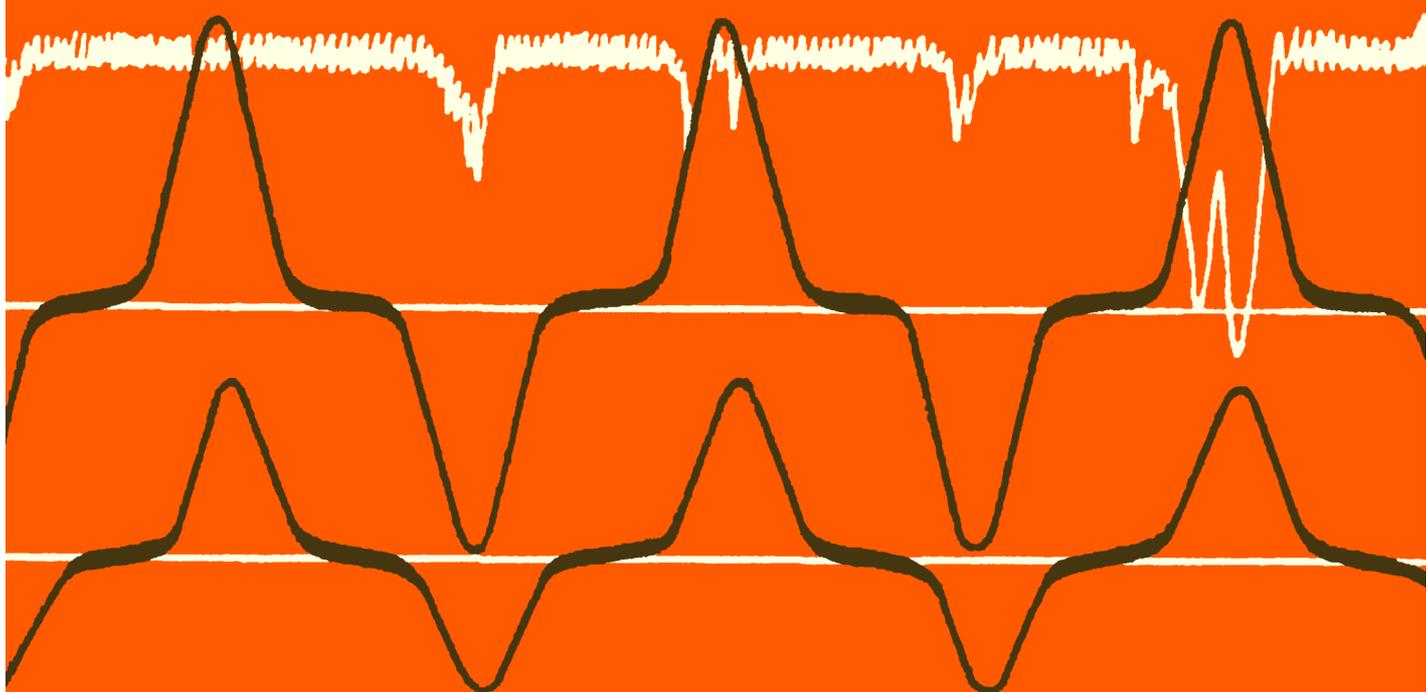


**Е. П. Королев, Э. М. Либерзон**

**РАСЧЕТЫ  
ДОПУСТИМЫХ НАГРУЗОК  
В ТОКОВЫХ ЦЕПЯХ  
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ**



Е. П. КОРОЛЕВ, Э. М. ЛИБЕРЗОН

РАСЧЕТЫ  
ДОПУСТИМЫХ НАГРУЗОК  
В ТОКОВЫХ ЦЕПЯХ  
РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ



МОСКВА «ЭНЕРГИЯ» 1980

**ББК 31.27-05**

**К68**

**УДК 621.316.925.016.3.001.24**

**Королев Е. П., Либерзон Э. М.**

**К68**     **Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. — М.: Энергия, 1980.—208 с., ил.**

**55 к.**

Изложены основные особенности расчета допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты с учетом режимов глубокого насыщения магнитопровода трансформаторов тока и искажения формы кривой вторичного тока. Рассмотрена работа основных измерительных органов релейной защиты в таких режимах и сформулированы расчетные условия определения допустимых нагрузок на трансформаторы тока. Приведена методика расчета сечений жил контрольных кабелей.

Книга рассчитана на инженеров и техников, занимающихся проектированием и эксплуатацией релейной защиты и автоматики электрических сетей, промышленных и сельскохозяйственных объектов, а также может быть использована студентами электроэнергетических специальностей вузов и техникумов.

**К 30311-046**  
**051(01)-80** — 71-80.     **2302040000**

**ББК 31.27-05**

**6П2.1.081**

© Издательство «Энергия», 1980 г.

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Расчет допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты является одним из этапов проектирования релейной защиты и автоматики электроэнергетических объектов. Аналогичные расчеты проводятся в условиях эксплуатации и наладки релейной защиты.

В последние годы выполнен большой объем научно-исследовательских и методических работ для создания инженерных методов расчета допустимых нагрузок на трансформаторы тока и выбора оптимальных сечений жил контрольного кабеля. Необходимость проведения исследований связана с резким увеличением уровней токов короткого замыкания в современных энергосистемах и возрастанием нагрузок в токовых цепях вследствие увеличения длин контрольных кабелей и количества релейной аппаратуры. В результате приходится либо резко увеличивать сечение жил контрольного кабеля, либо допускать в некоторых режимах снижение точности работы трансформаторов тока. С точки зрения экономических факторов последнее предпочтительней, однако снижение точности не должно ухудшать эффективность функционирования устройств релейной защиты. Поэтому необходим дифференцированный подход к расчетам допустимых нагрузок в зависимости от вида защиты и применяемой релейной аппаратуры.

В настоящей книге рассмотрен комплекс вопросов, связанных с расчетами допустимых нагрузок и выбором сечения жил контрольного кабеля в токовых цепях релейной защиты. Для обоснования принятых решений кратко рассмотрены основные методы расчета трансформаторов тока и дана их сравнительная оценка. Исследовано поведение релейной аппаратуры при искаженной форме кривой тока, вызванной насыщением магнитопровода трансформаторов тока. Такой комплексный подход позволил сформулировать расчетные условия для выбора нагрузок, а также определить критерии, ограничивающие предельную нагрузку на трансформаторы тока.

Изложенная в данной книге методика была обсуждена научно-технической общественностью и применяется на практике.

Разделы книги, содержащие описание новой методики, иллюстрированы примерами расчета сечений жил контрольного кабеля в токовых цепях релейной защиты разных типов. Приведен справочный материал по трансформаторам тока, частично заимствованный из информационных материалов и частично полученный из типовых испытаний трансформаторов тока. Теоретические выкладки представлены в объеме, минимально необходимом для обоснования принципиальных положений методики расчетов. Более детальное изучение материалов может быть выполнено по источникам, на которые даются ссылки.

Основной материал книги базируется на обобщении ряда работ, выполненных авторами в научно-исследовательской электротехнической лаборатории Горьковского отделения института «Энергосетьпроект» (ГО ЭСП).

Авторы благодарны инженерам А. Ф. Барталогу, В. Я. Блинкову и А. З. Вильницу за предоставление результатов типовых испытаний трансформаторов тока и их заводских характеристик, рецензенту книги канд. техн. наук М. А. Шабаду и редактору канд. техн. наук Л. С. Зисману за полезные замечания и советы, которые способствовали улучшению книги.

Авторы признательны инж. С. М. Куцовскому, принимавшему участие в выполнении расчетов, и техн. Л. Г. Приемышевой за помощь, оказанную при оформлении рукописи.

Раздел «Введение», гл. 1 и 2 написаны Э. М. Либерзоном; гл. 3 и приложения — Е. П. Королевым; гл. 4 написана авторами совместно.

Все замечания и пожелания по улучшению книги авторы просят направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия».

*Авторы*

## ВВЕДЕНИЕ

Измерительные органы подавляющего большинства устройств релейной защиты от к. з. реагируют на токи или различные сочетания токов и напряжений в защищаемом присоединении. Заданный уровень тока в защите и изоляция ее цепей от системы высокого напряжения обеспечиваются первичными измерительными преобразователями тока [1]. Первичные измерительные преобразователи тока имеют ряд разновидностей. Наиболее широкое применение в настоящее время получили трансформаторы тока (ТТ) с замкнутым ферромагнитным магнитопроводом. Отечественная промышленность серийно выпускает большое число ТТ различных типов и напряжений, конструкции которых достаточно подробно описаны в [2].

По первичной обмотке ТТ проходит ток, подлежащий трансформации, по вторичной, замкнутой на некоторое сопротивление, — вторичный ток, примерно пропорциональный первичному. Основная особенность ТТ, как электрического аппарата, состоит в том, что нормальным для него является режим с малым сопротивлением нагрузки, т. е. режим, близкий к к. з. вторичной цепи. Сопротивление вторичной цепи и первичный ток являются основными параметрами, которые определяют погрешности ТТ в условиях эксплуатации. При рабочих токах индукция в магнитопроводе ТТ невелика (обычно доли тесла), а при к. з. возрастает и в зависимости от нагрузки и кратности тока к. з. может достигать больших значений, близких к индукции насыщения магнитопровода. Вследствие насыщения магнитопровода в этих случаях увеличивается погрешность трансформации, что нежелательно с точки зрения точности работы измерительных органов защиты. Поэтому первое условие при расчете нагрузок на ТТ заключается в том, чтобы в случае повреждений в определенных (расчетных) точках сети ТТ работал с допустимой погрешностью

(обычно не более 10% по току в установившемся режиме).

Для некоторых режимов, например при к. з. в начале защищаемых линий, когда уровень токов выше, чем при к. з. в расчетных точках, устойчивость функционирования защиты часто не нарушается, если ТТ работает с погрешностью, значительно большей 10%. Однако учитывая, что эти режимы характеризуются увеличением угловых погрешностей и искажением формы кривой вторичного тока вследствие насыщения магнитопровода ТТ, не исключается возможность излишних срабатываний направленных защит или отказов в срабатывании токовых защит. Поэтому второе условие при расчете ТТ состоит в том, чтобы обеспечивались устойчивость срабатывания измерительных органов защиты при искаженной форме кривой тока в случае близких внутренних к. з. и селективность несрабатывания защиты при внешних к. з. Третье расчетное условие заключается в предотвращении перенапряжений на вторичных обмотках ТТ.

Выбор нагрузки на ТТ, исходя из трех перечисленных расчетных условий, и составляет суть новой методики (в прежней методике выбор нагрузок, как правило, осуществлялся только по первому условию).

Для определения критериев выполнения второго расчетного условия применительно к устройствам защиты различных типов необходимо провести комплексное исследование системы ТТ — устройство релейной защиты. Такой подход позволяет не только определить предельные допустимые погрешности ТТ применительно к конкретным защитами и составить расчетные условия для выбора нагрузок, но и сформулировать дополнительные технические требования к аппаратуре.

# ГЛАВА ПЕРВАЯ

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПОГРЕШНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

### 1-1. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

К номинальным параметрам ТТ относятся: номинальное напряжение  $U_{\text{ном}}$ ; номинальная частота  $f_{\text{ном}}$ ; номинальный первичный ток  $I_{1\text{ном}}$ ; номинальный вторичный ток  $I_{2\text{ном}}$ ; номинальный коэффициент трансформации  $n_{\text{ном}} = I_{1\text{ном}}/I_{2\text{ном}}$ ; номинальная вторичная нагрузка — значение вторичной нагрузки с коэффициентом мощности 0,8, при которой ТТ гарантируется класс точности или предельная кратность; номинальный класс точности вторичной обмотки; номинальная предельная кратность вторичной обмотки для защиты  $K_{\text{ном}}$  — отношение наибольшего первичного тока к его номинальному значению, при котором полная погрешность не превышает заданного значения для номинальной вторичной нагрузки.

Полная погрешность ТТ, %, в условиях установившегося режима выражается формулой

$$\varepsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (n_{\text{ном}} i_2 - i_1)^2 dt}, \quad (1-1)$$

где  $i_1$ ,  $i_2$  — мгновенные первичный и вторичный токи соответственно;  $T$  — длительность периода тока;  $I_1$  — действующий первичный ток.

Выражение под радикалом является квадратом действующего тока намагничивания, протекающего в первичной обмотке ТТ, поэтому полную погрешность можно рассматривать как действующий ток намагничивания, выраженный в %:

$$\varepsilon = \frac{I_0}{I_1} 100, \quad (1-2)$$

где  $I_0$  — действующий ток намагничивания.

Экспериментальное определение полной погрешности производится по схеме на рис. 1-1, рекомендованной [3] и [4]. В этой схеме амперметр  $A_1$  измеряет вторичный ток образцового ТТ (ОТТ), амперметр  $A_2$  — разность токов образцового и испытуемого ТТ (ИТТ), т. е. ток  $I_0$ .

По [3] номинальная предельная кратность обмоток для релейной защиты приводится при полной погрешности, равной 10% ( $K_{10ном}$ ); в соответствии с [4] обмотки для релейной защиты могут иметь класс точно-

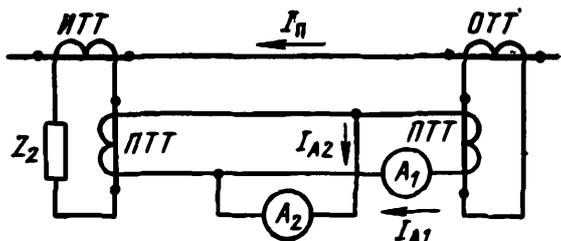


Рис. 1-1. Схема испытаний трансформаторов тока.

сти 5Р или 10Р (цифра характеризует полную погрешность при токе номинальной предельной кратности). Для обмоток класса 5Р номинальная предельная кратность будет приводиться при полной погрешности 5% ( $K_{5ном}$ ).

Наряду с полной погрешностью ТТ  $\varepsilon$  при расчетах используется токовая погрешность  $f$ , %, определяемая по формуле

$$f = \frac{I_2 - \frac{I_1}{n_{ном}}}{\frac{I_1}{n_{ном}}} 100 = \frac{n_{ном} I_2 - I_1}{I_1} 100, \quad (1-3)$$

где  $I_2$  — действующий вторичный ток.

Сдвиг фаз между первичным и вторичным токами характеризуется угловой погрешностью ТТ. В соответствии с [3] угловая погрешность ТТ  $\delta$  — угол между векторами первичного и вторичного токов при таком выборе их направлений, когда при отсутствии угловой погрешности этот угол равен нулю.

Следует еще раз подчеркнуть, что приведенные выше определения погрешностей относятся к установившимся режимам работы ТТ, причем понятие угловой погрешности, строго говоря, имеет смысл, когда первичный и вторичный токи синусоидальны. Для анализа работы ТТ в переходных процессах, а также в установившихся режимах, сопровождающихся глубоким на-

сыщением магнитопроводов ТТ, когда форма вторичного тока существенно искажена и отличается от синусоидальной, вводятся дополнительные понятия погрешностей, характеризующих те или иные соотношения между первичными и вторичными токами ТТ.

В некоторых конструкциях ТТ может иметь место несоответствие между действительным (витковым) и номинальным коэффициентами трансформации вследствие витковой коррекции. Витковая коррекция осуществляется с целью уменьшения погрешности обмоток ТТ, предназначенных для питания измерительных приборов. Такая коррекция может не учитываться при расчетах, если вносимая ею погрешность не превышает 1%. Когда действительное число витков вторичной обмотки неизвестно, но известен ее класс точности, указываемый предприятием-изготовителем, то наибольшее отличие числа витков от номинального значения в процентах может быть равно числу, обозначающему класс точности этой обмотки. Отсюда следует, что для обмоток класса 0,5 и 1,0 витковую коррекцию при расчетах допустимых нагрузок в токовых цепях защиты можно не учитывать. Далее рассматриваются основные методы расчета погрешностей ТТ.

## 1-2. МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СИНУСОИД

Для анализа процессов в двухобмоточном ТТ удобно использовать электрическую схему замещения (рис. 1-2,а). В этой схеме  $R_{1п}$ ,  $L_{1п}$  — соответственно активное сопротивление и индуктивность рассеяния первичной обмотки;  $R_{2в}$ ,  $L_{2в}$  — то же вторичной обмотки;  $R_{н}$ ,  $L_{н}$  — активное сопротивление и индуктивность нагрузки;  $R_0$ ,  $L_0$  — то же ветви намагничивания. Сопротивление  $R_0$  вводится для учета потерь на вихревые токи в магнитопроводе ТТ.

Поскольку параметры первичной цепи не влияют на токораспределение в схеме (их значение пренебрежимо мало по сравнению с параметрами других элементов первичной цепи), для расчетов обычно пользуются упрощенной схемой замещения (рис. 1-2,б), в которой иногда дополнительно пренебрегают сопротивлением потерь на вихревые токи (полагают  $R_0 = \infty$ ).

Наиболее широкое распространение получил метод расчета погрешностей ТТ, основанный на замене дейст-

вительных несинусоидальных кривых тока и напряжения (несинусоидальность вызвана нелинейностью характеристики намагничивания магнитопровода ТТ) эквивалентными им по действующему значению синусоидальными величинами (метод эквивалентных синусоид — МЭС). При этом появляется возможность записи уравнений в комплексной форме и построении векторных диаграмм. Взаимосвязь между токами в расчетной схеме замещения (рис. 1-2,б) определяется с помощью вольт-амперной характеристики намагничивания (ВАХ),

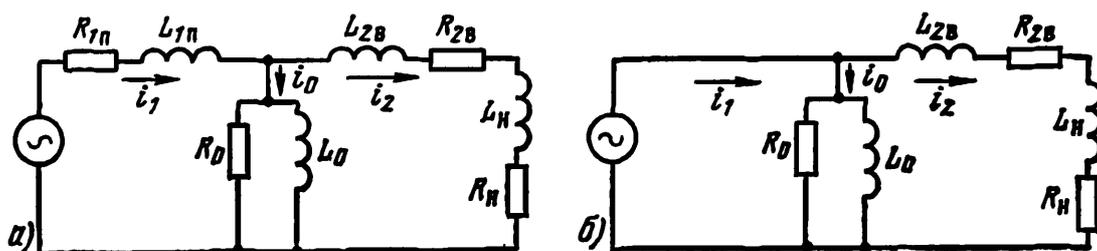


Рис. 1-2. Схемы замещения ТТ.

а — полная; б — упрощенная.

снятой со стороны вторичной обмотки ТТ при практически синусоидальном напряжении.

Векторная диаграмма ТТ, соответствующая схеме замещения рис. 1-2,а, приведена на рис. 1-3. Она построена в предположении, что все сопротивления линейны и поэтому при синусоидальном первичном токе синусоидальны и все другие величины. Для построения векторной диаграммы задаются условными направлениями токов. За положительные направления токов  $I_1$  и  $I_2$  принимают их направления, соответствующие маркировке зажимов обмоток ТТ, а именно [3]: при направлении тока в первичной обмотке от начала  $L_1$  к концу  $L_2$  вторичный ток проходит по внешней цепи от  $I_1$  к  $I_2$ .

