Д/0,5

## Параметры вторичных обмоток

$n_T$	$w$	Класс сердечника	$r$	$x$	$z$
750—1 500/5	299 299	Д 0,5	0,6 0,5	0,6 0,3	0,85 0,58
Ответвление 600—1 200/5	239	0,5	0,4	0	0,4
750—1 500/1	1 495 1 495	Д 0,5	8,2 6,55	15 7	17,1 9,57
Ответвление 600—1 200/1	1 198	0,5	5,25	0	5,25
1 000—2 000/5	399 399	Д 0,5	0,8 0,6	1,2 0,4	1,44 0,72
Ответвление 750—1 500/5	299	0,5	0,5	0	0,5
1 000—2 000/1	1 994	Д 0,5	11 8,8	30 10	31,9 13,3
Ответвление 750—1 500/1	1 495	0,5	6,3	0	6,3

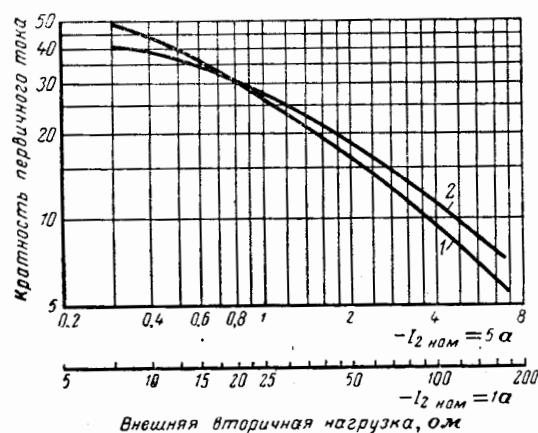


Рис. 6-24. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТФНД-110 с  $I_{\text{ном}}$  до 2000 а.

## п) Трансформаторы тока ТВ-110, ТВД-110, ТН-110 и ТНД-110

## Параметры вторичных обмоток

Варианты исполнения по $I_{\text{1н}}$	75—200				100—300			
	75/5	100/5	150/5	200/5	100/5	150/5	200/5	300/5
$n_T$								
$w$	15	19	30	39	10	30	39	59
$r$	0,03	0,043	0,064	0,086	0,043	0,064	0,086	0,128
$x$	0,15	0,15	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1
$z$	0,153	0,156	0,21	0,132	0,204	0,21	0,22	0,16

Варианты исполнения по $I_{1N}$	200—600					400—1 000			
	$n_t$	200/5	300/5	400/5	600/5	400/5	600/5	750/5	1 000/5
$w$	40	60	80	120	79	119	150	200	
$r$	0,086	0,128	0,17	0,26	0,17	0,26	0,33	0,44	
$x$	0,3	0,3	0,3	0,1	0,6	0,8	0,7	0,1	
$z$	0,31	0,326	0,344	0,28	0,62	0,84	0,77	0,45	

## Параметры сердечников

Класс сердечника	ТВ и ТВД	ТНД	ТН
$s, \text{ см}^2$	83	83	83
$L, \text{ см}$	150	150	150
Номер кривой намагничивания	7 на рис. 6-11	11 на рис. 6-12	5 на рис. 6-10

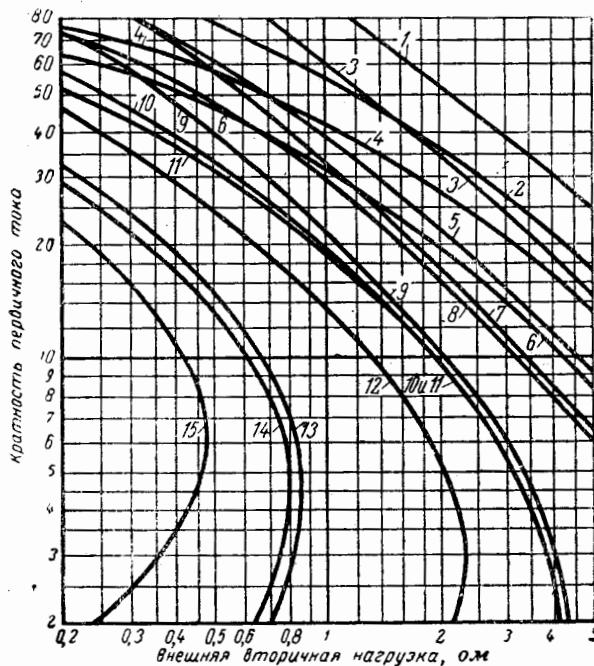


Рис. 6-25. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТВД-110 и ТВ-110.

Номера кривых 10%-ных погрешностей для сердечников ТВ и ТВД на рис. 6-25, соответствующие разным  $n_t$ .

$n_t$	75/5	100/5	150/5	200/5
Исполнение	75—200	100—300	75—200	100—300 200—600
Номер кривой	15   13	14	12	9   10   11
$n_t$	300/5	400/5	600/5	750/5   1 000/5
Исполнение	100—300	300—600	400—1 000	300—600   400—1 000
Номер кривой	7   8	5	6   4	3   2   1

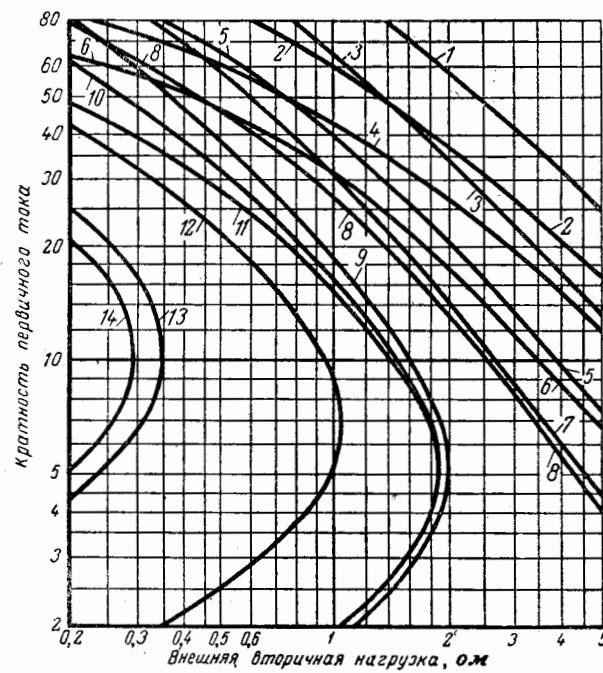


Рис. 6-26. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТНД-110.