У ТТ, работающего без погрешности (ток намагничивания  $i_0=0$ ), алгебраическая сумма  $I_1\omega_1$  и  $I_2\omega_2$  ( $\omega$  — число витков) первичной и вторичной обмоток равна нулю. Если принять противоположные положительные направления для токов  $I_1$  и  $I_2$ , получим:

$$I_1\omega_1 - I_2\omega_2 = 0. \quad (1-4)$$

При построении векторных диаграмм в технике релейной защиты для удобства обычно принимают противоположное положительное направление токов  $I_1$  и  $I_2$  [1], т. е. направление действительного тока  $I$  изменяют

на противоположное. В этом случае токи  $I_1$  и  $I_2$  совпадают по фазе (при  $I_0=0$ ). За исходный принимается вектор тока  $I_2$ . Все величины приводятся к числу витков вторичной обмотки. По известным значениям сопротивлений ветви вторичного тока определяются: напряжение на зажимах вторичной обмотки

$$\dot{U}_2 = I_2 Z_{\text{н}} = I_2 (R_{\text{н}} + jX_{\text{н}}); \quad (1-5)$$

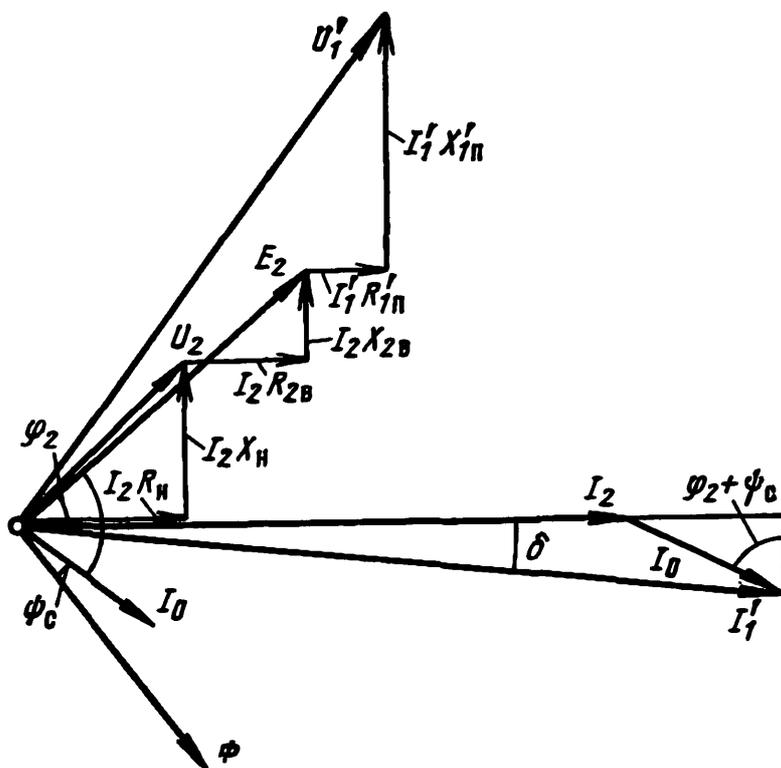


Рис. 1-3. Векторная диаграмма трансформатора тока.

э. д. с., индуцируемая на вторичной обмотке ТТ,

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + I_2 Z_{2\text{в}} = \dot{U}_2 + I_2 (R_{2\text{в}} + jX_{2\text{в}}), \quad (1-6)$$

где  $X_{\text{н}} = \omega L_{\text{н}}$ ;  $X_{2\text{в}} = \omega L_{2\text{в}}$ ;  $\omega$  — угловая частота; сдвиг фаз между  $\dot{E}$  и  $I_2$ :

$$\varphi_s = \text{arctg} \frac{X_{2\text{в}} + X_{\text{н}}}{R_{2\text{в}} + R_{\text{н}}}. \quad (1-7)$$

Поток в магнитопроводе ТТ  $\dot{\Phi}$  отстает от  $\dot{E}_2$  на  $90^\circ$  ( $\dot{\Phi}$  принят отстающим от  $\dot{E}_2$  в силу условия противоположности направлений токов  $I_1$  и  $I_2$ ). Для создания

потока необходим ток намагничивания  $I_0$ , опережающий  $\Phi$  на угол потерь в стали  $\Psi_c$ :

$$\Psi_c = \operatorname{arctg} \frac{X_0}{R_0}, \quad (1-8)$$

где  $X_0$ ,  $R_0$  — соответственно индуктивное и активное (потерь) сопротивление ветви намагничивания в схеме замещения ТТ.

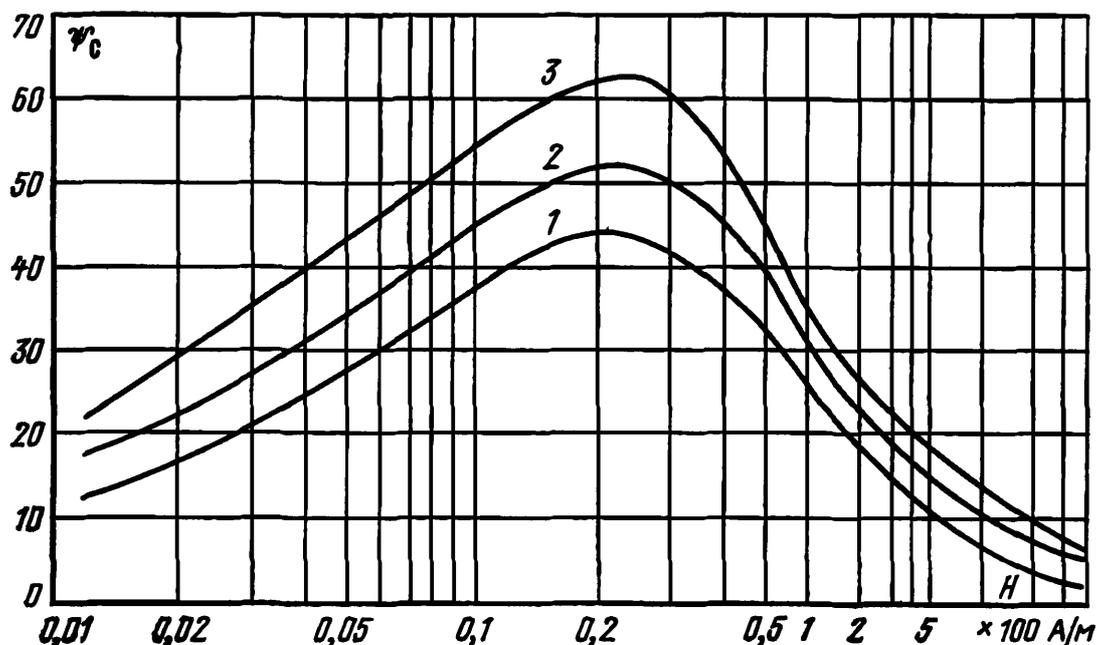


Рис. 1-4. Зависимости угла потерь в трансформаторе тока от напряженности поля.

Зависимость угла потерь от напряженности магнитного поля для магнитопроводов из холоднокатаной стали марки Э-310 приведена на рис. 1-4.

Магнитные характеристики для стали одной и той же марки имеют заметный технологический разброс. Кривая 1 относится к стали с худшими характеристиками, 3 — с лучшими. При расчетах часто используют усредненную кривую 2.

Первичный ток, приведенный к числу витков вторичной обмотки,

$$I'_1 = I_2 + I_0. \quad (1-9)$$

Определение тока  $I_0$  при известных параметрах ТТ, нагрузки и первичных токов производится по ВАХ ТТ с помощью зависимости  $B = f(H)$ , где  $B$  — индукция в магнитопроводе ТТ,  $H$  — напряженность магнитного

поля. Угол  $\delta$  между векторами  $I'_1$  и  $I_2$  на векторной диаграмме характеризует угловую погрешность ТТ.

Из векторной диаграммы могут быть определены значения полной  $\varepsilon$ , токовой  $f$  и угловой  $\delta$  погрешностей ТТ:

$$\varepsilon = 100 I_0 / I'_1, \quad (1-10)$$

$$f \approx -100 \frac{I_0}{I'_1} \sin(\varphi_2 + \Psi_c); \quad (1-11)$$

$$\delta \approx \arcsin \left[ \frac{I_0}{I'_1} \cos(\varphi_2 + \Psi_c) \right]. \quad (1-12)$$

Формулы (1-11) и (1-12) получены без учета витковой коррекции при условии

$$I_2 + I_0 \sin(\varphi_2 + \Psi_c) \approx I'_1, \quad (1-13)$$

что допустимо при малых  $\delta$ .

Из (1-10, 1-11) определяется соотношение между  $f$  и  $\varepsilon$ :

$$f \approx -\varepsilon \sin(\varphi_2 + \Psi_c). \quad (1-14)$$

Таким образом, по векторной диаграмме могут быть определены все основные погрешности ТТ в установившемся режиме работы. Метод эквивалентных синусоид в течение многих лет используется при конструировании ТТ, выборе допустимых нагрузок, определении токовых, полных и угловых погрешностей. Расчеты, выполненные по МЭС, подтверждаются экспериментальными данными в тех случаях, когда ТТ работает с погрешностями  $f < 10-15\%$ . Использование МЭС для расчетов ТТ в режимах, когда  $f > 15\%$ , приводит к ошибкам, возрастающим с увеличением абсолютного значения  $f$ . Эти ошибки вызваны следующим. На зависимость действующего тока намагничивания  $I_0$  от действующего напряжения, используемую в расчетах для определения тока  $I_0$ , существенное влияние оказывает форма токов и напряжений, при которых она снимается [5, 6]. На рис. 1-5 приведены ВАХ ТТ типа ТФНД-110, снятые при синусоидальном токе (1) или синусоидальном напряжении (2) [6]. Кривая 1 проходит значительно выше кривой 2. Очевидно, что для получения приемлемой точности расчета условия определения ВАХ должны соответствовать режиму работы ТТ. При  $f < 10-15\%$  искажения формы кривой тока  $I_2$  невелики и для линейной нагрузки при синусоидальном токе  $I_1$  напряжение  $U_2$  практически си-

нусоидально. Расчеты по МЭС в этом случае (с использованием ВАХ, снятой при практически синусоидальном напряжении) дают приемлемую точность. При  $f > 10-15\%$  форма  $U_2$  заметно искажается, ВАХ смещается тем сильнее, чем больше отличие формы  $U_2$  от синусоидальной, что приводит к заметным расчетным ошибкам. Так, например, допустимая нагрузка на ТТ типа ТВ-35-220/5, рассчитанная по кривым 50%-ной кратности, построенным по МЭС, в 1,35—1,6 раза меньше, чем полученная из опыта.

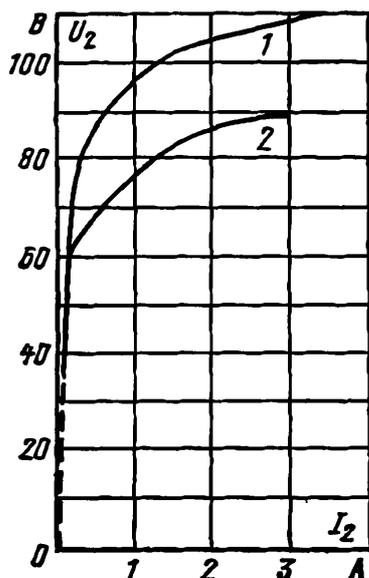
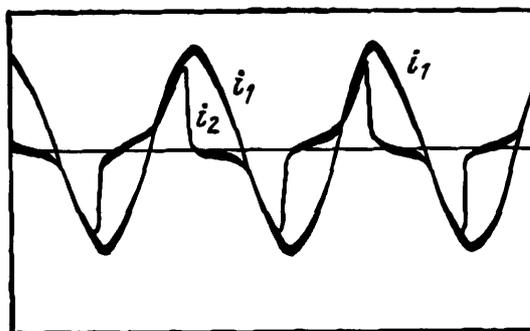


Рис. 1-5. Вольт-амперные характеристики трансформатора тока.

Рис. 1-6. Осциллограммы токов трансформатора тока типа ТВ-35,  $n_{ном} = 200/5$  при активной нагрузке,  $f = 48\%$ ,  $\delta = 45^\circ$  (по первой гармонике).



Если в расчетах используется зависимость  $B_{max} = f(H)$ , то  $B_{max}$  определяется из соотношения

$$B = \frac{U_2}{4K_\phi Q \omega_2 \nu}, \quad (1-15)$$

где  $Q$  — сечение магнитопровода,  $m^2$ ;  $\nu$  — частота переменного тока, Гц;  $K_\phi$  — коэффициент формы кривой напряжения  $U_2$ . При синусоидальном напряжении  $K_\phi = 1,11$  и из (1-15) можно определить  $B$ . При несинусоидальном напряжении  $K_\phi \neq 1,11$ , причем по методу МЭС невозможно определить значение  $K_\phi$ , а следовательно, и  $B_{max}$ . При преобладающей активной внешней нагрузке в режимах  $f > 10\%$ , характеризующихся глубоким насыщением магнитопровода ТТ,  $K_\phi > 1,11$ .

Для иллюстрации степени искажения формы кривой тока на рис. 1-6 приведена осциллограмма, снятая при испытаниях ТТ в реальных условиях при высокой кратности тока к. з. ( $K \approx 15$ ). Для кривой  $i_2$ ,  $K_\phi \approx 1,45$ . При

увеличенном значении  $K_{\Phi}$  и прочих равных условиях (нагрузка, ток  $I_1$ ) индукция в магнитопроводе ТТ, а следовательно, и погрешности будут меньше рассчитанных по методу МЭС. Таким образом, расчет погрешностей ТТ по методу МЭС в режимах  $f > (10-15)\%$  приводит к существенным ошибкам, причем обычно погрешности, рассчитанные по МЭС, выше действительных, а допустимые нагрузки обмоток — ниже. Поэтому для расчетов ТТ в режимах  $f > 10\%$ , сопровождающихся глубоким насыщением стали магнитопровода, необходимо использование более точных методов расчета.

### 1-3. МЕТОД ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

В настоящее время разработано несколько инженерных методов расчета погрешностей ТТ при  $f > 10\%$ . Наибольшее распространение получил метод с использованием прямоугольной характеристики намагничивания (ПХН) [7, 8]. Метод основан на следующих допущениях.

1. Потери в стали на вихревые токи и гистерезис не учитываются.

2. В расчете используется средняя кривая намагничивания  $B=f(H)$  (рис. 1-7,а), которая аппроксимируется тремя отрезками прямых линий (рис. 1-7,б): вертикальным при  $|B| \leq |B_s|$ ,  $H=0$  и горизонтальным при  $|B|=B_s$ ,  $|H| > 0$  (здесь  $B_s$  — условная индукция насыщения магнитопровода ТТ).

Учет потерь в стали необходим при анализе режимов работы ТТ с разомкнутой вторичной обмоткой, например при определении перенапряжений на ее зажимах. В режимах, когда вторичная обмотка замкнута на небольшое сопротивление, влиянием сопротивления  $R_0$  в схеме замещения можно пренебречь, так как ток потерь в  $10^2-10^3$  раз меньше тока нагрузки [9].

Простейшая кусочно-линейная аппроксимация характеристики намагничивания часто используется при приближенном анализе устройств с ферромагнитными сердечниками, в частности, магнитных усилителей. Основное достоинство такой аппроксимации — предельное упрощение расчетов при сохранении приемлемой точности, наглядность интерпретации физических процессов.

Физический смысл использования ПХН для расчетов

ТТ состоит в том, что каждый полупериод процесса трансформации токов разбивается на участки точной трансформации, когда потокосцепление (индукция) меняется в конечных пределах  $\pm\Psi_s$  ( $\pm B_s$ ), и участки отсутствия трансформации, когда потокосцепление не меняется ( $d\Psi/dt=0$ ). В интервале точной трансформации сопротивление ветви намагничивания  $X_0$  в схеме замещения ТТ бесконечно велико и ток нагрузки  $i_2$  равен

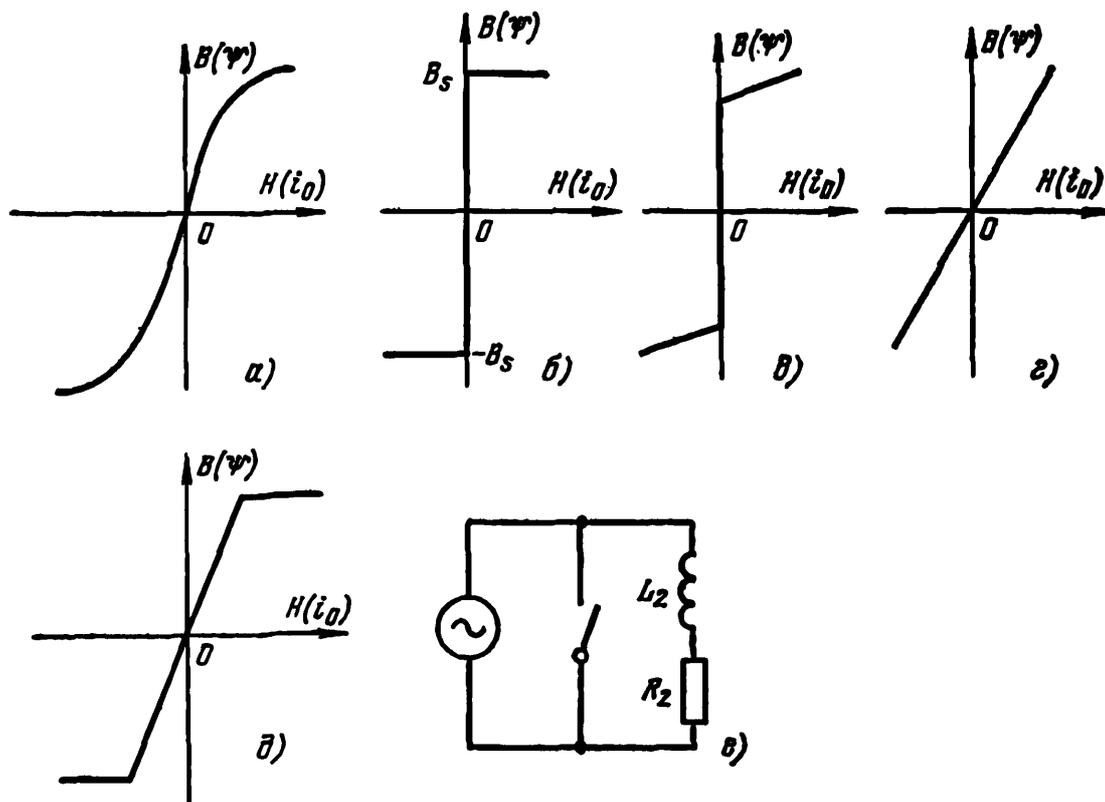


Рис. 1-7. Кривая намагничивания ТТ.

*a* — средняя; *б* — аппроксимация по методу ПХН; *в* — по методу СХН; *г* — линейная; *д* — по методу НХН; *е* — схема замещения ТТ с ПХН.