Номера кривых 10%-ных погрешностей для сердечников ТНД на рис. 6-26, соответствующие разным  $n_t$

$n_t$	100/5		150/5		200/5		
Исполнение	75—200		100—300		75—200		100—300 200—600
Номер кривой	13	14	12	9	10	11	
$n_t$	300/5		400/5		600/5		750/5 1 000/5
Исполнение	100—300		300—600		400—1 000		300—600 400—1 000
Номер кривой	7	8	5	6	4	3	2 1

Номера кривых 10%-ных погрешностей для сердечников ТН на рис. 6-27, соответствующие разным  $n_t$

$n_t$	150/5		200/5				300/5	
Исполнение	75—200 100—300		75—200		200—600		100—300	
Номер кривой	12	9	11	10	7	8		
$n_t$	400/5		600/5		750/5		1 000/5	
Исполнение	400—1 000		200—600		400—1 000			
Номер кривой	6	5	3	4	2	1		

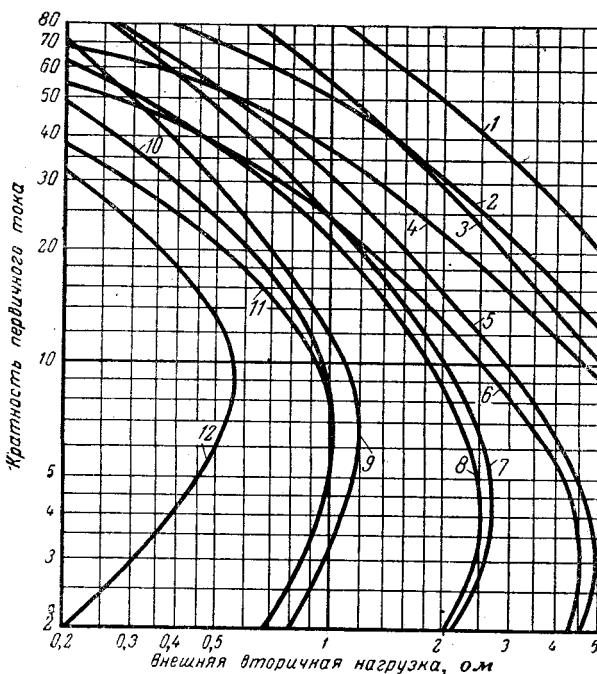


Рис. 6-27. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТН-110.

## п) Трансформаторы тока ТВДМ-110, ТВМ-110, ТНДМ-110 и ТНМ-110

## Параметры вторичных обмоток

Вариант исполнения по $I_{1n}$	75—200				100—300			
	$n_t$	75/5	100/5	150/5	200/5	100/5	150/5	200/5
w	ТНДМ и ТНМ ТВДМ и ТВМ	15 15	20 18	30 29	38 39	20 18	30 29	38 39
r		0,03	0,043	0,064	0,086	0,043	0,064	0,086
x		0,15	0,15	0,2	0,1	0,2	0,2	0,1
z		0,153	0,156	0,21	0,134	0,205	0,21	0,218

Вариант исполнения	200—600				400—1 000				
	$n_t$	200/5	300/5	400/5	600/5	400/5	600/5	750/5	1 000/5
w	ТНДМ и ТНМ ТВДМ и ТВМ	37 39	58 60	79 79	120 119	77 79	118 119	148 149	200 200
r		0,086	0,128	0,171	0,26	0,171	0,26	0,33	0,44
x		0,3	0,3	0,3	0,1	0,6	0,8	0,7	0,1
z		0,31	0,327	0,346	0,279	0,624	0,84	0,774	0,45

## Параметры сердечников

Класс сердечника	s, см <sup>2</sup>	L, см	Номер кривой намагничивания
ТВДМ и ТВМ ТНДМ и ТНМ	90 90	150 150	8 на рис. 6-11 12 на рис. 6-12

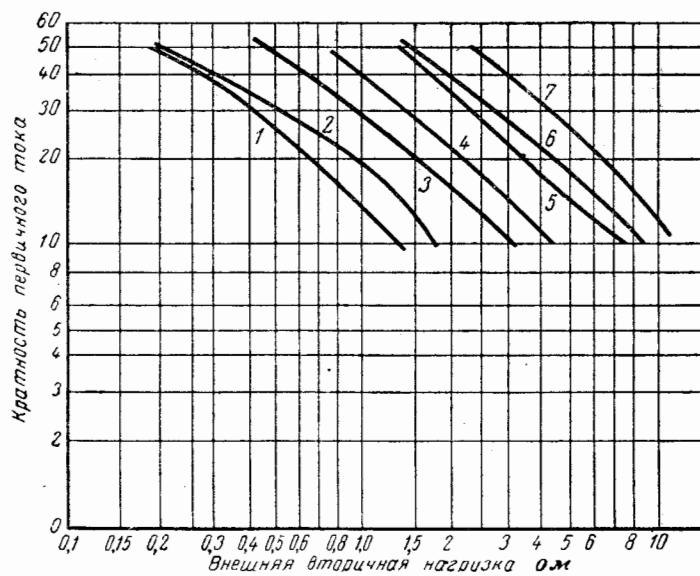


Рис. 6-28. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТВДМ-110 и ТВМ-110.

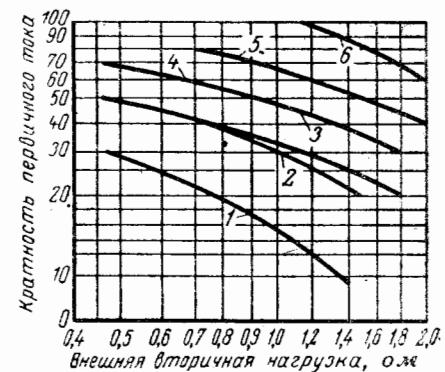


Рис. 6-29. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТНДМ-110 и ТНМ-110.

Номера кривых 10%-ных погрешностей для ТВДМ и ТВМ на рис. 6-28 и для ТНДМ и ТНМ на рис. 6-29, соответствующие разным  $n_t$

$n_t$	150/5	200/5	300/5	400/5	600/5	750/5	1 000/5	
Номер кривой	ТВДМ и ТВМ ТНДМ и ТНМ	1 —	2 1	3 2	4 3	5 4	6 5	7 6

### с) Трансформаторы тока ТФНД-154 Д/Д/0,5

#### Параметры вторичных обмоток

$n_t$	Класс сердечника	$w$	$r$	$x$	$z$
600—1 200/5	$\Delta_1$ $\Delta_2$	479	0,82 0,75	1 0,6	1,28 0,96
600—1 200/2,5	$\Delta_1$ $\Delta_2$	958	3,3 3	1,5 1	3,62 3,15
$\frac{600—1 200/5}{400—800/5}$	0,5	479 318	0,57 0,38	0,5 0,4	0,76 0,55

#### Параметры сердечников

Класс сердечника $s, \text{ см}^2$ $L, \text{ см}$	$\Delta_1$ 18,7 117,5	$\Delta_2$ 14 117,5	0,5 5,1 83,2
Номер кривой намагничивания на рис. 6-11	6	6	6

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-30, соответствующие разным  $I_{1\text{ном}}$

$I_{1\text{н}}$	600—1200				400—800
Класс сердечника	$\Delta_1$		$\Delta_2$	0,5	0,5
$I_{2\text{н}}$	2,5	5	2,5	5	5
Номер кривой	1	2	3	4	5

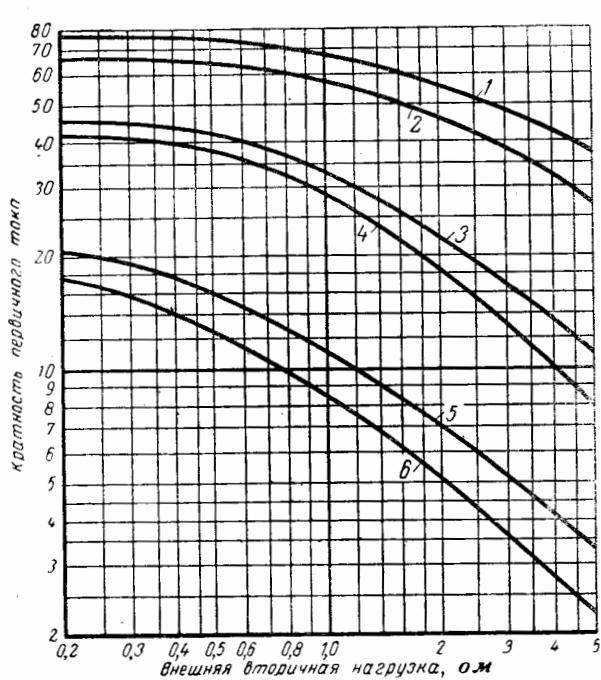


Рис. 6-30. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТФНД-154.

### т) Трансформаторы тока ТФНД-220 Д/Д/Д/0,5

Параметры вторичных обмоток

$n_T$	Класс сердечни- ка	$w$	$r$	$x$	$z$
300—600—1 200/5	$\Delta_1$	479	0,54	1	1,14
	$\Delta_2$		0,54	1	1,14
	$\Delta_3$		0,5	0	0,5
	0,5		0,5	0	0,5
Ответвление 200—400—800/5	0,5	319	0,35	0	0,35
300—600—1 200/1	$\Delta_1$	2 400	12	25	28
	$\Delta_2$		12	25	28
	$\Delta_3$		10,5	0	10,5
	0,5		10,5	0	10,5
Ответвление 200—400—800/1	0,5	1 600	7,5	0	7,5

### Параметры сердечников

Класс сердечника	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	0,5
$s, \text{ см}^2$	16,5	16,5	10,6	10,6
$L, \text{ см}$	156	156	115	115

Номер кривой намагни-  
чивания на рис. 6-11

6

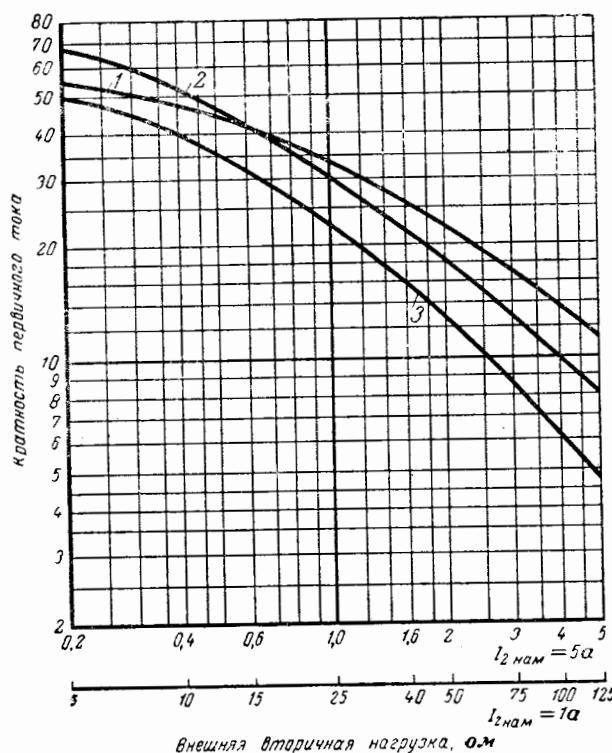


Рис. 6-31. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТФНД-220.

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-31, соответствующие разным  $I_{1n}$

$I_{1n}$	300—600—1 200			200—400—800
Класс сердечника	$D_1$	$D_2$	$D_3$	0,5
Номер кривой	1	2	3	0,5

#### у) Трансформаторы тока ТВ-274 и ТВД-274 Параметры вторичных обмоток

$n_T$	$w$	$r$	$x$	$z$
200/5	35	0,1	0,3	0,32
400/5	76	0,2	0,4	0,45
600/5	118	0,3	0,3	0,43
800/5	158	0,4	0,1	0,41

#### Параметры сердечников

Класс сердечника	$s, \text{ см}^2$	$L, \text{ см}$	Номер кривой намагничивания на рис. 6-10
ТВ и ТВД	158	268	5

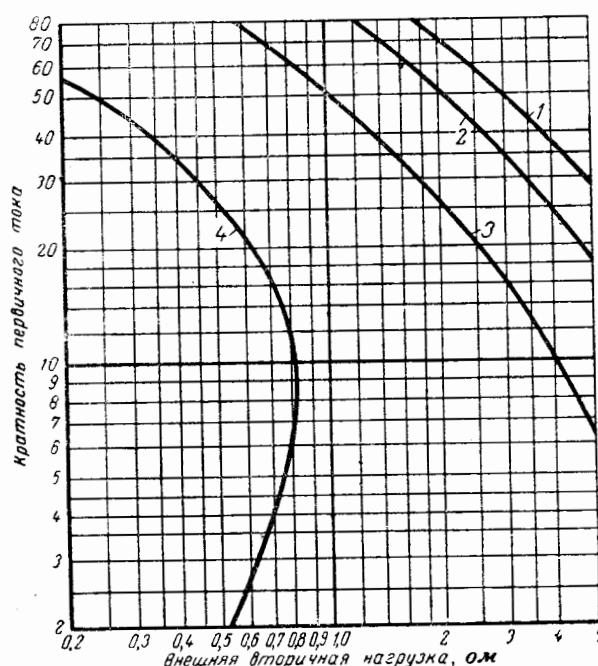


Рис. 6-32. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТВД-274 и ТВ-274.

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-32, соответствующие разным  $I_{1n}$

$I_{1n}$	200	400	600	800
Номер кривой	4	3	2	1

**ф) Трансформаторы тока ТВД-220**  
**Параметры вторичных обмоток**

Исполнение	200—600				400—1 000				600—1 500			
$n_t$	200/5	300/5	400/5	600/5	400/5	600/5	750/5	1 000/5	600/5	750/5	1 000/5	1 500/5
$w$	38	58	78	119	78	119	149	200	118	148	199	300
$r$	0,11	0,165	0,22	0,33	0,22	0,33	0,41	0,55	0,33	0,41	0,55	0,83
$x$	0,2	0,25	0,3	0,1	0,6	0,8	0,7	0,1	1,4	1,6	1,7	0,1
$z$	0,23	0,3	0,375	0,345	0,636	0,865	0,75	0,56	1,44	1,66	1,75	0,835

Параметры сердечников

$s=100 \text{ см}^2$

$L = 256 \text{ см}$

кривая намагничивания 8 на рис. 6-11

Номера кривых 10%-ных погрешностей на рис. 6-33, соответствующие разным  $I_{1n}$

$I_{1n}$	200	300	400	600	750	1 000	1 500
Номер кривой	1	2	3	4	5	6	7

**х) Трансформаторы тока ТФНК-400**

Исполнение: Д/Д/Д/1

1. Схема. Трансформатор тока каскадный, двухступенчатый. В I (верхней) ступени — один трансформатор тока, во II (нижней) ступени — четыре отдельных трансформатора тока. Первичная обмотка трансформатора тока нижней ступени общая для всех четырех сердечников. Она подключена ко вторичной обмотке трансформатора тока верхней ступени (рис. 6-34).

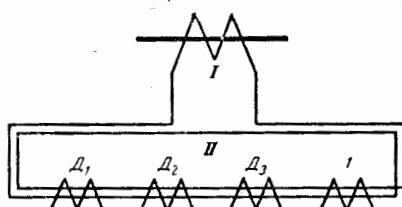


Рис. 6-34. Схема двухступенчатого трансформатора тока типа ТФНК-400.