приведенному первичному току; в интервале отсутствия трансформации  $X_0=0$ ,  $i_2=0$ .

Схема замещения ТТ с ПХН приведена на рис. 1-7, *е*. В этой схеме  $L_2=L_{2в}+L_{н}$ ,  $R_2=R_{2в}+R_{н}$ , а ветвь намагничивания заменена ключом, замкнутым при насыщенном магнитопроводе ( $|\Psi| \geq \Psi_s$ ) и разомкнутым при отсутствии насыщения. Цель расчетов сводится к определению моментов коммутации ключа и последующему вычислению вторичных токов (действующего, среднего, амплитудного), угловой погрешности по первой гармонике, гармонического состава кривой тока и т. д. Следует отметить, что при искаженной форме кривой тока

токовые и полные погрешности ТТ различны для действующих, средних и амплитудных токов. Поэтому погрешности должны определяться в зависимости от параметра, на который реагируют измерительные органы защиты.

Кривые мгновенных значений токов и напряжений приведены на рис. 1-8. Участки А соответствуют интервалам времени, когда магнитопровод ТТ ненасыщен

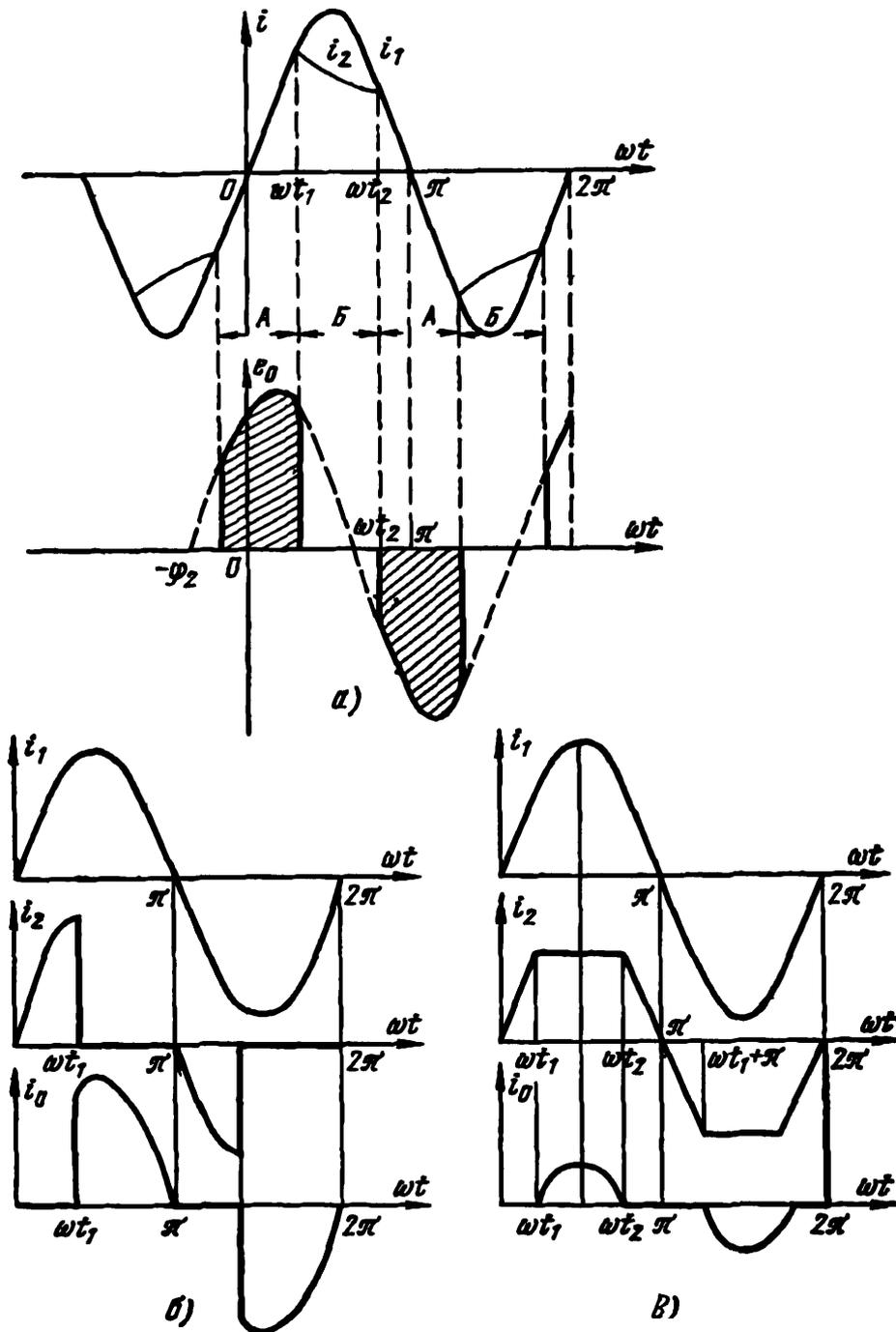


Рис. 1-8. Токи и напряжения ТТ с ПХН.

а — для активно-индуктивной нагрузки; б — для активной нагрузки; в — для индуктивной нагрузки.

(ключ разомкнут) и  $i_0=0$ . Вторичный ток равен приведенному первичному и при условии синусоидальности последнего:

$$i_2=i'_1=l'_{1max} \sin \omega t. \quad (1-16)$$

Электродвижущая сила трансформатора:

$$e_0=l'_{1max}Z_2 \sin(\omega t + \varphi_2). \quad (1-17)$$

Участки *Б* соответствуют интервалам времени, когда магнитопровод ТТ насыщен. Насыщение наступает в момент  $t_1$  (подлежащий вычислению), после чего затухание вторичного тока происходит по экспоненциальному закону с постоянной времени вторичной цепи

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{X_2}{\omega R_2}. \quad (1-18)$$

В момент  $t_1$  появляется ток намагничивания

$$i_0=i'_1-i_2. \quad (1-19)$$

В момент  $t_2$  ток намагничивания снижается до нуля, ключ размыкается и начинается изменение потокосцепления по ненасыщенному (вертикальному) участку характеристики намагничивания.

Определение токовой погрешности производится по (1-3), при этом вторичный ток зависит от ряда параметров

$$I_2=f(I_1, T_2, \Psi_s, Z_2, n_H); \quad (1-20)$$

токовая погрешность

$$f=\Psi(\omega t_1, \omega t_2). \quad (1-21)$$

Значения углов  $\omega t_1$  и  $\omega t_2$  определяют, исходя из равенства вольт-секундных площадей в течение каждого полупериода. Наиболее простые соотношения получаются при двух крайних случаях работы ТТ:

чисто активном сопротивлении вторичной ветви ( $L_2=0$ ;  $R_2>0$ );

чисто индуктивном сопротивлении ( $R_2=0$ ;  $L_2>0$ ).

В первом случае токовая погрешность [7, 8] будет равна:

$$f = \left( \sqrt{\frac{2\omega t_1 - \sin 2\omega t_1}{2\pi}} - 1 \right) 100. \quad (1-22)$$

Для инженерных расчетов удобно ввести обобщенный коэффициент

$$C = \frac{\Psi_s \omega}{I'_{1max} R_2} = \frac{222 B_s Q \omega^2}{R_2 I_1 \omega_1}, \quad (1-23)$$

связанный с углом  $\omega t_1$  соотношением

$$\cos \omega t_1 = 1 - 2C. \quad (1-24)$$

Из (1-24) следует, что токовую погрешность при активной нагрузке можно рассматривать как функцию только обобщенного коэффициента  $C$  (рис. 1-9, кривая 1).

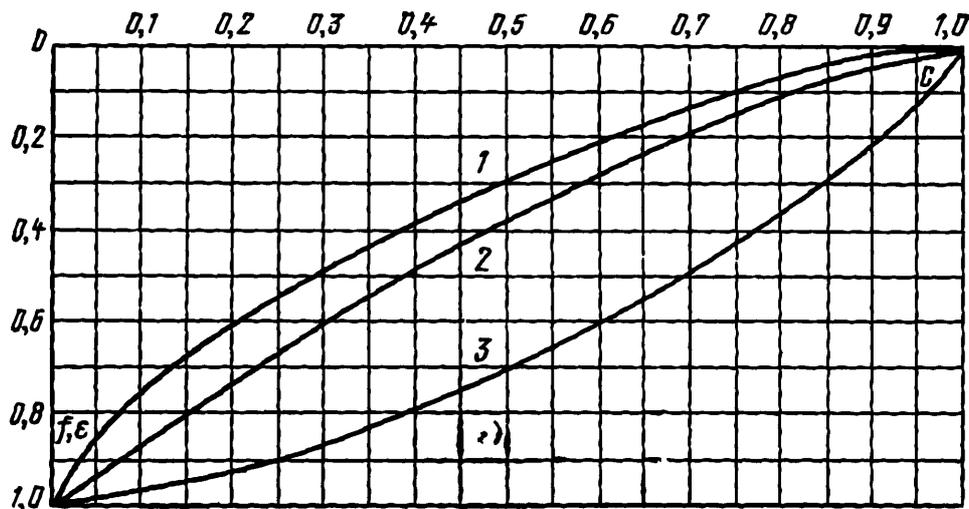


Рис. 1-9. Зависимости токовой и полной погрешностей ТТ (отн. ед.) от обобщенного параметра  $C$ .

1 —  $f$  для активной и  $\epsilon$  для индуктивной нагрузки; 2 —  $f$  для индуктивной нагрузки; 3 —  $\epsilon$  для активной нагрузки.

Во втором случае токовая погрешность

$$f = \left( \sqrt{\frac{2\omega t_1 - \sin 2\omega t_1 + 2(\pi - 2\omega t_1) \sin^2 \omega t_1}{\pi}} - 1 \right) 100. \quad (1-25)$$

Таким образом, и при индуктивной нагрузке токовая погрешность также является функцией единственного аргумента — угла  $\omega t_1$  (рис. 1-9, кривая 2).

Определение угловых погрешностей и гармонического состава кривой тока. При синусоидальном первичном токе и несинусоидальном вторичном  $\delta$  определяется как угол сдвига между первичным током и первой гармоникой вторичного тока [5]. Если  $R_2=0$ ,  $L_2>0$ , первые гармоники  $I_2$  и  $I_0$  совпадают по фазе с первичным током, т. е.  $\delta=0$ . При  $L_2=0$ ,  $R_2>0$  угловая погрешность наибольшая (для неизменного  $Z_2$ ). Для определения  $\delta$  кри-

вую  $i_2(t)$  необходимо разложить на составляющие, выделив первую гармонику.

Когда  $R_2 > 0$ ,  $L_2 = 0$  [7]:

$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{1 - \cos 2\omega t_1}{2\omega t_1 - \sin 2\omega t_1}. \quad (1-26)$$

Из (1-26) следует, что при неизменном характере нагрузки  $\delta$  однозначно связана с  $\omega t_1$  и может быть представлена как функция  $C$ . Зависимость  $\delta(f)$  при активной и активно-индуктивной нагрузке приведена на рис. 1-10.

Важным достоинством метода ПХН является возможность построения зависимостей, характеризующих работу ТТ, в функции от одного аргумента — обобщенного коэффициента  $C$ . Такие универсальные характеристики погрешностей ТТ с ПХН при синусоидальном первичном токе и активно-индуктивной нагрузке приведены в [8] (в этих работах коэффициент  $C$ , обозначен  $A_z$ ).

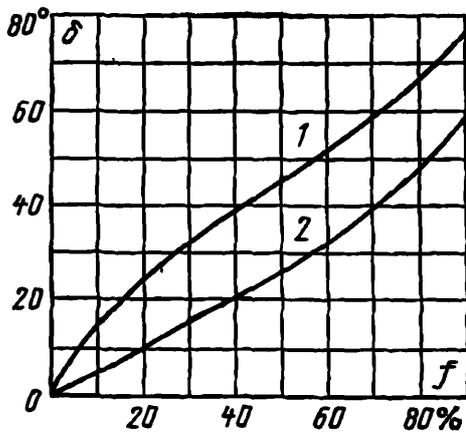


Рис. 1-10. Зависимость  $\delta(f)$  для ТТ с ПХН.

1 — при активной нагрузке; 2 — при активно-индуктивной нагрузке с  $\cos \varphi_2 = 0,8$ .

Для расчетов конкретных ТТ по методу ПХН необходимо располагать значениями  $B_s$ . Поскольку реальные ТТ имеют характеристику намагничивания, отличную от идеально-прямоугольной, индукции  $B_s$  является

чисто расчетным параметром и отличается от индукции насыщения ТТ, достигаемой при  $H > (5-10) \cdot 10^4$  А/м. В расчетах магнитных усилителей с использованием ПХН иногда  $B_s$  определяют в точке пересечения ветвей предельной динамической петли. Применительно к ТТ были проведены исследования [10], в результате которых рекомендованы следующие примерные значения  $B_s$ :

для ТТ, магнитопроводы которых выполнены из стали марок Э-41—Э-42,  $B_s = 1,2-1,6$  Т, для магнитопроводов из стали марок Э-310—Э-330  $B_s = 1,5-1,8$  Т.

Меньшие значения  $B_s$  рекомендуется использовать в расчетах действующих токов для ТТ со штампованными магнитопроводами, средние значения  $B_s$  (соответственно 1,4 и 1,65 Т) при определении действующих токов

ТТ с ленточными магнитопроводами, а наибольшие значения  $B_s$  (соответственно 1,6 и 1,8 Т) при расчете среднего тока. Рекомендации относятся к режимам, когда  $f > 15+20\%$  и реальная индукция в магнитопроводе ТТ  $B \geq B_s$ . При высоких кратностях тока к. з. для многовитковых ТТ это условие практически всегда выполняется.

Как показали эксперименты и моделирование на аналоговой ЭВМ, точность метода ПХН для ТТ с магнитопроводом из холоднокатаной стали в указанных режимах составляет  $\pm 10\%$ , что вполне приемлемо для инженерных расчетов. Следует отметить, что магнитопроводы большинства ТТ 6—750 кВ изготавливаются из холоднокатаных сталей марок Э-310—Э-370 (или импортных сталей с примерно аналогичными характеристиками).

В последние годы были разработаны и другие методы расчета ТТ в установившихся режимах. Основные из этих методов кратко рассмотрены ниже.

#### 1-4. МЕТОД СПРЯМЛЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Метод расчета погрешностей ТТ с использованием характеристики намагничивания, аппроксимированной тремя отрезками прямых линий с наклоном в области насыщения магнитопровода (см. рис. 1-7,в), был разработан в [5, 11, 12] и назван методом СХН. У ТТ с СХН в схему замещения последовательно с ключом (см. рис. 1-7,е) включена индуктивность (на схеме не показана), сопротивление которой  $X_{0s}$  оказывает влияние на токораспределение. Режим работы ТТ с СХН характеризуется следующими параметрами [11]:

а) коэффициентом  $C$ ; б) постоянной времени вторичной цепи  $T_2 = L_2/r_2$ ; в) отношением

$$\theta = Z_2/X_{0s}. \quad (1-27)$$

Первые два из указанных параметра используются и при расчете ТТ по методу ПХН. Анализ свидетельствует [12], что при  $\theta > 20$  результаты расчета по методу СХН и ПХН практически совпадают. Для большинства ТТ, магнитопроводы которых выполнены из холоднокатаных сталей, при нагрузках, соответствующих  $\varepsilon > 10+15\%$ , условие  $\theta > 20$  в основном выполняется, и для расчетов погрешностей ТТ по интегральным значениям токов целесообразно использовать более простой метод ПХН. Метод СХН можно рекомендовать для рас-

четов угловых погрешностей ТТ по переходу через нулевое значение тока или заданный его уровень, а также в режимах кратностей тока, если  $z_2$  мало и  $\theta < 20$ .

### 1-5. МЕТОД БАЗИСНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Метод базисных параметров предложен проф. А. Д. Дроздовым [13]. По этому методу строится зависимость между кратностью первичного тока

$$K_* = K / K_6$$

и сопротивлением вторичной цепи

$$Z_{2*} = Z_2 / Z_{26}$$

при  $f = \text{const}$  и  $U_* = K_* Z_{2*} = \text{const}$ , (1-28)  
где

$$U_* = V_{\text{max}} / V_{\text{max6}} = 1;$$

$K_6, Z_{26}$  — базисные величины, которые должны приводиться в каталогах.

Из (1-28) имеем

$$Z_{2*} = 1 / K_* \quad (1-29)$$

Как показано в [12], метод базисных параметров может быть сведен к методу ПХН при  $C \leq 1,0$  и  $\theta > 20$ .

Следует отметить, что соотношение  $V_{\text{max}} = V_{\text{max6}}$ , положенное в основу метода базисных параметров, при  $\varepsilon \leq 10\%$  нарушается, так как  $V_{\text{max}}$  зависит от кратности тока к. з. и нагрузки. Поэтому рекомендуемая область использования этого метода, также как и метода ПХН — режимы при  $f > 10 + 15\%$ .

### 1-6. МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Методы физического моделирования являются наиболее точными и позволяют получить значения погрешностей ТТ в широком диапазоне изменения  $i_1$  и  $Z_2$ . Методика физического моделирования ТТ разработана институтом Электродинамики АН УССР [14]. Моделирование заключается в экспериментальном определении погрешностей на уменьшенных моделях, параметры которых в определенном масштабе соответствуют исследуемым ТТ. Критерии подобия при моделировании без изменения частоты источника питания для установив-

шегося режима ТТ с одинаковыми кривыми намагничивания имеют вид:

$$m_{I_{1уд}} = m_{I_{2уд}} = m_{R_{2уд}} = m_{L_{2уд}} = 1, \quad (1-30)$$

где  $I_{1уд}$ ,  $I_{2уд}$ ,  $R_{2уд}$ ,  $L_{2уд}$  — удельные значения соответственно первичного и вторичного токов, активного сопротивления и индуктивности вторичной ветви схемы замещения ТТ.

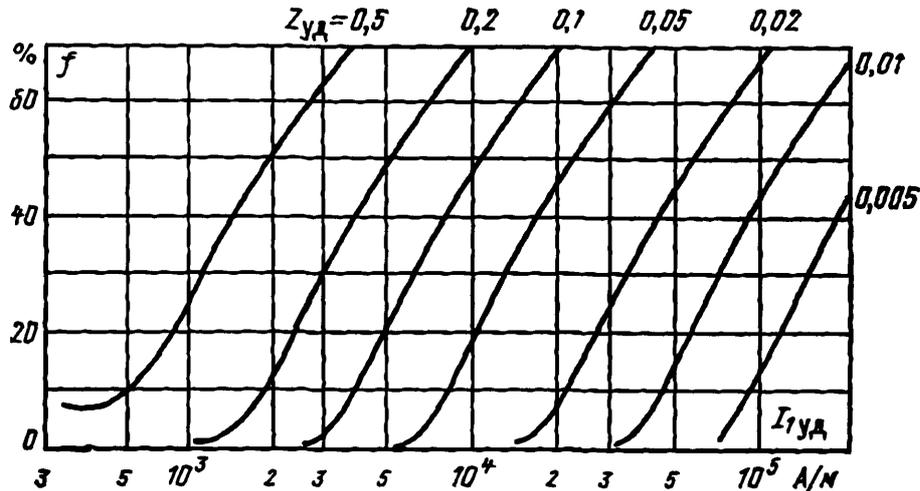


Рис. 1-11. Обобщенные характеристики токовой погрешности ТТ.