2. Верхняя ступень

$n_t$	$w_1$	$w_2$	$r_2$	$x_2$	$z_2$
500—1 000—2 000/20	4	99	0,047	0,3	0,31

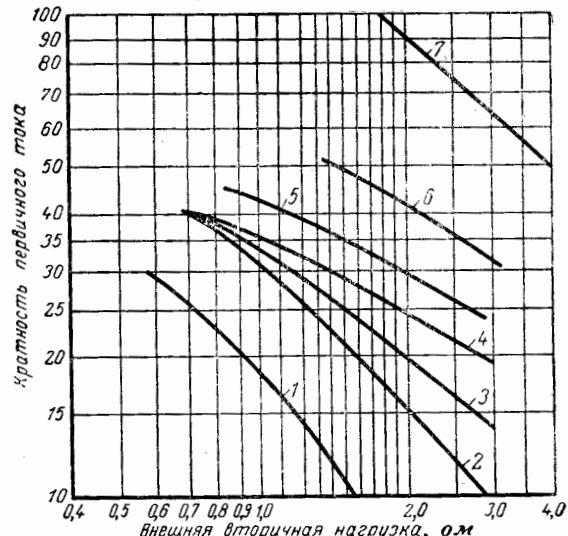


Рис. 6-33. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТВД-220.

3. Нижняя ступень

$n_t$	Класс сердечника	$w_1$	$w_2$	$r_2$	$x_2$	$z_2$	$r_1$	$x_{1K}^*$	$z_{1K}^*$
20/1	$D_1$			5,4	8,4	10			
	$D_2$	60	1 188	5,5	3	6,25		0,104	1,31
	$D_3$			5,4	8,4	10			
	1	1 200	7,8	0	7,8				

\* Сопротивление короткого замыкания со стороны первичной обмотки при закороченных вторичных обмотках всех четырех сердечников (суммарное сопротивление короткого замыкания всех сердечников нижней ступени).

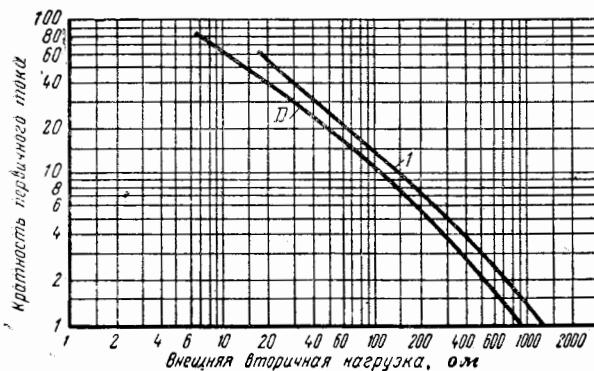


Рис. 6-35. Кривые 10%-ных погрешностей трансформаторов тока ТФНК-400.

#### Параметры сердечников

Класс сердечника	Верхняя ступень	Нижняя ступень			I
		Д <sub>1</sub>	Д <sub>2</sub>	Д <sub>3</sub>	
s, см <sup>2</sup>	159,4		23,2		29,1
L, см	148		166,5		117,8

Номер кривой намагничивания на рис. 6-11

Кривые 10%-ных погрешностей сердечников нижней ступени приведены на рис. 6-35.

Погрешности трансформатора тока верхней ступени незначительные и могут не приниматься во внимание.

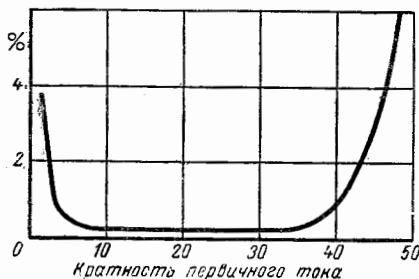


Рис. 6-36. Кривая погрешностей по току верхней ступени трансформаторов тока ТФНК-400.

Кривая погрешностей трансформатора тока верхней ступени приведена на рис. 6-36, где

$$\Delta I\% = \frac{I_{\text{ном}}}{I_1} \cdot 100.$$

Эта кривая соответствует работе всех четырех трансформаторов тока нижней ступени с 10%-ной погрешностью.

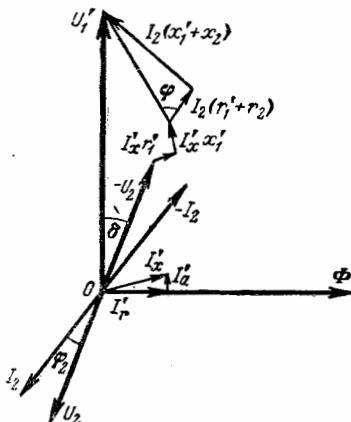


Рис. 6-37. Векторная диаграмма трансформатора напряжения.

#### 6-5. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ НАПРЯЖЕНИЯ

Работа трансформатора напряжения (ТН) характеризуется векторной диаграммой, приведенной на рис. 6-37.

На рис. 6-37 и в дальнейшем приняты следующие условные обозначения:

- $U_1$  — первичное напряжение;
- $U_2$  — вторичное напряжение;
- $\Phi$  — магнитный поток;
- $w_1$  — число витков первичной обмотки;
- $w_2$  — число витков вторичной обмотки;
- $n_h = \frac{w_1}{w_2}$  — коэффициент трансформации ТН;
- $U'_1 = \frac{U_1}{n_h}$  — первичное напряжение, приведенное к вторичной обмотке;
- $z_1 = r_1 + jx_1$  — полное сопротивление первичной обмотки;
- $r_1, r_2$  — активные сопротивления первичной и вторичной обмоток;
- $x_1, x_2$  — реактивные сопротивления первичной и вторичной обмоток;
- $z'_1 = \frac{z_1}{n_h^2}$  — полное сопротивление первичной обмотки, приведенное к вторичной обмотке;
- $z_2$  — полное сопротивление вторичной обмотки;
- $x'_k$  — реактивное сопротивление короткого замыкания, приведенное к вторичной обмотке;
- $I_1$  — первичный ток ТН;
- $I_2$  — вторичный ток ТН, ток нагрузки;
- $I'_1 = I_1 n_h$  — первичный ток ТН, приведенный к вторичной обмотке;
- $I'_x$  — ток холостого хода, приведенный к вторичной обмотке;
- $e_k$  — напряжение короткого замыкания, %;
- $\varphi_2$  — угол сдвига фаз между  $U_2$  и  $I_2$ ;
- $\varphi_k$  — угол сдвига фаз короткого замыкания трансформатора напряжения;
- $\delta'$  — угловая погрешность;
- $\delta'_x$  — угловая погрешность, обусловленная током холостого хода;

$\delta'_x$  — угловая погрешность, обусловленная током нагрузки;

$\Delta U$  — погрешность по напряжению.

Точность работы ТН характеризуется двумя погрешностями: по напряжению и по углу.

Погрешность по напряжению равна:

$$\Delta U \% = \frac{n_h U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100. \quad (6-40)$$

Погрешность по углу определяется по выражению

$$\delta' = \delta'_x + \delta'_{\text{н}}, \quad (6-41a)$$

где

$$\delta'_x = \frac{3440}{U_2} (I'_r r_1 - I'_a x_1); \quad (6-41b)$$

$$\delta'_{\text{н}} = \frac{3440}{U_2} [(r'_1 + r_2) \sin \varphi_2 - x_{\text{н}} \cos \varphi_2]. \quad (6-41b)$$

ТН имеют три класса точности, соответствующие следующим максимальным погрешностям (табл. 6-3).

Таблица 6-3

Максимальные погрешности трансформаторов напряжения при разных классах точности

Класс точности	Максимальная погрешность	
	по напряжению, %	по углу, мин
0,5	$\pm 0,5$	$\pm 20$
1	$\pm 1$	$\pm 40$
3	$\pm 3$	Не нормируется

Согласно ГОСТ 1983-43 ТН должны работать в классе точности при первичном напряжении  $U_1 = (0,9 \div 1,1) U_{1\text{н}}$  и при нагрузке вторичной обмотки в пределах

$$S = (0,25 - 1) \left( \frac{U_1}{U_{1\text{н}}} \right)^2 S_{\text{н}}. \quad (6-42)$$

ТН характеризуется также максимальной мощностью, которую он может длительно отдавать при номинальном напряжении вторичной обмотки и при допустимом нагреве всех его частей. При отдаче максимальной мощности ТН работает вне класса точности.

Основные технические данные ТН отечественного производства приведены в табл. 6-4.

## 6-6. ЦЕПИ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

### а) Схемы соединения трансформаторов напряжения и их цепей

Схемы соединения ТН для включения цепей защиты, автоматики и измерений приведены на рис. 6-38—6-40 и в табл. 6-5—6-7.

В схеме на рис. 6-38,е установлен прибор контроля изоляции цепей напряжения, дающий сигнал от реле  $P$  при замыкании на землю в любой точке цепей напряжения.

Прибор контроля изоляции необходим для предотвращения ложной работы защиты или автоматики при

замыкании на землю во второй точке. Конденсатор сглаживает пульсацию выпрямленного напряжения. Опробование устройства сигнализации производится кнопкой.

### б) Заземление в цепях напряжения

1. Заземление вторичных обмоток ТН, выполненное для обеспечения безопасности обслуживающего персонала, может подключаться в любой точке цепей напряжения.

Заземление рекомендуется устанавливать на ближайшей к ТН сборке зажимов. Сечение медного заземляющего провода должно быть не менее 4  $\text{мм}^2$ .

Заземление должно быть жестко связано с вторичными обмотками ТН, так, чтобы оно не могло быть отделено от обмоток рубильниками, предохранителями, блок-контактами и т. п.

Если же такое отделение возможно (рис. 6-38,е), дополнительно должен устанавливаться пробивной предохранитель (например, типа ПП-А/3 на 350 в).

2. В цепях напряжения заземляется одна из фаз при схеме соединения ТН в треугольник, в открытый треугольник и при схеме соединения в звезду в случаях, когда цепи ТН используются для синхронизации.

При отсутствии цепей синхронизации у ТН, соединенных в звезду, обычно заземляется нулевая точка.

3. При использовании ТН для питания оперативных цепей защиты и автоматики его вторичные обмотки заземляются через пробивной предохранитель (рис. 6-38,е).

4. При соединении общей шиной цепей нескольких трансформаторов напряжения заземление следует выполнять только в одной точке на щите управления. Соединение заземленной шинки с выводами трансформаторов напряжения должно выполняться медным проводом сечением не менее 4  $\text{мм}^2$ . На каждом трансформаторе напряжения необходимо устанавливать пробивной предохранитель типа ПП-А/3500 между заземляющим контуром и зажимом, соединяемым кабелем с общей заземленной шинкой.

### в) Расстановка предохранителей и автоматов в цепях напряжения

1. Предохранители или автоматы устанавливаются во всех незаземленных проводах для защиты ТН от коротких замыканий: в двух фазах и в нулевом проводе (при заземлении третьей фазы) или всех трех фазах (при заземлении нулевой точки).

2. В схемах соединения ТН с заземлением одной из фаз сигнализация при перегорании предохранителя, установленного в нулевом проводе, не работает. Для исключения этого допускается установка предохранителя в заземленной фазе (рис. 6-39,г, табл. 6-6) с дополнительной установкой пробивного предохранителя в нулевом проводе.

3. Если от ТН питается быстродействующая защита, которая может ложно подействовать при нарушении цепей напряжения (например, защита с реле сопротивления), в цепях напряжения должны устанавливаться автоматические выключатели (автоматы).

В цепях напряжения для сетей 110 кВ и выше устанавливаются однофазные автоматы. В цепях напряжения для сетей 35 кВ и ниже обычно устанавливаются трехфазные автоматы. Время срабатывания автомата должно быть порядка 5—10 мсек.

4. В цепях разомкнутого треугольника устанавливается только один предохранитель в испытательном проводе (рис. 6-40).

Таблица 6-4

Тип	Исполнение	Соединение обмоток	$U_{1n}, \text{ в}$	$U_{2n}, \text{ в}$		$S_n$ в классе точности			$S_{\max}, \text{ вт}$	$r_1, \Omega$	$r_2, \Omega$	$I_x, \text{ а}$	$\mu_k, \%^*$
				V	$\Delta$	0,5	1	3					
HOC-0,5	Однофазные двухобмоточные	1/1-12	380	100	—	25	40	100	200	23,2	0,94	0,465	0,55
HOC-0,5		1/1-12	500	100	—	25	40	100	200	14,9	0,94	0,465	0,525
HOCK-3		1/1-12	3 000	100	—	30	50	120	240	485	0,76	1,15	0,415
HOCK-6		1/1-12	6 000	100	—	50	80	200	400	—	—	—	—
HOM-6		1/1-12	2 100	100	—	30	50	120	400	233	0,762	1,15	0,432
HOM-6		1/1-12	3 000	100	—	30	50	120	400	485	0,76	1,15	0,432
HOM-10		1/1-12	6 000	100	—	50	80	200	600	2 045	0,755	1,15	0,74
HOM-15		1/1-12	10 000	100	—	80	150	320	720	2 640	0,421	3,5	0,612
HOM-15		1/1-12	13 800	100	—	80	150	320	840	—	—	—	0,405
HOM-15		1/1-12	15 000	100	—	80	150	320	840	—	—	—	0,375
HOM-35		1/1-12	18 000	100	—	80	150	320	840	—	—	—	0,419
HOM-35		1/1-12	35 000	100	—	150	250	600	1 200	9 500	0,1	6,85	0,422
3НОМ-35-54	Однофазный трехобмоточный	1/1/1-12	$\frac{35 000}{V_3}$	$\frac{100}{V_3}$	$\frac{100}{V_3}$	150	250	600	1 200	—	—	—	0,73
HTC-0,5	Трехфазные трехстержневые двухобмоточные	$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	380	100	—	50	80	200	400	—	—	—	0,47
HTC-0,5		$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	500	100	—	50	80	200	400	—	—	—	0,47
HTMK-6-48		$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	3 000	100	—	50	80	200	400	297	0,244	—	0,318
HTMK-6-48		$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	6 000	100	—	80	150	320	640	1 285	0,208	2,9	0,382
HTMK-10		$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	10 000	100	—	120	200	480	960	—	—	—	0,383
HTMI-6	Трехфазные пятистержневые трехобмоточные	$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	3 000	100	$\frac{100}{3}$	50	80	200	400	—	—	—	0,46
HTMI-6		$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	6 000	100	$\frac{100}{3}$	80	150	320	640	—	—	—	0,625
HTMI-10		$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	10 000	100	$\frac{100}{3}$	120	200	480	960	—	—	—	0,468
HTMI-18		$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	13 800	100	$\frac{100}{3}$	120	200	480	960	—	—	—	0,506
HTMI-18		$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	15 000	100	$\frac{100}{3}$	120	200	480	960	—	—	—	—
HTMI-18		$\Delta/\Delta^{\circ}-12$	18 000	100	$\frac{100}{3}$	120	200	480	960	—	—	—	0,536
НКФ-110	Однофазные каскадные трехобмоточные	1/1/1-12	$\frac{110 000}{V_3}$	$\frac{100}{V_3}$	100	—	500	1 000	2 000	1 530	$\frac{0,0135**}{0,0135}$	$\frac{33,5**}{19,4}$	$\frac{0,635***}{1,66/1,43}$
НКФ-220		1/1/1-12	$\frac{154 000}{V_3}$	$\frac{100}{V_3}$	100	—	500	1 000	2 000	—	—	—	—
НКФ-220		1/1/1-12	$\frac{220 000}{V_3}$	$\frac{100}{V_3}$	100	—	500	1 000	2 000	3 060	$\frac{0,0135**}{0,0135}$	$\frac{67**}{38,8}$	1,19
НКФ-400		1/1/1-12	$\frac{400 000}{V_3}$	$\frac{100}{V_3}$	100	—	500	—	—	—	—	—	1,36
НКФ-500		1/1/1-12	$\frac{500 000}{V_3}$	$\frac{100}{V_3}$	100	—	500	—	—	—	—	—	1,43—1,8

\* Величина  $\mu_k, \%$  отнесена к номинальной мощности в высшем классе точности.