Удельные значения связаны с действительными следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} I_{1уд} &= I_1 \omega_1 / l; \\ I_{2уд} &= I_2 \omega_2 / l; \\ R_{2уд} &= R_2 l / Q \omega_2; \\ L_{2уд} &= L_2 l / Q \omega_2; \\ U'_{2уд} &= U_2 / Q \omega_2. \end{aligned} \right\} \quad (1-31)$$

Экспериментальные обобщенные характеристики для погрешности  $f$  в зависимости от  $I_{1уд}$ ,  $Z_{1уд}$  (рис. 1-11) приведены в [19]. Там же даны обобщенные характеристики других величин, необходимых при выполнении специальных расчетов. Все характеристики построены для основной кривой намагничивания ТТ, близкой к кривой намагничивания стали Э-310 с наилучшими магнитными характеристиками.

В тех случаях, когда известна реальная характеристика намагничивания ТТ и она существенно отличается

от основной, рекомендуется осуществлять пересчет допустимых нагрузок, найденных из обобщенных характеристик с помощью масштаба магнитной проницаемости по формуле

$$Z_{\text{зуд}} = Z_{\text{зуд, осн}} / m_{\mu}, \quad (1-32)$$

где

$$m_{\mu} = (B_{\text{мод}})_{H_6} / (B_{\text{ор}})_{H_6}; \quad (1-33)$$

$B_{\text{мод}}$ ,  $B_{\text{ор}}$  — соответственно индукция модели и оригинала при базисных значениях напряженности поля  $H_6$ .

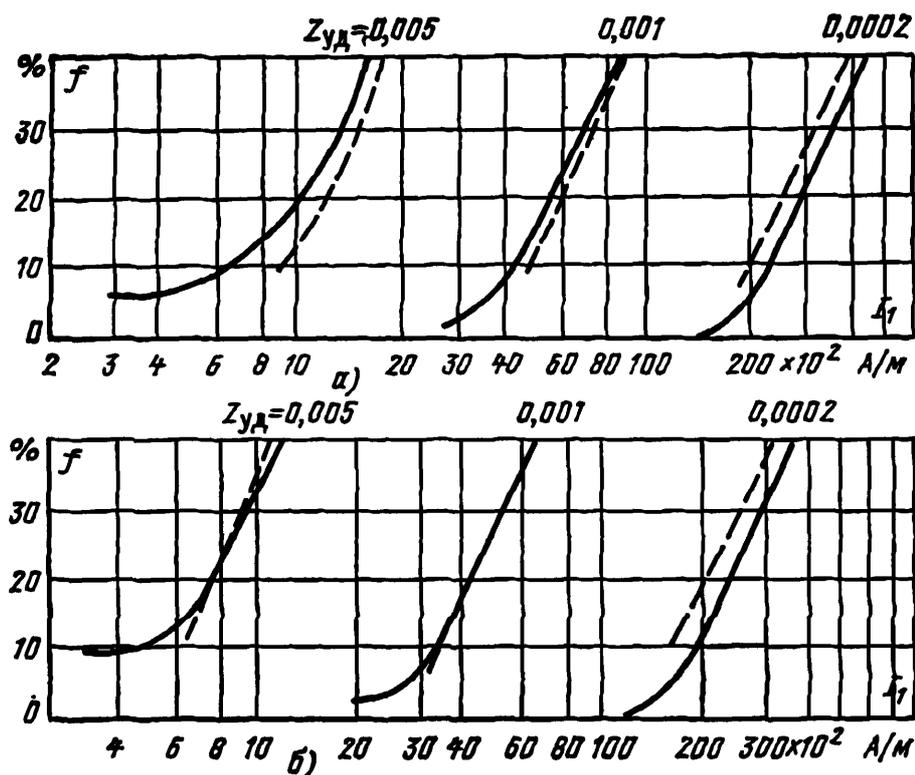


Рис. 1-12. Характеристики токовой погрешности ТТ, построенные по методу физического моделирования (сплошные линии) и методу ПХН (пунктирные линии).

Сравнение обобщенных характеристик с характеристиками, полученными по методу ПХН, свидетельствует о достаточно близком совпадении результатов при  $f > > 10-15\%$ ,  $C < 1$  (рис. 1-12). Между методами расчета по ПХН и физического моделирования можно установить взаимосвязь [12], выражаемую соотношением

$$C = \frac{E_{2\text{зуд}}}{I_{1\text{зуд}} Z_{\text{зуд}}}; \quad (1-34)$$

где  $E_{2\text{зуд}}$  — условная э. д. с. насыщения.

Из (1-34) следует, что параметром  $C$  можно характеризовать погрешности ТТ с реальной характеристикой намагничивания, представив зависимость  $f = F(I_{1уд}, Z_{2уд})$  в виде

$$f = F_1\left(\frac{E_{2суд}}{C}\right) = F_2(C). \quad (1-35)$$

Таким образом, при  $C < 1$  методы ПХН и физического моделирования дают близко совпадающие результаты: при  $C > 1$  метод ПХН не пригоден; следует применять МЭС или метод физического моделирования.

Метод математического моделирования с использованием аналоговых ЭВМ получил широкое распространение для анализа процессов в ТТ, преимущественно для исследований переходных процессов в ТТ, а также при анализе различных схем соединения вторичных обмоток ТТ. Методика анализа детально разработана [5, 9, 15]. Предложен ряд других методов расчета ТТ, например [16, 17], а также методы анализа системы «ТТ — защита» [18], которые используются в основном при разработке новой аппаратуры, исследованиях поведения устройств защиты при сложных электромагнитных переходных процессах в энергосистеме и т. д.

## 1-7. ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ

Из рассмотрения различных методов расчета ТТ можно сделать вывод, что с учетом удобства использования, простоты и универсальности при обеспечении приемлемой точности для расчетов ТТ в установившихся режимах наиболее широко целесообразно применять следующие методы:

1. Метод эквивалентных синусоид — для режимов работы ТТ с  $\epsilon \leq 10\%$ . Когда  $B < 1,3 \div 1,5$  Т, например, для встроенных ТТ с небольшим коэффициентом трансформации и малых кратностях тока к. з., МЭС пригоден и для расчета режимов с  $\epsilon > 10\%$ .

2. Метод ПХН — при  $\epsilon > 10 \div 15\%$ ,  $B > 1,5 \div 1,8$  Т. Оба эти метода использованы при расчетах и построении кривых предельных кратностей ТТ (см. П-2).

## 1-8. ТРЕБОВАНИЯ К ТРАНСФОРМАТОРАМ ТОКА ПО РЕКОМЕНДАЦИЯМ МЭК

Публикация МЭК по структуре близка к стандарту и состоит из следующих глав: общие требования ко всем ТТ, дополнительные требования к ТТ для измерений, дополнительные требования к ТТ для защиты.

Каждая глава содержит требования к характеристикам ТТ, нормы прямо-сдаточных и типовых испытаний, указания по маркировке.

Рекомендации МЭК учитываются при переработке ГОСТ [3], в частности, вводятся стандартные классы точности обмоток ТТ для защиты: 5Р и 10Р. Предельные значения погрешностей этих обмоток при номинальной вторичной нагрузке с  $\cos \varphi_2 = 0,8$  должны соответствовать табл. 1-1.

Таблица 1-1

Класс точности	Предельные значения погрешностей			
	при номинальном первичном токе			при токе номинальной предельной кратности
	Токовая погрешность, %	Угловая погрешность		
		мин	рад	
5Р	$\pm 1$	$\pm 60$	$\pm 1,8$	5
10Р	$\pm 3$	—	—	10

Для обмоток класса 5Р при токе номинальной предельной кратности будет гарантирована полная погрешность 5%. Это дает возможность повысить чувствительность некоторых защит, например, продольных дифференциальных токовых за счет уменьшения расчетного значения тока небаланса (с 10 до 5% тока к. з., приведенного ко вторичной обмотке ТТ). Одной из важных рекомендаций МЭК является необходимость измерения тока намагничивания обмоток для защиты при прямо-сдаточных испытаниях ТТ. По значению этого тока судят (косвенно) о полной погрешности ТТ при токе номинальной предельной кратности. Таким образом, при выпуске каждого ТТ контролируется соответствие его полной погрешности паспортным данным.

# ГЛАВА ВТОРАЯ

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРАНСФОРМАТОРАХ ТОКА

### 2-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Точность трансформации тока в переходных процессах к. з. существенно влияет на устойчивость функционирования устройств релейной защиты, в особенности в сетях 220 кВ и выше, когда требуется быстрое отключение к. з. Поэтому анализу работы ТТ в переходных процессах посвящено большое число публикаций как в СССР, так и за рубежом [19—27 и др.].

Стремление повысить точность работы ТТ в переходных процессах, которая в общем случае увеличивается с уменьшением внешней нагрузки на обмотки ТТ, привело к тому, что до 1974 г. переходный процесс при расчетах допустимых нагрузок учитывался введением коэффициента  $k_a$ , повышающим расчетную кратность тока. Численное значение  $k_a$  в зависимости от типа защиты и времени ее действия принималось равным 1,2—2 (при этом, помимо апериодической составляющей тока к. з., учитывались также неточность расчета токов к. з. и разбросы характеристик намагничивания ТТ).

Введение коэффициента, повышающего расчетную кратность при сильно возросших уровнях тока к. з. привело к такому увеличению расчетных сечений жил кабелей, что вместо контрольного часто приходилось прокладывать силовой кабель сечением 25—50 мм<sup>2</sup>. С другой стороны, не было гарантии, что выбор нагрузок на ТТ с учетом упомянутого коэффициента обеспечит работу ТТ без существенных погрешностей в переходных процессах к. з., когда в токе содержится апериодическая составляющая. Более того, из результатов исследований [19, 25] было известно, что переходные погрешности ТТ зависят не только от нагрузки, но в значительно большей степени от постоянной времени первичной сети, момента возникновения к. з. и характера нагрузки.

Поэтому возникла необходимость исследовать количественное влияние вторичной нагрузки на переходные погрешности ТТ с тем, чтобы определить целесообразность использования повышающего коэффициента при

расчете допустимых нагрузок в токовых цепях защиты и в случае целесообразности его применения установить оптимальные значения этого коэффициента.

## 2-2. МЕТОД ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Метод ПХН является наиболее простым и наглядным, хотя его точность ниже, чем у многих других, более сложных методов, а область использования ограничивается случаями, когда максимальная напряженность поля во время переходного процесса превышает 1000 А/м [20] (или  $C \leq 3$  [24]). Расчетная и экспериментальная проверки свидетельствуют, что точность метода ПХН при правильно выбранных расчетных параметрах (индукция  $B_s$ ) в режимах с  $C \leq 3$  составляет  $\pm 10\%$  [21, 24], что приемлемо для многих инженерных расчетов.

Ниже приведены основные положения метода ПХН применительно к расчету переходного процесса в цепях одного ТТ. Анализ выполняется при следующих допущениях.

1. Переходный процесс является следствием к. з. в наиболее неблагоприятный момент времени, когда мгновенный первичный ток максимален, причем учитывается только основная гармоника тока. В этом случае первичный ток изменяется по закону

$$i_1(t) = I_{1max} \left( \cos \omega t - e^{-\frac{t}{T_1}} \right), \quad (2-1)$$

где  $I_{1max}$  — амплитуда первичного тока;  $T_1$  — постоянная времени первичной цепи, где произошло к. з.

2. На протяжении всего рассматриваемого переходного процесса периодическая составляющая первичного тока к. з. не меняется.

3. Первичный ток в режиме, предшествовавшем к. з., принимается равным нулю.

Для общего случая активно-индуктивной нагрузки в интервале точной трансформации (вертикальный участок характеристики намагничивания) процесс в ТТ (см. рис. 1-7,е) описывается уравнением

$$\frac{d\Psi}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2, \quad (2-2)$$

где  $\Psi$  — потокосцепление витков вторичной обмотки ТТ.  
Решение этого уравнения имеет вид

$$B = B_{\text{ост}} + \frac{I_2 \max}{Q \omega_2 \omega} \left[ Z_2 \sin(\omega t + \varphi_2) - R_2 \omega T_1 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) - X_2 e^{-\frac{t}{T_1}} \right], \quad (2-3)$$

где  $B_{\text{ост}}$  — значение остаточной индукции в магнитопроводе ТТ.

Из (2-3) следует, что индукция ТТ в переходном процессе состоит из периодической и аperiodической составляющих, причем при  $R_2 > 0$  аperiodическая составляющая индукции ( $B_a$ ), зависящая от  $T_1$ , может значительно превышать периодическую составляющую индукции, зависящую от  $\omega t$ . Большое значение  $B_a$  при преобладающей активной нагрузке вызывает насыщение ТТ в переходном процессе и значительные погрешности.

При чисто активном сопротивлении вторичной цепи уравнение (2-3) можно записать в виде

$$\frac{B - B_{\text{ост}}}{B_{\text{max}}} = \sin \omega t - \omega T_1 \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right), \quad (2-4)$$

где  $B_{\text{max}} = \frac{\sqrt{2} I_2 R_2}{Q \omega_2 \omega}$  — максимальное значение периодической составляющей индукции в установившемся режиме. Предельное значение отношения

$$\left. \begin{aligned} & \frac{B_s - B_{\text{ост}}}{B_{\text{max}}}; \\ & \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{B_s - B_{\text{ост}}}{B_{\text{max}}} = -1 - \omega T_1, \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

откуда условие точной трансформации в переходном процессе

$$\frac{B_s - B_{\text{ост}}}{B_{\text{max}}} > |1 + \omega T_1|. \quad (2-6)$$

При активно-индуктивном характере нагрузки это условие запишется в виде

$$\frac{B_s - B_{\text{ост}}}{B_{\text{max}}} \geq 1 + \omega T_1 \cos \varphi_2 \text{ при } \omega T_1 \cos \varphi_2 \geq \sin \varphi_2 \quad (2-7)$$

или

$$\frac{B_s - B_{ост}}{B_{max}} > 1 + \sin \varphi_2 \text{ при } \omega T_1 \cos \varphi_2 < \sin \varphi_2. \quad (2-8)$$

Нетрудно убедиться, что

$$\frac{B_s}{B_{max}} = C; \quad (2-9)$$

значение  $C$  определяется по (1-23).

Таким образом, для ТТ с ПХН переходный процесс, так же как и установившийся режим, можно охарактеризовать обобщенным коэффициентом и постоянной времени  $T_1$ . Из (2-6) следует, что точная трансформация в переходном процессе в наибольшей мере зависит от  $T_1$ . Так, например, при  $T_1=0,05$  с (реальные значения для сетей 110—220 кВ) из (2-6) имеем:  $(B_s - B_{ост})/B_{max} \geq 16,7$ . Следовательно, для обеспечения точной работы ТТ в переходном процессе внешняя нагрузка ТТ (или допустимая кратность тока к. з.) должна быть снижена в 16,7 раза по сравнению со значениями, выбранными по кривым предельных кратностей, что нереально. Остаточная индукция неблагоприятного знака еще больше увеличивает погрешности в переходных процессах. В этих условиях многие ТТ, в частности звеньевой конструкции (типа ТФНД), имеющие большое внутреннее сопротивление ( $Z_{2в}$ ), могут насыщаться даже при закороченных вторичных обмотках.

Следует отметить, что условие (2-6) получено при наибольшем начальном значении апериодической составляющей тока к. з.; оно имеет место при малых мгновенных напряжениях (когда вероятность возникновения к. з. наименьшая). В реальных условиях указанная апериодическая составляющая вторичного тока меньше амплитуды его периодической составляющей. Вопрос о расчетном наибольшем начальном значении апериодической составляющей тока к. з. в настоящее время дискутируется.

Однако даже при уменьшенных расчетных значениях апериодической составляющей допустимая кратность тока к. з. или нагрузка вторичной обмотки ТТ, при которых обеспечивается необходимая точность трансформации в переходном процессе, неприемлемы из-за высоких уровней токов в современных сетях и больших нагрузок на ТТ.

Другими словами, насыщение и значительные погрешности в переходном процессе для ТТ с замкнутым магнитопроводом часто являются неизбежными. Поскольку такие ТТ широко распространены, измерительные органы релейной защиты в случаях, когда требуется их высокое быстроедействие, должны сохранять работоспособность при искажениях формы кривой вторичного тока, вызванных увеличенными погрешностями ТТ.

Для анализа поведения устройства защиты, а также определения основных факторов, влияющих на точность работы ТТ, необходимо рассчитать погрешности ТТ на протяжении всего переходного процесса. Очевидно, что эти погрешности будут изменяться от периода к периоду и после завершения переходного процесса во вторичных цепях ТТ станут минимальными и равными погрешностям установившегося режима. Расчет переходных погрешностей наиболее просто выполняется методом ПХН.

Для ТТ с ПХН при активном сопротивлении вторичной цепи моменты насыщения соответствуют моментам прекращения тока в нагрузке, а моменты выхода ТТ из насыщения соответствуют моментам перехода через нуль кривой первичного тока. При этих условиях сравнительно легко могут быть определены погрешности ТТ на протяжении всего переходного процесса. В [21] расчет погрешностей был произведен графоаналитическим методом. Учитывая наглядность этого метода, рассмотрим его более подробно. На рис. 2-1 приведены кривые изменения индукции в магнитопроводе ТТ для различных периодов переходного процесса при  $T_1=0,02$  с. Кривая 1 характеризует изменение индукции в магнитопроводе ТТ в соответствии с уравнением (2-4), т. е. в предположении, что насыщение отсутствует. Кривые 2—6 построены с учетом насыщения.

Моменты насыщения в каждом периоде переходного процесса определяются по точкам пересечения прямой, параллельной оси абсцисс, с ординатой

$$\frac{B_s - B_{ост}}{B_{max}}$$

и кривой 1. От момента насыщения до конца полупериода смещенного первичного тока, изменяющегося по (2-1), индукция в магнитопроводе не изменяется и остается равной  $B_s$ . В начале следующего полупериода изменение индукции происходит по (2-4) от значения  $B_s$ .