\*\* В числителе дано значение для обмоток, соединяемых в звезду, в знаменателе — в разомкнутый треугольник.

\*\*\* Данны  $\mu_k, \%$  для трансформаторов трех выпусков НКФ-110-41, НКФ-110-54, НКФ-110-57.

Таблица 6-5

## Схемы соединения однофазных двухобмоточных трансформаторов напряжения

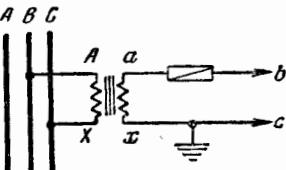
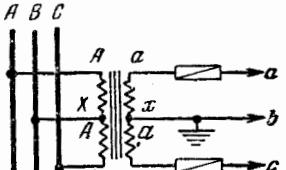
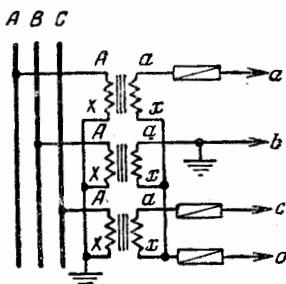
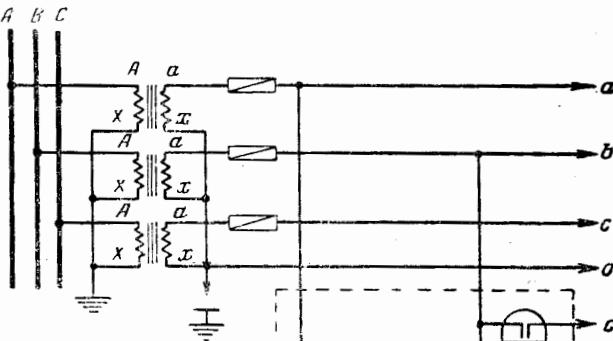
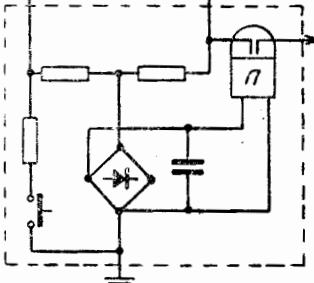
Схема	Применение
 <i>a)</i>	В сетях 3—18 кВ для включения реле, приборов, устройств автоматики на междудофазные напряжения
 <i>b)</i>	Для включения реле приборов, устройств автоматики на междудофазные и фазные напряжения
 <i>c)</i>	
 <i>d)</i>	В специальных случаях для компенсации углового сдвига в приборах синхронизации, для питания регуляторов напряжения ( <i>d</i> )
 <i>e)</i>	Для питания оперативных цепей защиты и автоматики ( <i>e</i> )

Таблица 6-6

## Схемы соединения трехфазных трансформаторов напряжения

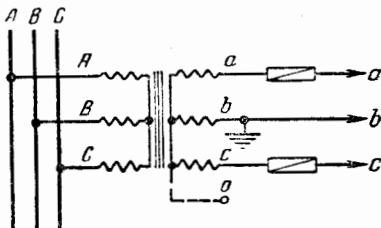
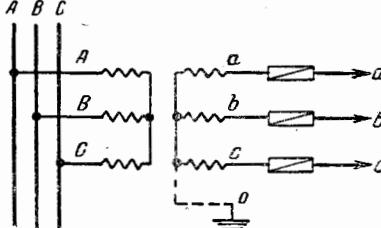
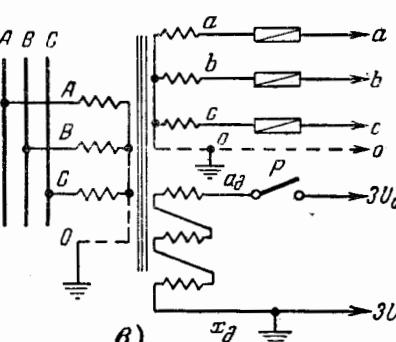
Схема	Применение
 <p>a)</p>	<p>В сетях с изолированной нейтралью для включения реле, приборов, устройств автоматики на междуфазные и фазные напряжения</p>
 <p>b)</p>	

Схема	Применение
 <p>c)</p>	<p>В сетях с изолированной нейтралью для включения реле, приборов, устройств автоматики на междуфазные и фазные напряжения, а также для получения напряжения нулевой последовательности</p>

5. В цепях ТН, питающих автоматические регуляторы напряжения и устройства быстродействующего возбуждения генераторов и синхронных компенсаторов, предохранители и автоматы не устанавливаются для предотвращения ложного действия устройств регулирования и форсировки возбуждения при нарушении цепей напряжения.

6. Предохранители и автоматы должны устанавливаться возможно ближе к защищаемому ТН. При этом должна быть обеспечена возможность смены предохранителей и включения автоматов без отключения ТН.

7. Предохранители, через которые питаются цепи защиты, должны иметь надежную конструкцию, например ПТ, БЗ и т. п. Установка в цепях защиты пробоочных предохранителей не допускается.

### г) Переключение цепей напряжения

1. Цепи низкого напряжения по условиям техники безопасности должны обеспечивать видимый разрыв, предотвращающий возможность подачи напряжения с низкой стороны на высокую. Видимый разрыв выполняется с помощью трубчатых предохранителей, вынимаемых при работах на ТН. В незаземленных проводах, где отсутствуют предохранители, дополнительно устанавливаются рубильники (рис. 6-38—6-40), которые отключаются при работах на ТН.

2. При наличии двух и более систем шин или секций, на каждой из которых предусмотрен ТН, устройства защиты и автоматики должны питаться от ТН своей секции или системы шин.

Переключение цепей напряжения устройств защиты и автоматики с одного ТН на другой производится вручную или автоматически с помощью блок-контактов шинных разъединителей или выключателей. Наиболее употребительные схемы переключения цепей напряжения приведены в табл. 6-8.

3. При выполнении автоматического переключения цепей напряжения табл. 6-8, г, д необходимо, чтобы в цепях напряжения блок-контакты замыкались после того, как замкнутся силовые контакты разъединителя или выключателя. Невыполнение этого условия может при переключениях привести к перегоранию предохранителей или отключению автоматов одного или обоих ТН из-за большого зарядного тока шин высокого напряжения.

4. При работе подстанции на двух системах шин, когда нормально включены оба выключателя каждого присоединения, может применяться параллельная работа ТН обеих систем шин.

### д) Контроль исправности цепей напряжения

В том случае, если нарушение цепей напряжения может привести к ложному действию или отказу защиты, должны быть предусмотрены устройства сигнали-

Таблица 6-7

## Схемы соединения однофазных трехобмоточных трансформаторов напряжения

Схема	Применение
	<p>Применяется в сетях с заземленной нейтралью для включения реле, приборов, устройств автоматики на междуфазные и фазные напряжения, а также на напряжение нулевой последовательности. Для проверки направленных защит от замыканий на землю в схемах предусматривается специальный вывод — испытательный провод <math>3U_0</math>.</p>

зации нарушения цепей напряжения и блокировка защит, которые могут ложно сработать в этом случае.