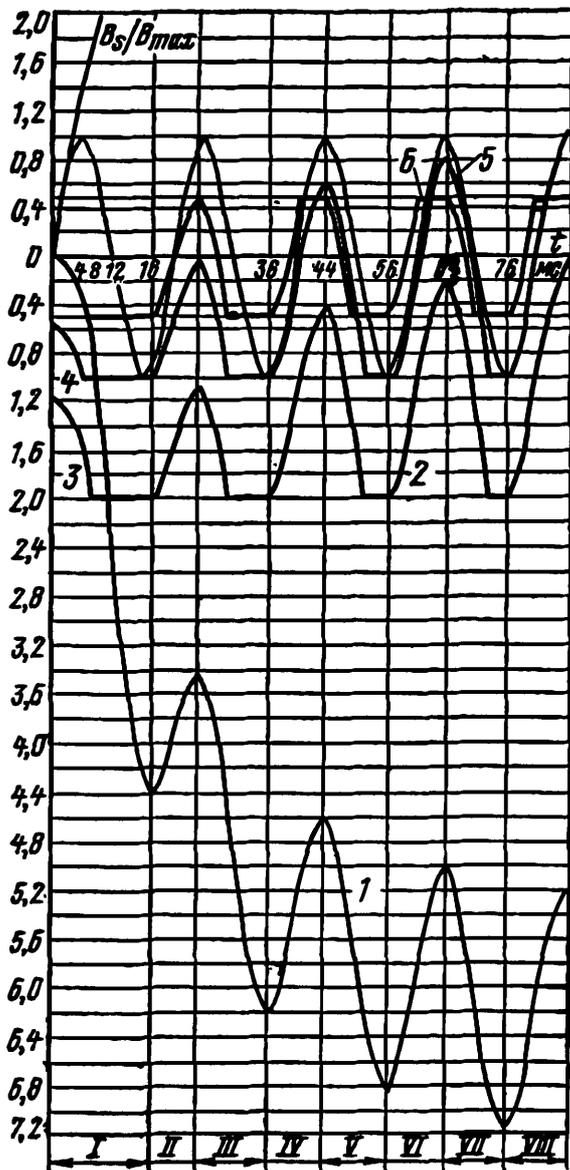


Рис. 2-1. Изменение индукции в магнитопроводе ТТ для различных периодов переходного процесса при  $T_1=0,02$  с.

1 — при отсутствии насыщения; 2 —  $B_s/B_{max}=2$ ,  $V_{ост}=0$ ; 3 —  $B_s/B_{max}=-2$ ,  $V_{ост}=0,59 B_s$ ; 4 —  $B_s/B_{max}=1$ ,  $V_{ост}=0,59 B_s$ ; 5 —  $B_s/B_{max}=1$ ,  $V_{ост}=0$ ; 6 —  $B_s/B_{max}=0,5$ ,  $V_{ост}=0$ .

Длительность полупериодов первичного тока определяется из (2-1) по условию  $i_1(t)=0$ .

Рассмотрение кривых 2—6, построенных при разных значениях

$$\frac{B_s - V_{ост}}{B_{max}}$$

и  $V_{ост}$ , свидетельствует о следующем:

а) насыщение магнитопровода ТТ наступает в первом же полупериоде переходного процесса при нагрузке, изменяющейся в довольно широких пределах;

б) моменты наступления насыщения в последующих полупериодах не зависят от отношения  $B_s/B_{max}$  (при  $B_s/B_{max} \leq 1$ ) и значения  $V_{ост}$ .

Поскольку моменты наступления насыщения ( $t_s$ ) и выхода из насыщения полностью характеризуют погрешности трансформации, независимость  $t_s$  от отношения  $B_s/B_{max}$  означает независимость переходных погрешностей ТТ от вторичной нагрузки (за исключением первого периода).

Этот важный вывод [21, 22, 24] свидетельствует о нецелесообразности введения коэффициентов, повышающих расчетную кратность тока, для учета переходных процессов при расчете допустимых нагрузок на обмотки ТТ.

Физически независимость переходных погрешностей ТТ от нагрузки объясняется тем, что отрицательная по-

луво́лна первичного тока (по отношению к аperiodической составляющей) при  $B_s/B_{max} \approx 1$  всегда трансформируется полностью, обеспечивая размагничивание магнитопровода ТТ, вывод рабочей точки на ненасыщенный участок характеристики намагничивания и трансформацию последующей положительной полуволны, равной по площади отрицательной полуволне. Таким образом, увеличение нагрузки приводит к увеличению степени размагничивания магнитопровода ТТ в отрицательном полупериоде и значение  $t_s$  остается неизменным.

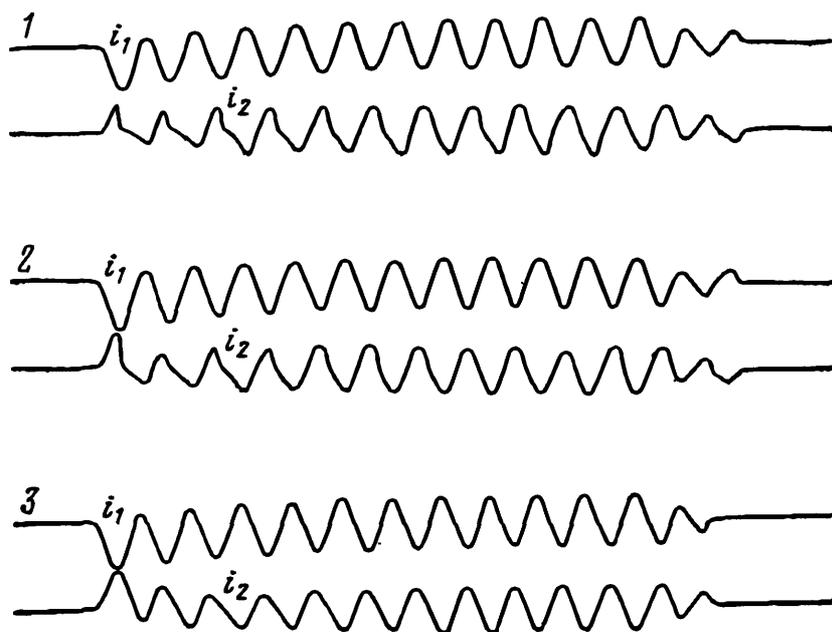


Рис. 2-2. Осциллограммы токов ТТ типа ТДС-110-10.  
 $n_{ном} = 1000/5$ ,  $I_N = 32,5$  кА,  $T_1 = 0,04$  с, 1 —  $R_N = 4$  Ом,  $B_s/B_{max} = 0,88$ ; 2 —  $R_N = 2$  Ом,  $B_s/B_{max} = 1,6$ ; 3 —  $X_N = 2$  Ом,  $R_N = 0,39$  Ом.

Для иллюстрации этого положения на рис. 2-2 приведены осциллограммы ТТ, снятые в Научно-исследовательском центре по испытаниям высоковольтной аппаратуры Минэнерго СССР при одинаковых токах к. з. и моментах их возникновения. Нагрузка в первом опыте (1)  $R_N = 4$  Ом, что соответствует погрешности  $\varepsilon = 10\%$  при  $K = 32,5$ . Во втором опыте (2) нагрузка была уменьшена вдвое ( $R_N = 2$  Ом) при той же кратности тока. Как видно из осциллограмм, погрешности ТТ (за исключением первого периода после возникновения к. з.) практически не изменились. В третьем опыте нагрузка имела активно-индуктивный характер ( $X_N = 2$  Ом;  $R_N = 0,39$  Ом;  $K = 32,5$ ).

Совместное решение (2-1) и (2-4) при условии ограничения индукции на уровне  $\pm B_s$  позволяет определить переходные погрешности ТТ. В [21] были определены погрешности как по действующему, так и среднему то-

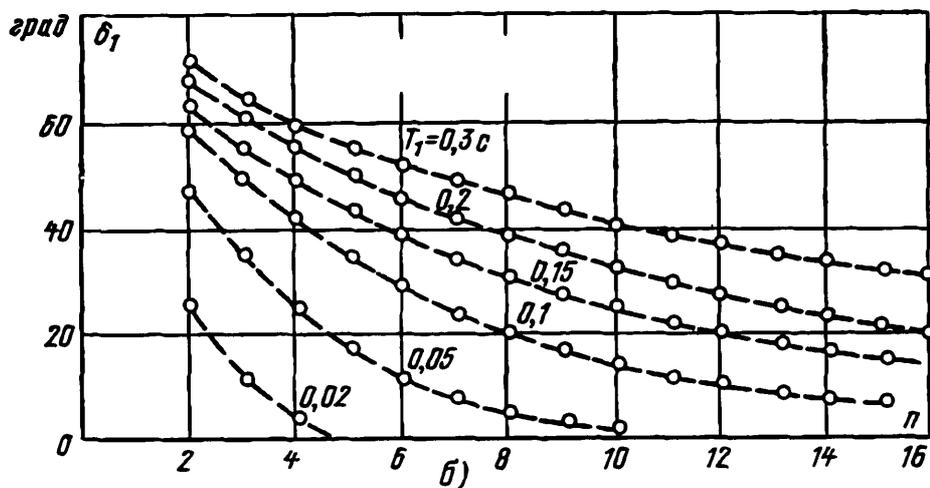
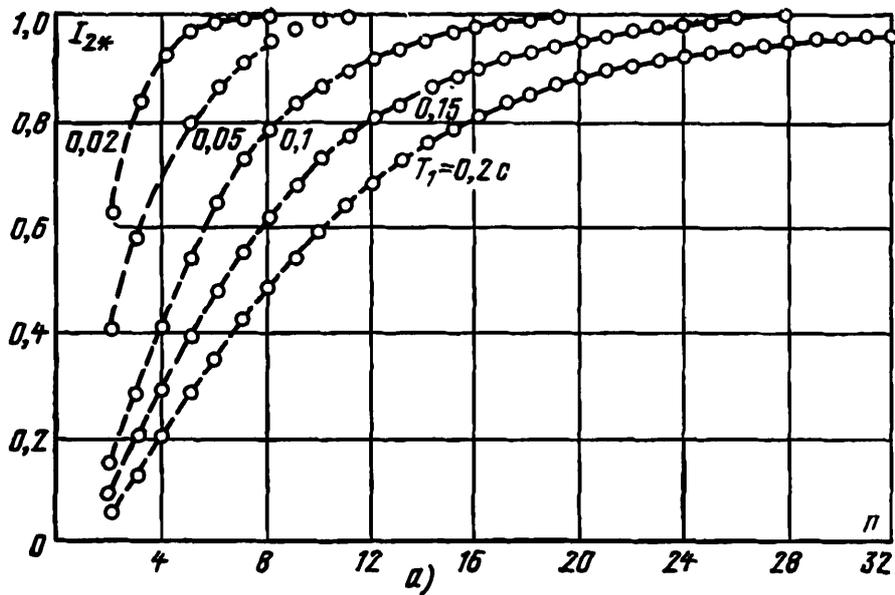


Рис. 2-3. Универсальные характеристики переходного процесса к. з при активной нагрузке ( $n$  — номер периода).  
 а — для действующего тока  $I_{2*} = I_2/I'$ ; б — для угловой погрешности по первой гармонике вторичного тока.

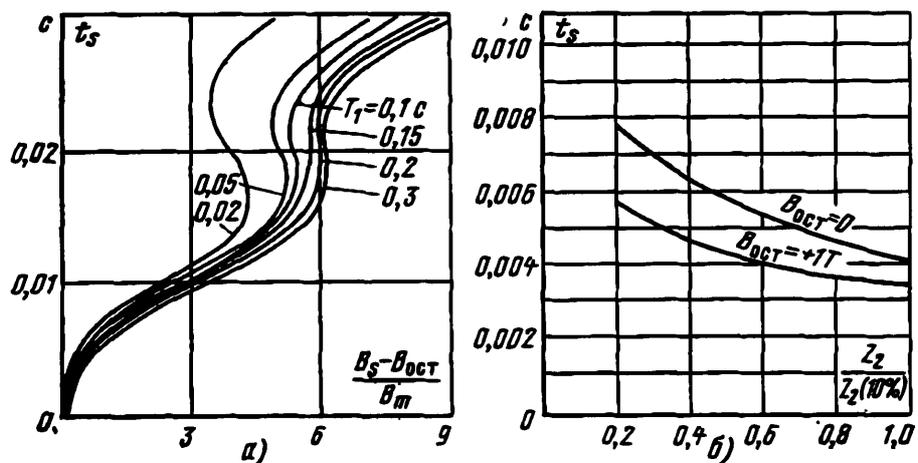


Рис. 2-4. Время наступления насыщения магнитопровода ТТ в зависимости от отношения  $(B_s - B_{ост})/B_{max}$  (а) и  $Z_2/Z_2(10\%)$  (б)

кам для положительных полупериодов переходного процесса. Решение уравнений проводилось графоаналитически. В [24] решение уравнений выполнялось на ЭВМ, причем погрешности определялись по периодам переходного процесса. Проведенные расчеты дали возможность построить универсальные характеристики интегральных значений токов и угловой погрешности для различных периодов переходного процесса. Универсальные характеристики для действующего тока и угловой погрешности по первой гармонике приведены на рис. 2-3.

По (2-4) можно аналитически определить длительность точной трансформации ТТ в переходном процессе. Зависимости времени наступления насыщения ТТ  $t_{\text{нас}}^{(1)}$  от отношения  $(B_s - B_{\text{ост}}) / B_{\text{max}}$  приведены на рис. 2-4,а [24]. Подобные кривые, но в более удобном для анализа виде, приведены в [22] (рис. 2-4,б — на оси абсцисс отложено отношение  $Z_1 / Z_{2(10\%)}$ , где  $Z_{2(10\%)}$  — нагрузка, выбранная по кривым предельных кратностей).

Из кривых следует, что время  $t_s^{(1)}$  весьма мало — от 3 до 8 мс при изменении отношения  $\frac{Z_1}{Z_{2(10\%)}}$  от 1 до 5.

### 2-3. МЕТОД СПРЯМЛЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Для расчетов переходных процессов работы ТТ в [5, 22] рекомендуется использовать характеристику вида СХН (см. рис. 1-7,в). Такая аппроксимация характеристики намагничивания позволяет учитывать трансформацию тока во вторичную цепь после наступления насыщения (при  $B > B_s$ ), что более полно отражает реальный процесс в ТТ по сравнению с ПХН, поскольку магнитные характеристики реальных ТТ не идеально прямоугольны. Метод дает возможность более точно рассчитать мгновенный вторичный ток.

Однако анализ показывает [12], что погрешности ТТ с СХН определяются значениями  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $\theta$  [ $\theta$  вычисляется по (1-27)] и временем  $t_s$ , в результате чего число кривых, описывающих весь переходный процесс, настолько велико, что строить по этому методу универсальные характеристики нецелесообразно. Для расчетов рекомен-

дуются использовать универсальные характеристики, построенные по методу ПХН, которые при  $C \leq 3,0$  и  $\theta \geq 20$  дают вполне приемлемую для инженерных расчетов точность —  $\pm 10\%$ .

#### 2.4. МЕТОД ЛИНЕЙНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Расчетная характеристика линейного ТТ приведена на рис. 1-7,2.

Теория линейных ТТ разработана наиболее полно. Для них получены в общем аналитическом виде решения дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс [19, 23]. Дифференциальное уравнение схемы замещения линейного ТТ

$$\frac{di_0}{dt} + \frac{1}{T_2} i_0 = q \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{T_2} i_1, \quad (2-10)$$

где

$$T_2 = \frac{L_0 + L_2}{r_2}; \quad q = \frac{L_2}{L_0 + L_2}.$$

Приближенное решение уравнения (2-10), полученное в предположении, что  $q \approx 0$  (справедливо для ТТ с замкнутым магнитопроводом, у которых  $L_2 \ll L_0$ ,  $T_2^2 \omega^2 \gg 1$ ), а  $i_1$  определяется по (2-1), имеет вид:

$$i_0 = \frac{I_{max}}{T_2 \omega} \left[ \frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right) - \sin \omega t \right]. \quad (2-11)$$

По такому же закону изменяется и индукция в магнитопроводе ТТ. Поэтому можно записывать соотношение

$$\frac{B_{max} + B_a}{B_{max}} = \frac{\omega T_1 T_2 \left( e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} \right)}{T_1 - T_2} + 1. \quad (2-12)$$

Максимум в уравнении (2-12) достигается при

$$t = \frac{T_1 T_2}{(T_1 - T_2)} \ln \frac{T_1}{T_2}. \quad (2-13)$$

**Зависимости**

$$k_a = \frac{B_{max} + B_a}{B_{max}} = f(T_2)$$

при  $T_1=50$  мс и  $T_1=100$  мс приведены на рис. 2-5. У линейного ТТ отношение  $(B_{max}+B_a)/B_{max}$  при больших  $T_2$ , характерных для ТТ с замкнутым магнитопроводом ( $T_2 > 1$  с), велико, т. е. такой ТТ должен иметь значительные размеры и допускает относительно небольшую нагрузку (по сравнению с допустимой по условиям установившегося режима). Из кривой видно, что

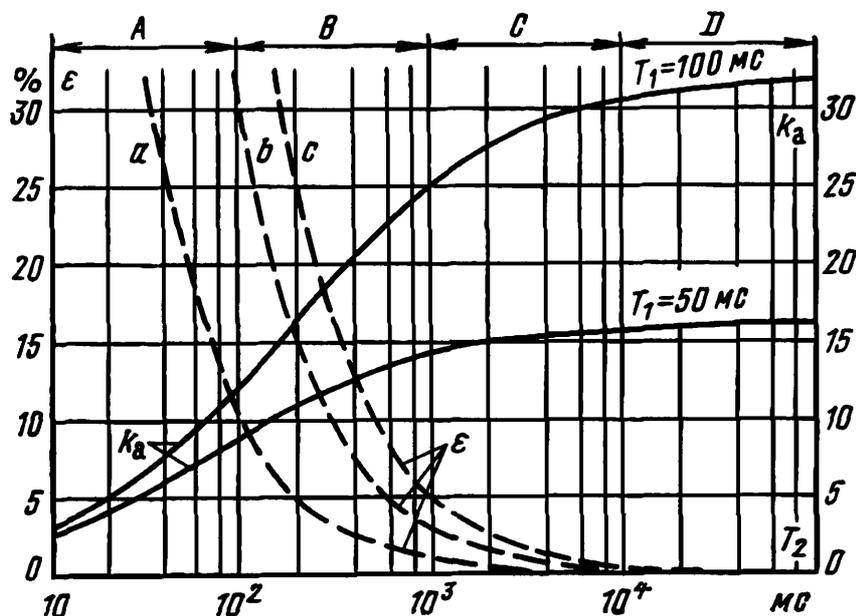


Рис. 2-5. Зависимость  $k_a$  и  $\epsilon$  от  $T_2$ .

*a* — для ТТ с высокой м. д. с.; *b* — для ТТ с нормальной м. д. с.; *c* — для ТТ с низкой м. д. с. Зона *A* — ТТ с большим воздушным зазором; зона *B* — ТТ с малым воздушным зазором; зона *C* — обычный ТТ; зона *D* — ТТ со сниженной нагрузкой.

одним из способов уменьшения отношения  $(B_{max}+B_a)/B_{max}$  является уменьшение  $T_2$ , что достигается, например, введением немагнитного зазора в магнитопровод ТТ. Однако немагнитный зазор приводит к увеличению погрешности ТТ в установившемся режиме работы (кривые *a*, *b*, *c*). Поэтому при разработке конструкций ТТ, к которым предъявляются требования точной работы как в установившихся режимах, так и при переходных процессах к. з., обычно находят компромиссное решение либо применяют специальные методы компенсации погрешностей установившегося режима [27].