Схемы устройств сигнализации и блокировки приведены в табл. 6-9 и 6-10.

## 6-7. РАСЧЕТНАЯ ПРОВЕРКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

### а) Определение нагрузки на ТН

При новом включении ТН или при подключении к нему новых цепей необходимо проверить соответствие нагрузки для работы ТН в необходимом классе точности.

Проверка производится для двух режимов: нормального и аварийного, когда нагрузка ТН увеличивается за счет подключения к нему нормально отключенных обмоток реле.

В нормальном режиме класс точности ТН определяется требованием точности измерений подключенных к нему приборов, а именно: класс 3 — для питания от ТН указывающих и регистрирующих приборов и класс 0,5 — для питания счетчиков.

В аварийном режиме класс точности определяется условиями работы релейной защиты, включенной на ТН, и приведен в табл. 6-11.

Величина нагрузки ТН в нормальном режиме измеряется или определяется расчетным путем.

Таблица 6-8

## Схемы переключения цепей напряжения

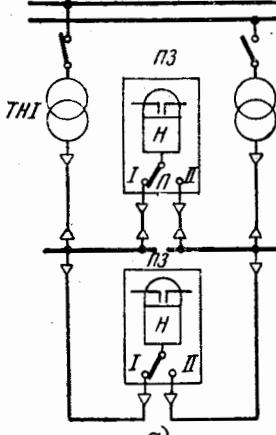
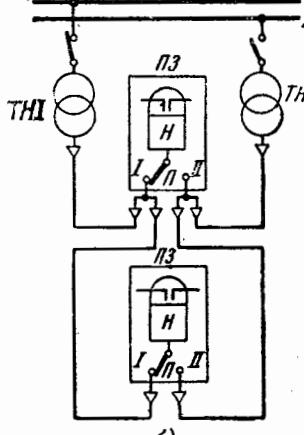
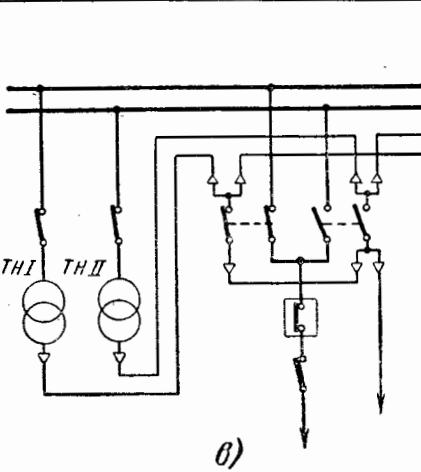
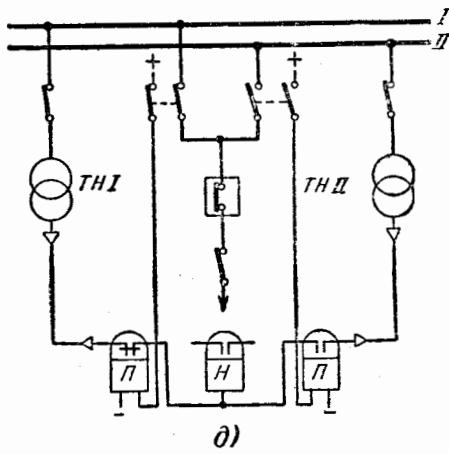
Схема	Пояснение
	Переключение производится вручную. Цепи напряжения подаются на панели защиты от общей сборки кросса цепей напряжения (а)
	Переключение производится вручную. Цепи напряжения поочередно заводятся на каждую панель (б)
	Переключение производится автоматически блок-контактами шинных разъединителей (в)
	Переключение производится автоматически промежуточными реле, которые управляются блок-контактами разъединителей

Таблица 6-9

## Схемы сигнализации и блокировки защит при нарушении цепей напряжения трансформаторов напряжения, соединенных в звезду

Схема	Пояснение
<p>a) Сигнал к защите</p>	<p>Схема реагирует как на нарушение цепи одной фазы, так и на снятие трех фаз напряжения (a)</p>
<p>b) Сигнал к защите</p>	<p>Схема реагирует как на нарушение цепи одной фазы, так и на снятие трех фаз напряжения. Может действовать на сигнал и на автоматический вывод защиты (б)</p>
<p>c) Сигнал к защите</p>	<p>Применяются для сетей с заземленной нейтралью, реагируют на нарушение одной или двух фаз напряжения. Могут действовать на сигнал или автоматический вывод защиты (в и г) <math>T_0</math> — контакт токового реле нулевой последовательности</p>
<p>d) Сигнал к защите</p>	<p>Применяется для сетей с неизолированной нейтралью, реагирует на нарушение одной или двух фаз напряжения. Может действовать на сигнал и автоматический вывод защиты (д)</p>
<p>e) Сигнал к защите</p>	<p>Применяется для ТН, имеющих две вторичные обмотки. Реагирует на нарушение одной или всех трех фаз одной из обмоток. Может действовать на сигнал и автоматический вывод защиты. Не действует при снятии напряжения со стороны высокого напряжения ТН (е)</p>
<p>ж) Сигнал к защите</p>	<p>Контакты токового реле и реле напряжения подают плюс на защиту лишь при прохождении тока короткого замыкания больше тока срабатывания токового реле или при наличии напряжения 15—20% <math>U_{ном}</math>. Блокирует защиту при снятии трех фаз напряжения (ж)</p>

Таблица 6-10

**Схемы сигнализации и контроля исправности цепей напряжения обмоток трансформатора напряжения, соединенных по схеме разомкнутого треугольника**

Схема	Пояснение
 a)	<p>Периодический контроль по наличию напряжения небаланса на выходе разомкнутого треугольника</p>
 б)	<p>Периодический контроль по наличию напряжения небаланса. Кнопка <math>K_1</math> включает дополнительную нагрузку <math>R_1</math> на испытательный провод, что вызывает увеличение <math>U_{\text{нб}}</math>, повышая четкость отсчета, а также обеспечивает контроль исправности испытательной жилки</p>
 б)	<p>Периодический контроль по горению ламп</p>
 г)	<p>Автоматический контроль. Реле напряжения с двумя обмотками. Нормально контакт реле напряжения разомкнут. При обрыве одного из выводов разомкнутого треугольника реле срабатывает и подает сигнал. Кнопка <math>K</math> установлена для деблокирования схемы</p>

Таблица 6-11

Тип ТН	Нагрузка	Класс точности
Двухобмоточные	Реле напряжения, сопротивления	Не ниже 3
	Реле мощности, частоты	По условию максимальной нагрузки ТН
Трехобмоточные	—	Не ниже 3 для каждой из вторичных обмоток

Полная нагрузка каждой фазы ТН в аварийном режиме определяется суммой нагрузки нормального режима и подсчитанного для всех устройств защиты и автоматики дополнительного увеличения нагрузки аварийного режима.

Нагрузка, замеренная для ТН, при данном напряжении  $U_2$  приводится к номинальному значению напряжения  $U_{2n}$ :

$$I'_2 = I_2 \frac{U_{2n}}{U_2}, \quad (6-43)$$

где  $I'_2$  — приведенный к номинальному напряжению ток;  $U_{2n}$  — номинальное вторичное линейное напряжение ТН;  $U_2$ ,  $I_2$  — замеренное линейное напряжение и ток нагрузки.