## 2-5. МЕТОД НАКЛОННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

В реальных ТТ с замкнутым магнитопроводом характеристика намагничивания, как уже отмечалось, существенно нелинейна. Поэтому соотношения, получен-

ные для ТТ с линейной характеристикой, справедливы только для участка магнитной характеристики ТТ, который условно может считаться линейным.

Широкое применение получил метод расчета ТТ по наклонной характеристике намагничивания (см. рис. 1-7, д) [19, 25, 26]. В этой характеристике имеется линейный наклонный участок, соответствующий ненасыщенному состоянию магнитопровода ТТ, и горизонтальный участок, соответствующий насыщенному состоянию.

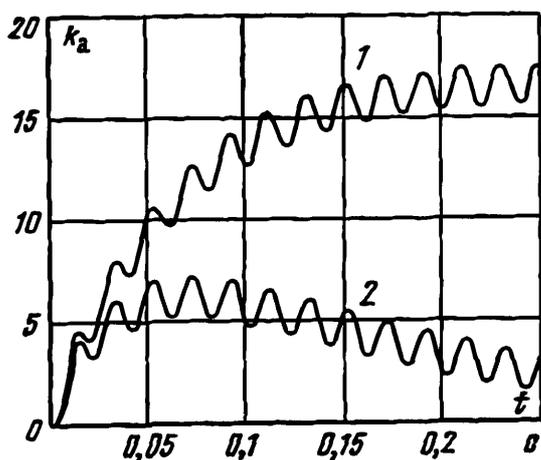


Рис. 2-6. Расчетная зависимость  $k_a$  от времени.

1 —  $T_1=0,075$  с,  $T_2=0,00239$  с,  $T_0=L_0+L_2/r_2=2$  с (магнитопровод ТТ без зазора); 2 —  $T_1=0,045$  с,  $T_2=0,00239$  с,  $T_0=0,12$  с (магнитопровод ТТ с воздушным зазором).

больших значениях  $T_2$  характер изменения индукции ТТ с НХН и ПХН в начале переходного процесса примерно одинаков [26] (рис. 2-6).

Следует отметить, что в рекомендациях МЭК по расчетам переходных процессов в ТТ, предназначенных для питания быстродействующих защит, используется метод НХН.

## 2-6. МЕТОДЫ ФИЗИЧЕСКОГО И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Погрешности нелинейных ТТ при переходных процессах могут быть определены по обобщенным характеристикам [23], полученным методом физического моделирования. Поскольку число факторов, определяющих работу ТТ при переходном процессе, значительно превышает число факторов, характеризующих работу ТТ в установившемся режиме, количество обобщенных кривых и первом случае намного больше. Для нелинейных

Сопротивление ветви намагничивания в ненасыщенном состоянии реальных ТТ всегда конечно, хотя и очень велико (условие  $Z_0 \gg Z_2$ ) и позволяет перейти к ПХН).

Соотношения (2-11), (2-12), полученные для линейного ТТ, справедливы для линейного (наклонного) участка НХН.

При  $(B_{max} + B_a) = B_s$  наступает насыщение ТТ и процессы в нем на интервале насыщенного состояния происходят аналогично рассмотренным выше для ТТ с ПХН. Интересно, что при

ТТ в [23] построены следующие обобщенные характеристики:

1) зависимости относительного максимума аperiodической составляющей тока намагничивания от времени его достижения;

2) зависимости относительных значений максимума аperiodической составляющей тока намагничивания от значений  $I_{1a,уд}$ ,  $Z_{2уд}$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $B_{ост}$ ;

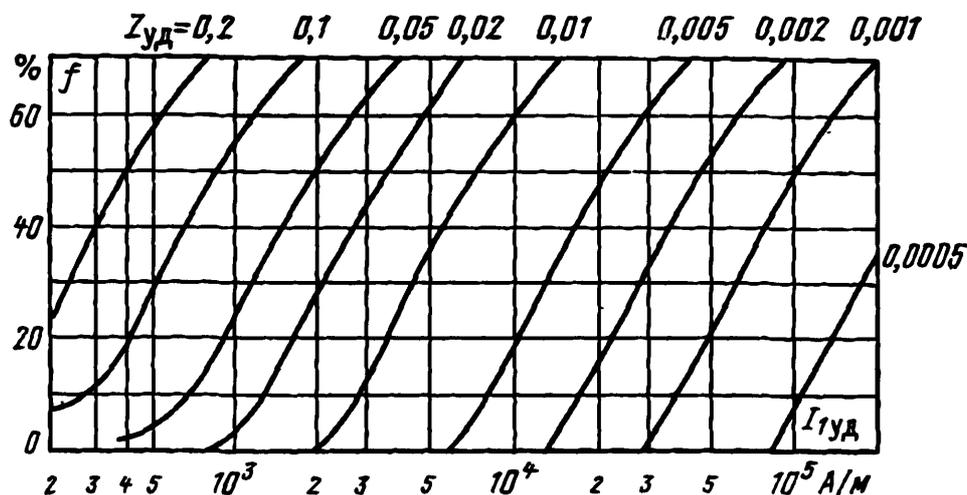


Рис. 2-7. Обобщенные характеристики максимальных погрешностей по действующей периодической составляющей тока при  $T_1 = 0,005$  с,  $T_2 = 0$ .

3) зависимости величин, характеризующих погрешности ТТ по периодическому току при подмагничивании ТТ постоянным током. Обобщенные характеристики ТТ получены в Институте электродинамики АН УССР. Они построены для достаточно широкого диапазона изменения нагрузок на обмотки ТТ и кратностей токов к. з. и позволяют определить различные виды погрешностей ТТ в переходном процессе без сложных аналитических расчетов. Одна из обобщенных характеристик дана на рис. 2-7.

При обосновании методики получения обобщенных характеристик показана возможность применения принципа наложения составляющих первичного тока для исследований нелинейного ТТ. Рекомендуется сначала рассматривать действие аperiodической составляющей первичного тока к. з. без учета периодической, а затем периодической составляющей с учетом магнитного состояния магнитопровода, определяемого аperiodической составляющей тока намагничивания в предположении,

что она в данный период имеет неизменное значение. Допустимость использования метода наложения для анализа переходных процессов в нелинейных ТТ дает возможность существенно упростить проведение испытаний ТТ. Методика испытаний, рекомендованная [23], основана на замене переходного процесса в момент максимальной погрешности  $t_{max}$  эквивалентным установившимся режимом, в котором магнитопровод ТТ подмагничивается постоянным током, создающим ту же напряженность магнитного поля, что и апериодическая составляющая тока намагничивания исследуемого переходного процесса в момент  $t_{max}$ . Значение постоянного подмагничивающего тока определяется расчетом апериодического переходного процесса в ТТ, а первичный ток при испытании равен синусоидальной составляющей первичного тока в данном переходном процессе.

Методы математического моделирования ТТ являются наиболее универсальными. Они позволяют учесть большое число факторов, влияющих на процессы в ТТ, дают возможность осуществлять анализ работы групп ТТ, а также систем ТТ — устройство защиты. Эти методы получили широкое распространение в СССР и за рубежом [9, 18].

## 2-7. ОЦЕНКА РАЗЛИЧНЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Даже при многочисленных допущениях, упрощающих решение задачи, расчеты переходных процессов в ТТ достаточно трудоемки. В практической деятельности часто не требуется большая точность, а допустим качественный анализ, который может быть проведен с использованием универсальных характеристик погрешностей, построенных по методу ПХН [21, 24], а также обобщенных характеристик [23].

В более сложных случаях, в частности при разработке новых конструкций ТТ, быстродействующих устройств релейной защиты и т. п., могут быть использованы и другие методы, например математического моделирования с применением ЭВМ.

Выполненные исследования свидетельствуют о крайне слабой зависимости переходной погрешности ТТ от вторичной нагрузки (за исключением первого полупериода процесса после возникновения к. з.). Уменьшение нагрузки на обмотку ТТ в 1,5—2 раза по сравнению

с выбранной по условиям установившегося режима практически не снижает погрешности. Поэтому применение повышающего коэффициента, увеличивающего расчетную кратность тока к. з. с целью учета переходных процессов, нецелесообразно.

С другой стороны, необходимо иметь в виду, что при постоянной времени первичной сети  $T_1 > 0,03 \div 0,05$  с (сети 110 кВ и выше, а иногда и более низких напряжений) ТТ с замкнутым магнитопроводом в переходных процессах весьма часто насыщаются. Это приводит к значительным погрешностям. Поскольку такие ТТ в настоящее время наиболее широко распространены, измерительные органы быстродействующих устройств релейной защиты должны быть выполнены таким образом, чтобы искажения формы кривой вторичного тока, вызванные увеличенными переходными погрешностями ТТ, не приводили к нарушению функционирования защиты.

#### **2-8. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ МЭК ПО КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКАМ ТТ, К КОТОРЫМ ПРЕДЪЯВЛЯЮТСЯ ТРЕБОВАНИЯ ТОЧНОСТИ В ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССАХ**

В соответствии с проектом рекомендаций МЭК ТТ, предназначенные для питания быстродействующих устройств релейной защиты (когда следует учитывать переходные процессы в сети), разделяются на три класса и обозначаются следующим образом:

ТРХ — ТТ, имеющий сплошной кольцевой магнитопровод, способный точно передавать во вторичную цепь как переменную, так и постоянную составляющие, пропорциональные первичному току;

ТРУ — ТТ с малым немагнитным зазором для устранения остаточной индукции;

ТРЗ — ТТ с немагнитными зазорами и линейной характеристикой во всем диапазоне изменения токов.

Трансформаторы тока типа ТРЗ обеспечивают точную трансформацию только периодической слагающей тока к. з. В соответствии с назначением ТТ соответствующего класса регламентируются требования точности в переходных процессах. Требования точности при активной нагрузке, создающей наибольшие погрешности, нормируются следующим образом:

для ТТ класса ТРХ погрешность по максимуму мгновенного значения тока намагничивания не должна превышать 5% амплитуды номинального вторичного симметричного тока к. з., а погрешность по переходу тока через нулевое значение — 3° в течение любого периода процесса к. з., для которого регламентируется точность;

для ТТ класса ТРУ погрешности определяются аналогично ТТ класса ТРХ и составляют соответственно 7,5% и 4,5°;

для ТТ класса ТРЗ нормируется погрешность трансформации периодической составляющей тока к. з., периодическая составляющая тока намагничивания не должна превышать 10% периодической составляющей вторичного тока.

Расчет погрешностей ТТ производится методом НХН по формулам (2-11) — (2-13).

Данные указаны при номинальной активной нагрузке обмоток ТТ мощностью от 2,5 до 15 Вт. Следует отметить, что указанные нормы являются предварительными и, вероятно, будут корректироваться.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### РАБОТА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ИСКАЖЕННОЙ ФОРМЕ КРИВОЙ ТОКА

#### 3-1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Большинство из находящихся в эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики рассчитано для работы при синусоидальных токах. Это условие выполняется, если ТТ работают с полной погрешностью  $\epsilon \leq 10\%$ .

При работе ТТ с  $\epsilon > 10\%$  искаженный вторичный ток содержит кроме основной спектр высших гармоник

$$i_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{n \max} \sin(n\omega t + \Psi_n), \quad (3-1)$$

где  $I_{n \max}$  — амплитуда  $n$ -й гармоники тока;  $\Psi_n$  — начальная фаза  $n$ -й гармоники.

В установившемся режиме к. з. (первичный ток синусоидален) при насыщении магнитопровода ТТ кривая вторичного тока симметрична относительно оси абсцисс (см. рис. 1-6). Поэтому во вторичном токе содержатся только нечетные гармоники, т. е.  $n=1, 3, 5, 7 \dots$

При насыщении ТТ в переходном процессе к. з. вторичный ток содержит спектр гармоник, причем значения всех четных гармоник стремятся к нулю по мере затухания переходного процесса, а нечетных — к их значениям в установившемся режиме.

Причиной появления высших гармоник в данном случае является нелинейный элемент — ветвь намагничивания ТТ. При отсутствии высших гармоник в первичном токе абсолютное содержание их во вторичном и намагничивающем токах одинаково.

Ток высших гармоник меньше полного тока намагничивания, содержащего еще и основную гармонику. Поэтому в установившемся режиме к. з. при  $\varepsilon \leq 10\%$  высшие гармоники во вторичном токе не превысят  $10\%$  основной и ими без заметной погрешности можно пренебречь.

Наличие высших гармоник в токе существенно влияет на характеристики устройств защиты, в частности, снижает устойчивость срабатывания электромеханических реле (тока и направления мощности), из-за вибрации их контактов. У реле, реагирующих на фазовые соотношения (реле направления мощности и направленные реле сопротивления), может быть нарушена устойчивость несрабатывания из-за возрастания угловой погрешности.

Наличие высших гармоник в токе снижает чувствительность и быстродействие устройств защиты, выполненных как на электромеханических, так и на бесконтактных реле.

Ниже приводится анализ работы наиболее распространенных измерительных органов защиты и рассматриваются рекомендации, повышающие устойчивость их функционирования при несинусоидальных токах.

### 3-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ ТОКА

Уравнение усилия электромагнитных токовых реле без учета насыщения магнитопровода и потерь в стали имеет вид:

$$F=ki^2, \quad (3-2)$$

где  $i$  — мгновенный ток в обмотке реле;  $k$  — коэффициент пропорциональности.

При подставлении (3-1) в (3-2) получим уравнение усилия электромагнитного реле при несинусоидальном токе (гармоники усилия четвертого порядка и выше не учитываются вследствие их малого влияния):

$$F = \frac{1}{2} k [I_{1max}^2 + I_{3max}^2 + I_{5max}^2 - I_{1max}^2 \cos 2\omega t + \\ + 2I_{1max}I_{3max} \cos(2\omega t + \Psi_3) + \\ + 2I_{3max}I_{5max} \cos(2\omega t + \Psi_5 - \Psi_3)]. \quad (3-3)$$

Из (3-3) видно, что постоянная составляющая усилия реле пропорциональна сумме квадратов амплитуд всех гармоник протекающего через него тока:

$$F_0 = \frac{1}{2} k \sum_{n=1}^{\infty} I_{nmax}^2. \quad (3-4)$$

Переменная составляющая усилия реле зависит не только от содержания, но и от начальной фазы высших гармоник относительно основной:

$$F_{\sim} = \frac{1}{2} k [-I_{1max}^2 \cos 2\omega t + 2I_{1max}I_{3max} \cos(2\omega t + \Psi_3) + \\ + 2I_{3max}I_{5max} \cos(2\omega t + \Psi_5 - \Psi_3)]. \quad (3-5)$$

Если в (3-5)  $\Psi_3 = \Psi_5 = 0$ , то переменная составляющая усилия от основной гармоники тока будет компенсироваться переменной составляющей от высших гармоник. Справедливость этого положения проверялась на реле типа ЭТ-521/6, подверженное вибрации даже при чисто синусоидальном токе [28, 29], а также на реле типа РТ-40. При включении реле типа РТ-40 на ток с содержанием третьей гармоники относительно основной около 98% и  $\Psi_3 \approx 0$  (рис. 3-1) его контакты работают без вибрации [30].

Начальные фазы высших гармоник искаженного вторичного тока при преобладающей активной нагрузке на ТТ приближаются к значениям, соответствующим наилучшим условиям работы реле, т. е. ( $\Psi_3 \approx \pi$ ,  $\Psi_5 \approx 0$ ). В этом режиме переменные составляющие усилий в реле от основной и высших гармоник складываются, увели-

чивая отношение амплитуды переменной составляющей усилия  $F_{пер\max}$  к постоянной составляющей  $F_0$ .

Поведение реле удобно характеризовать коэффициентом пульсации кривой усилия

$$K_{п} = \frac{F_{пер\max}}{F_0}. \quad (3-6)$$

Для синусоидальной формы кривой тока  $K_{п}=1$ , что следует непосредственно из (3-3). При искажении формы кривой тока и неблагоприятных значениях начальных фаз высших гармоник ( $\Psi_3, \Psi_5, \dots, \Psi_n$ )  $K_{п}>1$ . Это способствует возникновению вибрации контактов реле.

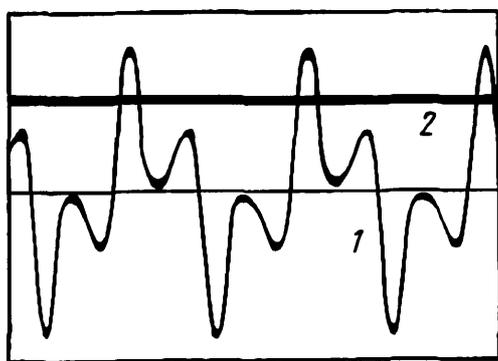


Рис. 3-1. Осциллограмма работы реле типа РТ-40 при несинусоидальном токе  
1 — ток в обмотке реле; 2 — ток в контактах реле.

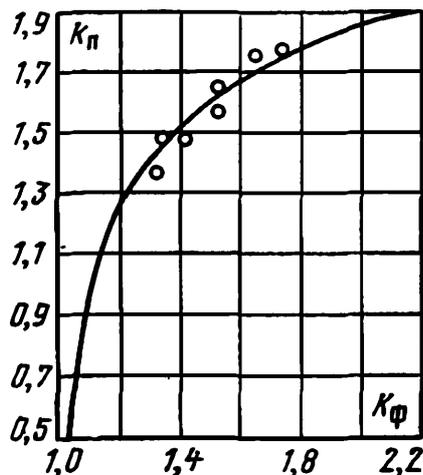


Рис. 3-2. Зависимость  $K_{п}$  от  $K_{ф}$  вторичного тока ТТ.

В качестве критерия степени искажения кривой тока, учитывающего содержание гармонических составляющих и их начальные фазы, может быть принят коэффициент формы  $K_{ф}$  [31]

$$K_{ф} = \frac{\pi \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{n,max}^2}}{2\sqrt{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} I_{n,max} \cos(\Psi_n - n\Psi_1)}. \quad (3-7)$$

Анализ искажений формы кривой вторичного тока ТТ, проведенный в гл. 1, позволяет получить зависимость  $K_{п}=f(K_{ф})$ . Эта зависимость (рис. 3-2) устанавли-

ливаает количественную связь между формой кривой тока (определяемой погрешностью ТТ и характером нагрузки) и коэффициентом пульсации электромагнитного усилия реле. На рис. 3-2 нанесены точки, полученные в результате разложения в гармонический ряд осциллограмм вторичного тока ТТ типов ТВ-35 и ТНДМ-110, работающих на активную нагрузку с высокими погрешностями.

Из приведенной зависимости следует, что для уменьшения вибрации контактов реле следует уменьшить  $K_{\phi}$  магнитного потока (или тока при ненасыщаемся магнитопроводе реле). Реле тока РТ-40 с antivибрационным барабанчиком значительно менее подвержены вибрациям, чем реле ЭТ-520. При испытаниях в ГО ЭСП выявлено, что даже худшие экземпляры реле РТ-40 оказывались подверженными вибрации только при  $K_{\pi} \geq 1,4-1,5$ , т. е. при  $f \geq 30-40\%$  и кратности тока от 5 до 10 по отношению к уставке, в то время как реле серии ЭТ-520 вибрировало при  $K_{\pi} \geq 1$ .

Возможность возникновения вибрации контактов реле ЭТ-520 при искаженном токе была выявлена в Мосэнерго, на основании чего рекомендуется ограничивать полную погрешность ТТ значением  $\varepsilon \leq 50\%$  (при  $\cos \varphi_{\pi} \approx 1$ ), что соответствует  $f \approx 13\%$  (см. рис. 1-9, кривые 3 и 1). В действительных условиях при  $\cos \varphi_{\pi} \approx 0,8$  допустимое значение  $f$  может быть увеличено до  $f \approx 20\%$ , однако с некоторым запасом в качестве расчетного далее принимается  $f_{\text{доп}} = 13\%$ .

Для дальнейшего повышения надежности срабатывания реле РТ-40 разработано несколько способов, направленных в основном на уменьшение  $K_{\pi}$ .

В [32] предложено выполнять к. з. обмотки поверх основных обмоток реле. На рис. 3-3 к. з. обмотка представляет собой активное сопротивление  $R_k$ , включенное параллельно индуктивности  $L$  основной обмотки. Сечение меди к. з. обмоток рассчитывается таким образом, чтобы первая гармоника в ней составляла около 50% тока основной обмотки. При искаженном токе индуктивное сопротивление основной обмотки реле растет пропорционально порядковому номеру гармоник; активное же сопротивление к. з. обмотки остается практически неизменным, поэтому ток высших гармоник преимущественно ответвляется в к. з. обмотку и форма магнитного потока приближается к синусоидальной. Дополни-

тельные к. з. обмотки рекомендуется выполнять на каждом полюсе магнитопровода реле РТ-40 медным проводом сечением 12 мм<sup>2</sup> или в виде сплошной гильзы того же сечения.

При таком исполнении к. з. обмотки отношение сопротивлений параллельных ветвей в схеме замещения реле с к. з. обмоткой составляет:

для первой гармоники  $X_{1L}/R_K=0,575$ ; для третьей гармоники  $X_{3L}/R_K=1,73$ , где  $X_{1L}$ ,  $X_{3L}$  — индуктивное со-

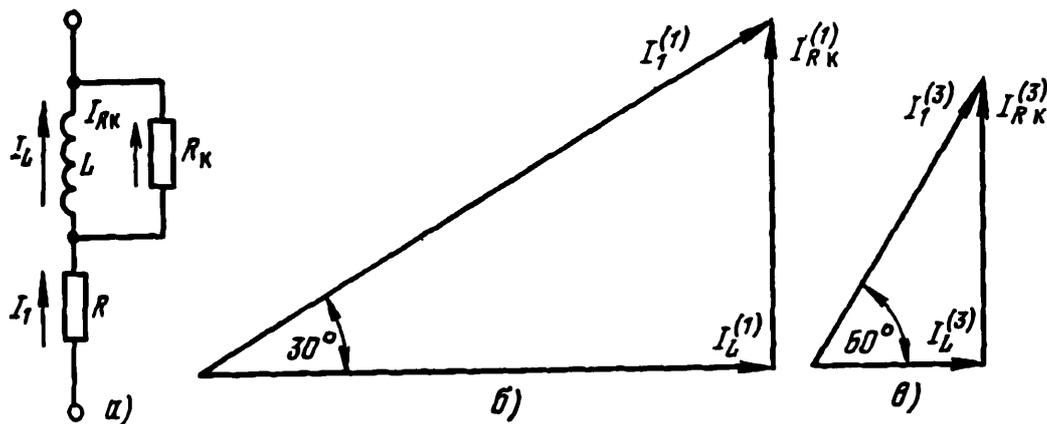


Рис. 3-3. Схема замещения магнитной цепи и векторные диаграммы реле РТ-40 с к. з. обмоткой.

*a* — схема замещения; *b* — векторная диаграмма для первой гармоники тока; *в* — то же для третьей гармоники тока.

противление основной обмотки реле соответственно току первой и третьей гармоник;  $R_K$  — активное сопротивление к. з. обмотки.

В этом случае доля тока третьей гармоники, ответвляющаяся в к. з. обмотку, составляет:

$$\frac{I_{R_K}^{(3)}}{I_T^{(3)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{1,73}\right)^2}} = 0,87,$$

а в основную обмотку

$$\frac{I_L^{(3)}}{I_T^{(3)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,73^2}} = 0,5.$$

Первая гармоника тока распределится следующим образом:

в к. з. обмотку

$$\frac{I_{Rk}^{(1)}}{I_1^{(1)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{0,575}\right)^2}} = 0,5;$$

в основную обмотку

$$\frac{I_L^{(1)}}{I_1^{(1)}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,575^2}} = 0,87.$$

Следовательно, значение третьей гармоники тока в основной обмотке реле по отношению к первой уменьшается в  $0,87/0,5=1,73$  раза.

Проверка этого способа в ГО ЭСП показала, что реле РТ-40 с к. з. обмоткой четко работает в широком диапазоне токов при токовой погрешности ТТ до 70% ( $K_{\pi} \approx 1,8$ ). Из рис. 3-4 видно, что при введении к. з. обмотки форма кривой магнитного потока в реле улучшается по сравнению с формой кривой тока.

Однако наряду с указанным достоинством этот способ имеет следующие недостатки: повышается потребление реле на 20—25%, увеличивается ток срабатывания примерно на 14% и возрастает зависимость уставки от температуры окружающей среды.

Эквивалентным по эффективности, но несколько более сложным, является способ [33], заключающийся в выполнении дополнительной многовитковой обмотки на магнитопроводе реле, подключаемой к конденсатору. Образующийся LC-контур обладает способностью уменьшать свое сопротивление с ростом номера гармоники тока, т. е. увеличивать степень размагничивания магнитопровода реле. Из-за отмеченных недостатков оба эти способа не получили широкого распространения.

Способ, предложенный в [34], основан на эффекте местного насыщения магнитопровода реле. Уменьшение сечения магнитопровода реле (под обмотками) и лепестка якоря позволяет получить магнитный поток уплощенной формы (из-за насыщения) при пикообразном токе, т. е. снизить  $K_{\phi}$  потока, а следовательно, и  $K_{\pi}$ .

В насыщенном магнитопроводе начальная фаза третьей гармоники потока по отношению к основной приближается к наиболее благоприятной ( $\Psi_3 \rightarrow 0$ ) с точ-

ки зрения поведения реле. Насыщение магнитной системы реле улучшает его работу за счет благоприятного сдвига третьей гармоникой, и за счет уменьшения содержания высших гармоник в кривой магнитного потока по сравнению с их содержанием в кривой тока.

Испытания модернизированных реле РТ-40, проведенные в Новочеркасском политехническом институте и в ГО ЭСП, показали достаточно высокую эффективность модернизации. Настройка реле существенно сказывается на их поведении при несинусоидальных токах (рис. 3-5). Реле, у которых совместный ход контактов составляет 1,8—2 мм (рис. 3-5,а), устойчиво работают при  $K_{\Phi}=1,85-1,9$  и кратностях тока 15—20 ( $f \approx 70 \div 80\%$ ). У реле с совместным ходом контактов 1—1,5 мм

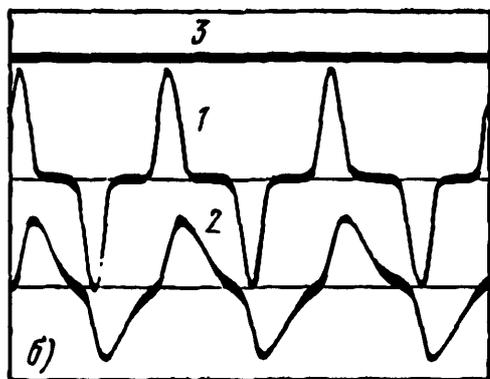
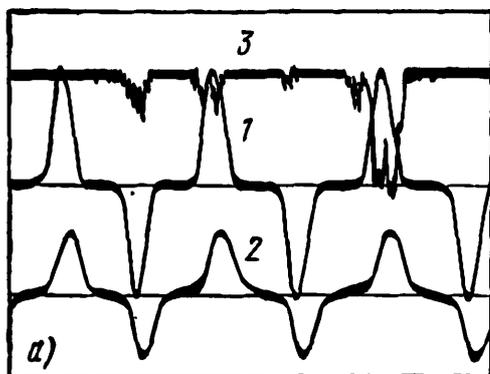


Рис. 3-4.

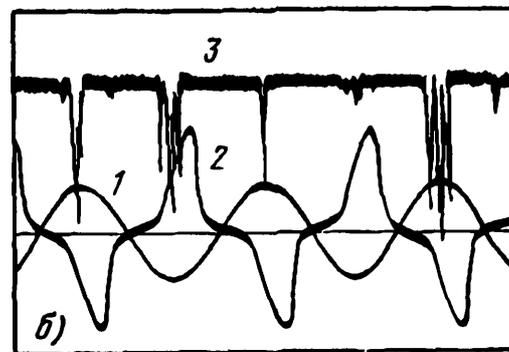
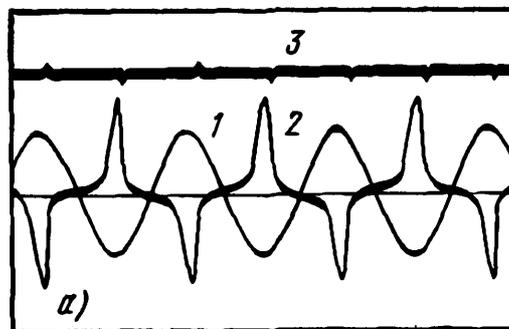


Рис. 3-5.

Рис. 3-4. Осциллограммы работы реле РТ-40/10 при несинусоидальных токах и совместном ходе контактов около 1 мм.

а — реле без к. з. обмоток; б — реле с к. з. обмотками; 1 — ток в обмотке реле  $I_p=25$  А,  $K_{\Phi}=1,5$ ; 2 — поток в магнитопроводе; 3 — ток в контактах.

Рис. 3-5. Осциллограммы при несинусоидальном токе в цепи вторичной обмотки ТТ типа ТВ-35, 200/5.

а — совместный ход контактов реле 1,8—2 мм ( $I_1=2500$  А,  $I_2=21$  А,  $K_{\Phi}=1,7$ ); б — совместный ход контактов реле 0,5—1 мм ( $I_1=1600$  А,  $I_2=26$  А,  $K_{\Phi}=1,26$ ); 1 — первичный ток ТТ; 2 — вторичный ток ТТ (в обмотке реле); 3 — ток в контактах реле РТ-40/6 (вып. до 1970 г.).

(рис. 3-5,б) допустимые значения  $K_{\Pi}$  не превышают 1,4—1,5 ( $f=30-40\%$ ). Предельно допустимая токовая погрешность для модернизированных реле РТ-40 принята с некоторым запасом 50%.

У реле РТМ, встраиваемого в приводы выключателей, вибрация якоря от переменной составляющей усилия не оказывает существенного влияния на поведение реле. Этому способствует преобладающая индуктивная нагрузка на ТТ (индуктивность реле), в результате чего форма тока в реле улучшается (по сравнению с чисто активной нагрузкой), что значительно уменьшает  $K_{\Pi}$ . Поэтому специальных мер по борьбе с вибрацией реле прямого действия можно не принимать [33].

### 3-3. ИНДУКЦИОННЫЕ РЕЛЕ ТОКА

При синусоидальном токе вращающий момент реле не содержит переменной составляющей [1]:

$$M = k\omega I^2_p \sin \Psi,$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности;  $\Psi$  — угол сдвига по фазе между потоками в расщепленных полюсах магнитопровода реле.

Высшие гармоники в токе приводят к появлению переменной составляющей момента. По принципу действия этих реле переменная составляющая момента не может вызвать вибрации контактов. Поэтому предельно допустимая токовая погрешность для индукционных реле по условию поведения контактов может не регламентироваться.

Однако искажение формы кривой тока оказывает влияние на время действия реле. При несинусоидальном и неизменном

действующем токе время срабатывания реле зависит от фазы высших гармоник тока (преимущественно третьей) по отношению к основной. Пико-

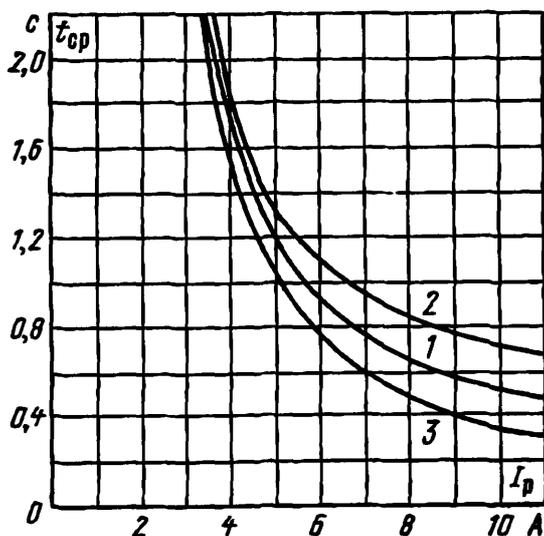


Рис. 3-6. Время срабатывания индукционного реле тока РТ-85/2 в зависимости от формы кривой тока.

1 — синусоидальный ток, 50 Гц; 2 — ток пикообразной формы ( $\Psi_3 \approx 180^\circ$ ); 3 — ток уплощенной формы ( $\Psi_3 \approx 0$ ).

образная форма тока вызывает увеличение времени действия реле, а уплощенная—уменьшение (рис. 3-6). Такое поведение реле объясняется степенью насыщения его магнитопровода. При пикообразной форме тока амплитуда м. д. с. больше (при неизменном действующем значении), чем при синусоидальной или уплощенной форме, поэтому индукция тоже выше. Насыщение полюсов магнитопровода реле уменьшает индуктивность к. з. витков и приводит к уменьшению вращающего момента, а следовательно, к увеличению времени действия реле. На рис. 3-6 кривая 3 построена для случая, когда ТТ работает на активную нагрузку с  $f=60\%$ . Видно, что наибольшее увеличение времени срабатывания реле по сравнению с временем действия при синусоидальном токе (кривая 1) составляет около 30%. Поэтому для ограничения влияния искажений формы кривой вторичного тока ТТ на время-токовую характеристику реле в качестве допустимой погрешности принимается  $f_{\text{доп}}=50\%$ .

#### 3-4. ИНДУКЦИОННЫЕ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Уравнение вращающего момента реле РНМ при искаженной кривой тока по (3-3) имеет вид:

$$M_{\text{вр}} \approx k\Phi_{\text{в}}[\Phi_{1\text{т}} \sin \varphi + 2\Phi_{3\text{т}} \sin(2\omega t + \Psi_3 + \varphi)], \quad (3-8)$$

где  $\Phi_{\text{в}}$  — поток, создаваемый током в обмотке напряжения реле;  $\Phi_{1\text{т}}$ ,  $\Phi_{3\text{т}}$  — потоки, создаваемые токами соответственно первой и третьей гармоник в токовой обмотке реле;  $\varphi$  — угол между  $\Phi_{\text{в}}$  и  $\Phi_{1\text{т}}$ .

В (3-8) не учтены гармоники момента выше второй вследствие их незначительного влияния. Из (3-8) видно, что  $M_{\text{вр}}$  при искаженной форме тока содержит постоянную

$$M_0 = k\Phi_{\text{в}}\Phi_{1\text{т}} \sin \varphi \quad (3-9)$$

и переменную

$$M_{\sim} = 2k\Phi_{\text{в}}\Phi_{3\text{т}} \sin(2\omega t + \Psi_3 + \varphi) \quad (3-10)$$

составляющие.

Переменная составляющая изменяется во времени с двойной частотой питающего напряжения и пропорциональна потоку третьей гармоники. При отсутствии высших гармоник в токе и в потоке магнитопровода реле (если последний не насыщается) вращающий момент не содержит переменной составляющей.

Так же как и реле тока, поведение РНМ будем характеризовать коэффициентом пульсации вращающего момента. Из (3-9) и (3-10) получаем:

$$K_{\Pi} = \frac{2\Phi_{3T} \sin(2\omega t + \Psi_3 + \varphi)}{\Phi_{1T} \sin \varphi}. \quad (3-11)$$

Отсюда следует, что поведение реле зависит от угла  $\varphi$  и отношения  $\Phi_{3T}/\Phi_{1T}$  в токовых полюсах магни-

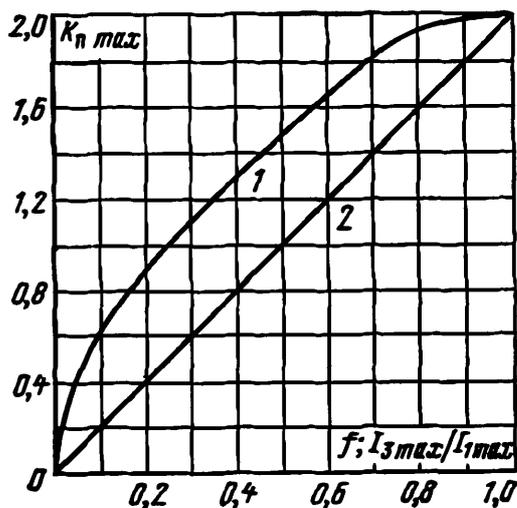


Рис. 3-7. Изменение коэффициента пульсации вращающего момента для реле направления мощности.

1 —  $K_{\Pi \max} = F(f)$ , в относительных единицах; 2 —  $K_{\Pi \max} = F(I_{3\max}/I_{1\max})$ .

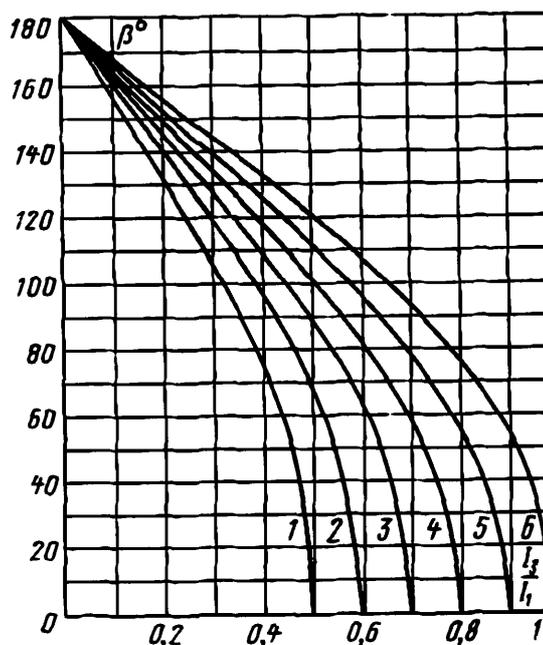


Рис. 3-8. Зоны надежной работы реле направления мощности.