Для трехфазного ТН нагрузка на фазу определяется выражением

$$S'_{\phi} = I'_2 \frac{U_{2n}}{\sqrt{3}}. \quad (6-44)$$

Нагрузка на фазу обмоток ТН, соединенных в звезду, может быть определена как сумма нагрузок отдельных реле и приборов, подключенных к данным цепям напряжения.

Нагрузка на одну фазу ТН для схемы, приведенной на рис. 6-38, может быть определена следующим выражением:

$$S''_A = S'_{\phi A} + (0,58S'_{AB(\max)} + 0,42S'_{AC(\min)}), \quad (6-45)$$

где  $S''_A$  — суммарная нагрузка фазы  $A$  ТН;

$S'_{\phi A}$  — фазная нагрузка фазы  $A$ , относенная к фазному напряжению;  $S'_{AB(\max)}$  и  $S'_{AC(\min)}$  — соответственно большая и меньшая из двух линейных нагрузок (приведенная к линейному напряжению), подключенная к фазе  $A$ .

При  $S_{AB} = S_{AC}$

$$S''_A = S'_{\phi A} + S_{AB}. \quad (6-45a)$$

Для вторичных обмоток, соединенных по схеме разомкнутого треугольника, нагрузка также может быть определена измерением или расчетом. Измерение тока нагрузки производится при отключении обмотки одной из фаз или путем подачи напряжения на нагрузку от постороннего источника.

Результаты измерений должны быть пересчитаны на максимальное значение напряжения на разомкнутом треугольнике при однофазном замыкании на землю в сети.

$$I'_{p.t} = I_{p.t} \frac{U'_{p.t}}{U_{p.t}}, \quad (6-46)$$

где  $I_{p.t}$  и  $U_{p.t}$  — замеренные токи и напряжения на нагрузке разомкнутого треугольника.

Для сети с заземленной нейтралью  $U'_{p.t} = U_{nom.p.t}$  на фазу, а для сети с изолированной нейтралью  $U'_{p.t} = 3U_{nom.p.t}$  на фазу. Мощность нагрузки вторичных обмоток, включенных в разомкнутый треугольник, равна:

$$S_{p.t} = I'_{p.t} U_{nom.p.t}. \quad (6-47)$$

Нагрузка на одну фазу обмоток, соединенных в звезду или в разомкнутый треугольник, подсчитанная по (6-46) и (6-47), сопоставляется с номинальной мощностью на фазу соответствующего класса точности ТН.

Допустимая нагрузка на фазу ТН определяется по данным табл. 6-4 и формулам табл. 6-12.

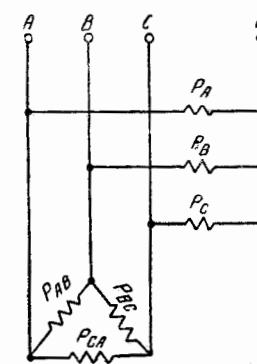


Рис. 6-38. Схема замещения цепей напряжения.

Таблица 6-12

Схема соединения ТН	Допустимая нагрузка на фазу
Звезда из однофазных ТН	$S_{\phi} = S_n$
Открытый треугольник из двух ТН	$S_{\phi} = \frac{S_n}{\sqrt{3}}$
Трехфазный ТН	$S_{\phi} = \frac{S_n}{3}$

## б) Определение потерь во вторичных цепях трансформаторов напряжения

Согласно ПУЭ (III-4-4, п. «б»), потери напряжения во вторичных цепях от ТН до нагрузки не должны превышать:

до расчетных счетчиков (нормальная нагрузка) — 0,5%;

до измерительных приборов (нормальная нагрузка) — 3%;

для устройств релейной защиты и автоматики (аварийная нагрузка) — 3%.

Потери напряжения подсчитываются по формуле

$$\Delta U \% = \frac{U_{TH} - U_{nагр}}{U_{TH}} \cdot 100\%, \quad (6-48)$$

где  $U_{TH}$  — напряжение на выводах ТН;

$U_{nагр}$  — напряжение на нагрузке.

Напряжение следует измерять вольтметром, поочередно подключаемым на напряжение у выводов ТН и у наиболее удаленной панели измерительных приборов, счетчиков, защиты, автоматики.

### в) Расчет токов короткого замыкания во вторичных цепях трансформаторов напряжения

Расчет токов короткого замыкания во вторичных цепях ТН выполняется для выбора предохранителей и автоматов.

При расчете допускаются следующие упрощения:

- 1) не учитывается реактивное сопротивление цепей, питающихся от ТН;
- 2) не учитываются различия импедансных углов сопротивлений ТН и их вторичных цепей.

Значение тока короткого замыкания подсчитывается по формуле

$$I_k = \frac{U_2}{k_1 z_k + k_2 r_{pr}}, \quad (6-49)$$

где  $U_2$  — вторичное линейное напряжение ТН;

$r_{pr}$  — активное сопротивление одного провода от ТН до места короткого замыкания;

$k_1$ ,  $k_2$  — коэффициенты, зависящие от схемы соединения ТН и вида короткого замыкания, приведены в табл. 6-13;

$z_k$  — сопротивление ТН в омах, приведенное к стороне низкого напряжения, равное

$$z_k = \frac{u_k \% U_{2H}^2}{100 S}, \quad (6-50)$$

где  $u_k \%$  — напряжение короткого замыкания (см. табл. 6-4);  
 $U_{2H}$  — номинальное напряжение вторичной обмотки ТН;

$S$  — мощность ТН, к которой отнесена величина  $u_k \%$ , в а.

Для более точного определения тока короткого замыкания рекомендуется произвести измерения тока при искусственно устраиваемом в наиболее удаленной точке от ТН коротком замыкании.

На время искусственного короткого замыкания следует шунтировать предохранители и автоматы. Длительность короткого замыкания должна быть минимальной, обеспечивающей быстрый отсчет по прибору или запись осциллографом (не более 2—3 сек).

### 6-8. ВЫБОР ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ МАКСИМАЛЬНЫХ АВТОМАТОВ И НОМИНАЛЬНОГО ТОКА ПЛАВКИХ ВСТАВОК

Ток срабатывания автомата принимается в 1,2—1,5 раза больше максимальной нагрузки на фазу трансформатора напряжения. Минимальный ток короткого замыкания, определенный по (6-49) или замеренный опытным путем, должен быть в 2—3 раза больше тока срабатывания автомата.

Номинальный ток плавкой вставки выбирается согласно указаниям раздела 7.

Таблица 6-13

#### Коэффициенты для расчетов тока короткого замыкания во вторичных цепях трансформаторов напряжения

Схема включения трансформатора напряжения	Вид короткого замыкания	$k_1$	$k_2$	Примечание
Звезда-звезда с заземленными нулевыми точками	Трехполюсное Двухполюсное Однополюсное	$\sqrt{\frac{3}{2}}$ $\sqrt{\frac{3}{2}}$ $\sqrt{3}$	$\sqrt{\frac{3}{2}}$ $\sqrt{\frac{3}{2}}$ $2\sqrt{3}$	
Открытый треугольник	Трехполюсное Двухполюсное	1 1	$1 + \sqrt{\frac{3}{2}}$ 2	Максимальное значение тока к. з. Минимальное значение тока к. з.
Звезда с заземленной нулевой точкой—разомкнутый треугольник	Двухполюсное	$\sqrt{3}$ $2\sqrt{3}$	$2\sqrt{3}$ $2\sqrt{3}$	Максимальное значение тока к. з. Минимальное значение тока к. з.