1 —  $K_{\Pi \max \text{ доп}} = 1$ ; 2 —  $K_{\Pi \max \text{ доп}} = 1,2$ ; 3 —  $K_{\Pi \max \text{ доп}} = 1,4$ ; 4 —  $K_{\Pi \max \text{ доп}} = 1,6$ ; 5 —  $K_{\Pi \max \text{ доп}} = 1,8$ ; 6 —  $K_{\Pi \max \text{ доп}} = 2,0$ .

топровода и не зависит от потока в полюсах напряжения (при условии синусоидальности  $\Phi_{\Pi}$ ). Если не учитывать насыщения токовых полюсов магнитопровода реле, что считается часто допустимым, максимальное значение  $K_{\Pi}$  из (3-11) можно представить в виде

$$K_{\Pi \max} = \frac{2I_{3\max}}{I_{1\max} \sin \varphi}. \quad (3-12)$$

На рис. 3-7 приведена зависимость  $K_{\Pi \max} = F(I_{3\max}/I_{1\max}, f)$  для  $\varphi = \pi/2$ . При известном допустимом значении  $K_{\Pi \max}$  и  $I_{3\max}/I_{1\max}$  зона четкой работы

реле в электрических градусах определяется непосредственно из (3-12) по выражению

$$\beta = 2 \left( 90 - \arcsin \frac{2I_{3max}}{I_{1max} K_{п max доп}} \right). \quad (3-13)$$

Зависимости  $\beta = f(I_{3max}/I_{1max})$  при различных значениях  $K_{п max доп}$  приведены на рис. 3-8.

Испытания реле РНМ подтвердили справедливость (3-13) и показали, что при  $K_{п max} \leq 1$  реле работает без вибрации с зоной  $\beta \approx 180^\circ$ .

В некоторых режимах к. з. возможны искажения формы кривой тока в реле, при которых отношение  $I_{3max}/I_{1max}$  может достигать значений, превышающих 0,5, т. е. таких значений, когда зона надежной работы реле вследствие интенсивной вибрации контактов существенно снижается или отсутствует вовсе (при  $I_{3max}/I_{1max} = 0,5$  и  $K_{п max доп} = 1$ ,  $\beta = 0$ ). Вибрация контактов может заметно уменьшить зону надежного несрабатывания реле, что создаст опасность его излишнего срабатывания при к. з. вне защищаемой зоны. Наиболее вероятны такие режимы для реле, включенных в нулевой провод ТТ, работающих с повышенными погрешностями при двухфазных к. з. на землю. В зависимости от условий двухфазного к. з. на землю при одних и тех же искажениях кривых фазных токов ТТ суммарный ток в нулевом проводе может иметь различные значения и форму кривой. Гармонический состав тока в нулевом проводе может быть определен по известному гармоническому составу токов фаз и углам сдвига между соответствующими гармониками токов этих фаз.

Рассмотрим несколько случаев двухфазных к. з. на землю вблизи от места установки защиты при различных отношениях суммарных сопротивлений нулевой и обратной последовательностей в месте к. з.:

$$\frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}} = 0; \quad \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}} = 1; \quad \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}} = \infty.$$

При  $X_{0\Sigma}/X_{2\Sigma} = 0$  угол сдвига между основными гармониками токов фаз В и С, а также между всеми высшими гармониками, не кратными трем, равен  $60^\circ$ . В этом случае первая и все высшие гармоники (не кратные трем) в нулевом проводе в  $\sqrt{3}$  раза больше, чем в фазных проводах, а кратные трем равны нулю.

При  $X_{0\Sigma}/X_{2\Sigma} = 1$  основные и все высшие (не кратные трем) гармоники фазных токов сдвинуты соответственно на  $120^\circ$ . В нулевом

проводе основная и все высшие (не кратные трем) гармоники равны их фазным значениям, а гармоники, кратные трем удваиваются. В режиме двухфазного к. з. на землю с  $X_{0\Sigma}/X_{2\Sigma} \rightarrow \infty$  угол между одноименными гармониками фазных токов стремится к  $180^\circ$ , а сумма их в нулевом проводе — к нулю.

Наибольшее содержание высших гармоник, кратных трем, в нулевом проводе может иметь место при трехфазном к. з. (втрое большее, чем в фазных токах). Однако в этом случае реле РНМ нулевой последовательности не будет работать, так как отсутствует напряжение  $3U_0$ . Отсюда следует, что наиболее тяжелым для РНМ нулевой последовательности является случай двухфазного к. з. на землю с  $X_{0\Sigma}/X_{2\Sigma} = 1$ . При этом допустимая доля третьей гармоники в фазных токах вдвое меньше, чем для реле РНМ, включенных на эти фазные токи.

Дополнительным фактором, влияющим на поведение реле, является увеличение угловой погрешности ТТ с ростом  $\varepsilon$  и  $f$ .

В настоящее время известно несколько предложений по снижению вибрации контактов реле РНМ. Одним из них является способ [35], в соответствии с которым на токовые полюса магнитопровода реле надеваются к. з. медные гильзы сечением  $24 \text{ мм}^2$ . Проверка этого способа в Челябинэнерго и в ГО ЭСП показала достаточно высокую его эффективность. У реле РБМ-01 при  $I_3/I_1 \approx 0,63$  ( $f \approx 50\%$ , нагрузка на ТТ активная) зона четкой работы с введением к. з. гильз увеличивается практически с нуля до  $132^\circ$  (рис. 3-9).

Однако этот способ имеет ряд существенных недостатков. К ним относятся: увеличение мощности срабатывания в  $1,5\text{—}1,7$  раза, смещение угла максимальной чувствительности на  $20\text{—}40^\circ$  и зависимость его от формы кривой тока. Эти недостатки (особенно последний) практически исключают возможность широкого использования реле с гильзами. Осуществление предложенной в [35] корректировки угла максимальной чувствительности реле в зависимости от степени искажения формы кривой тока сложно и вряд ли целесообразно для практического применения. Уменьшение вибрации контактов реле направления мощности может быть достигнуто благодаря ослаблению потока третьей гармоники в магнитопроводе реле [36] путем подключения конденсаторов параллельно каждой секции обмотки напряжения реле (рис. 3-10). Полагая, что все элементы схемы замещения (рис. 3-11) линейны, можно записать выражение для определения емкости конденсатора  $C$  в зави-

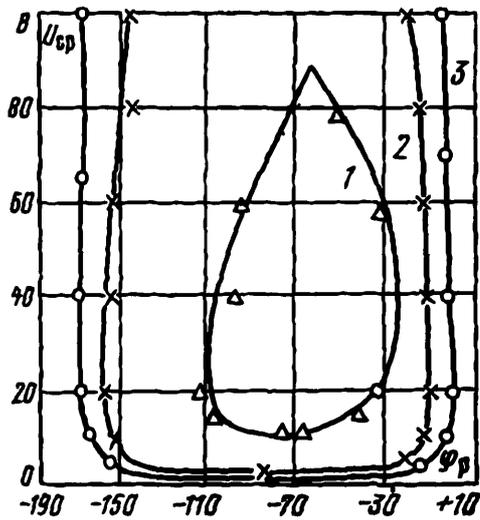


Рис. 3-9.

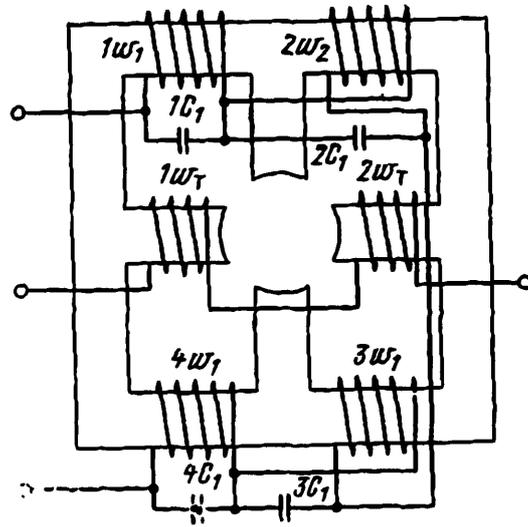


Рис. 3-10.

Рис. 3-9. Зоны работы реле RBM-01 при  $f=50\%$ ,  $I_p=5$  А.  
 1 — без к. з. гильз по надежному замыканию контактов; 2 — с к. з. гильзами по надежному замыканию контактов; 3 — то же, что 2, по замыканию контактов реле РП-212.

Рис. 3-10. Схема подключения конденсаторов к реле РНМ.

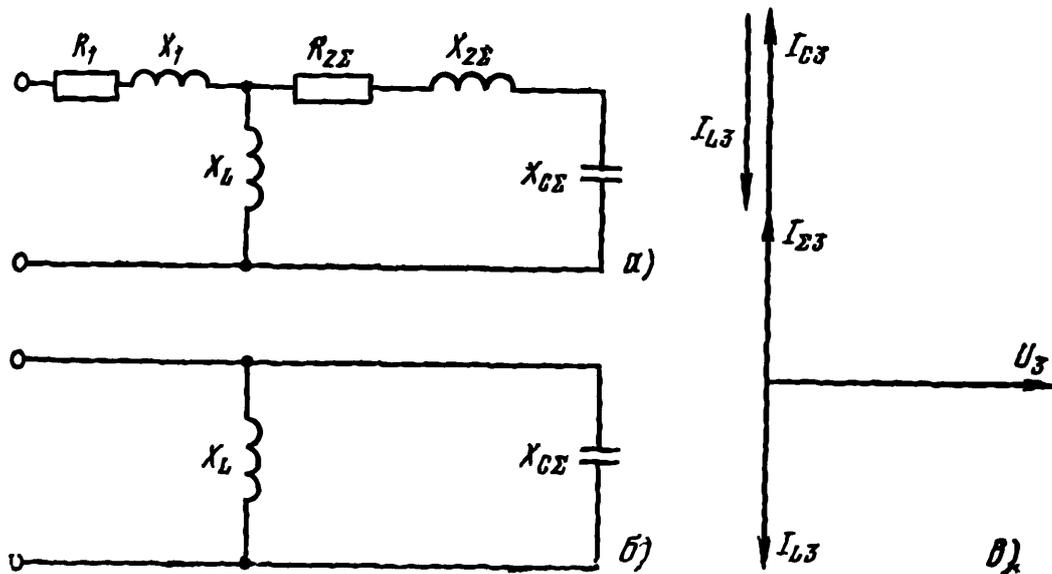


Рис. 3-11. Схема замещения реле РНМ с подключенными конденсаторами при питании по цепи тока и к. з. зажимами напряжения.  
 а — полная схема замещения; б — упрощенная схема замещения; в — векторная диаграмма для упрощенной схемы;  $R_1, X_1$  — активное и индуктивное (рассеяния) сопротивления токовой обмотки;  $R_{2\Sigma}, X_{2\Sigma}$  — суммарные активные и индуктивное (рассеяния) сопротивления обмотки напряжения;  $X_L$  — сопротивление ветви намагничивания токовых полюсов реле при замкнутых накоротко зажимах напряжения;  $X_{C\Sigma}$  — суммарное сопротивление шунтирующих конденсаторов.

симости от требуемой степени ослабления  $p$  значений  $K_{\Pi}$

$$C = \frac{p + 1}{4\omega X_{1L} (p + 9)}, \quad (3-14)$$

где  $X_{1L}$  — индуктивное сопротивление ветви намагничивания магнитопровода реле при  $\omega = 314$  рад/с.

Например, для реле РБМ-171/1 ( $X_{1L} = 26$  Ом) при  $p = 3$  (соответствует уменьшению  $K_{\Pi}$  в 3 раза — от значения 1,5 при  $f = 50\%$  по рис. 3-7 до 0,5) из (3-14) получим:

$$C = \frac{3 + 1}{4 \cdot 314 \cdot 26 \cdot (3 + 9)} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}$$

Из рис. 3-8 находим, что зона надежной работы реле увеличивается от нуля (при  $K_{\Pi, \text{доп}} = 1$  и  $I_3/I_1 = 0,5$ ) до  $142^\circ$  при подключении конденсаторов 10 мкФ к каждой секции обмотки напряжения.

Результаты расчетов при  $p = 3$ , выполненные для ряда реле, приведены в табл. 3-1.

Таблица 3-1

Тип реле	Число витков в одной секции обмотки напряжения	$X_{1L}$ , Ом	Расчетная емкость на одну секцию, мкФ	Принято к установке, мкФ
РБМ-178/1	520	18,8	19	20
РБМ-171/1 (РБМ-271/1)	720	26	10,25	10
ИМБ-178А/1	1450	52	5	5
ИМБ-171А/1	1100	40	8,9	10

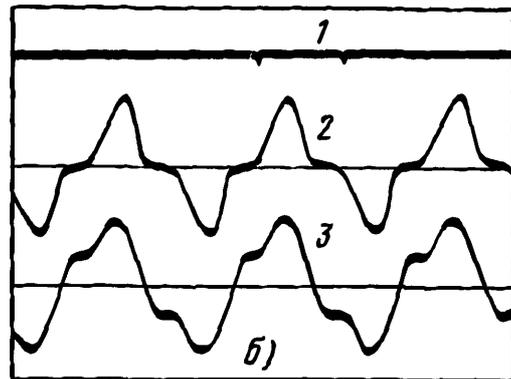
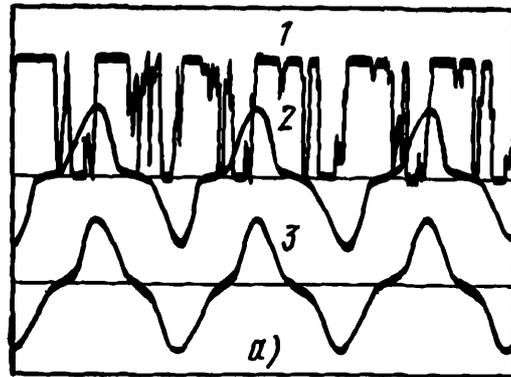
Экспериментальная проверка данного способа в условиях работы ТТ на активную нагрузку с токовой погрешностью 50—60% показала его высокую эффектив-

Таблица 3-2

Тип реле	$I_{p'}$ , А	$I_3/I_1$	Реле нормального исполнения					Реле с конденсаторами				
			$U_{p'}$ , В	$\varphi_{н.р'}$ , град	$\varphi_{н.б'}$ , град	$\varphi_{м.с'}$ , град	$P_{н'}$ , В·А	$C$ , мкФ	$\varphi_{н.р'}$ , град	$\varphi_{н.б'}$ , град	$\varphi_{м.с'}$ , град	$P_{н'}$ , В·А
РБМ-171/1	10	0,55	100	80	48	45	30,3	10	164	171	50	24,4
РБМ-271/1	10	0,52	100	68	85	45	33,6	10	165	155	50	27,5
ИМБ-178А/1	10	0,6	100	30	0	70	12,5	4	175	175	76	9,7
РБМ-171/1	50	0,55	40	90	75	—	—	10	140	146	—	—

Рис. 3-12. Осциллограммы работы реле РБМ-171/1 при токе  $I_p = 10$  А,  $I_s/I_1 = 0,55$ ,  $U_p = 100$  В,  $\varphi_p = 5^\circ$ .

а — реле нормального исполнения; б — реле с конденсаторами; 1 — ток в контактах; 2 — ток в токовой обмотке; 3 — магнитный поток в токовых полюсах.



ность. Результаты испытаний реле нормального исполнения и с конденсаторами приведены в табл. 3-2 и иллюстрируются осциллограммами на рис. 3-12.

В табл. 3-2  $\beta_{н.р}$  — зона надежной работы реле;  $\beta_{н.б}$  — зона надежной блокировки;  $P_v$  — потребление цепей напряжения;  $\varphi_{м.ч}$  — угол максимальной чувствительности,  $I_p$  и  $U_p$  — соответственно ток и напряжение реле. Зона надежной работы определялась по срабатыванию без вибрации реле РП-24, включенного через контакты реле РНМ. Подключение конденсаторов снижает потребление реле по цепи напряжения. Это снижение обусловлено частичной емкостной компенсацией индуктивной составляющей тока намагничивания. Угол максимальной чувствительности реле при введении в его схему конденсаторов практически не изменяется.

К недостатку способа следует отнести необходимость подбора конденсаторов по значению емкости с разбросом не более 3—5% для исключения самохода реле при отсутствии тока. По этой причине массовый выпуск реле с конденсаторами затруднителен. Такой способ может быть реализован в условиях энергосистем, когда уровень тока к. з. возрастает настолько, что возникает опасность отказов в срабатывании установленных в эксплуатацию реле РНМ из-за вибрации контактов.

Для уменьшения вибрации контактов реле РНМ предложено также использовать двухсторонние жесткие упоры, ограничивающие ход барабанчика (якоря) [37]. Этот способ эффективен только при определенной кратности и степени искажения формы кривой тока.

В Челябинэнерго уменьшение вибрации контактов реле РНМ достигается специальной регулировкой контактов. В отличие от предыдущего способа ограничение хода барабанчика осуществляется контактами с жесткими упорами. Указанные способы примерно равноценны и могут быть использованы вместе. Начиная с 1969 г., ЧЭАЗ выпускает реле РНМ с жесткими упорами. Модернизация выпускаемых в настоящее время реле РБМ заключается в следующем.

а) Неподвижные контакты выполнены сдвоенными, их пружины имеют различную частоту собственных колебаний, вследствие чего разрывы цепи при вибрации контактов смещены во времени. Свободные концы неподвижных контактов выполнены таким образом, что при действии подвижных контактов они перемещаются с трением по поверхности специального угольника, чем обеспечивается быстрое затухание вибраций.

б) Угол поворота подвижной системы ограничен двумя дополнительными упорами, за счет чего достигается увеличение зоны надежной работы реле.

в) В полюсах под токовой обмоткой сделаны вырезы, обеспечивающие быстрое насыщение полюсов и уменьшение амплитуды вибрации контактов вследствие улучшения формы кривой потока в токовых полюсах (уменьшения  $\Phi_3$  и  $K_{\Pi}$ ). Допустимые погрешности ТТ для РНМ различного исполнения приведены в табл. 4-1.

### 3-5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗАЩИТЫ

В ряде организаций проведены теоретические и экспериментальные исследования надежности работы дифференциально-фазных защит (ДФЗ) при высоких кратностях тока в установившихся режимах и переходных процессах к. з. Анализ работы пусковых органов и органа манипуляции в. ч. передатчиком защиты ДФЗ-2 (ДФЗ-201), выполненный в [38], свидетельствует, что поляризованное реле пускового органа работает без вибрации контактов при погрешностях ТТ с активной нагрузкой  $f=55-60\%$ . Это объясняется наличием в пусковом органе сглаживающего и резонансных контуров, ослабляющих влияние высших гармоник. На выходе комбинированного фильтра токов прямой и обратной последовательности  $I_1+kI_2$  высшие гармоники ослабляются резонансным контуром, настроенным на частоту,

близкую к частоте основной гармоники. Благодаря наличию резонансного контура начальная фаза выходного напряжения фильтра  $I_1 + kI_2$  (напряжения на входе органа манипуляции в ч. передатчиком) определяется фазой основной гармоники тока. Если сумма угловой погрешности ТТ и угла расхождения векторов напряжения по концам линии в режиме, предшествующем

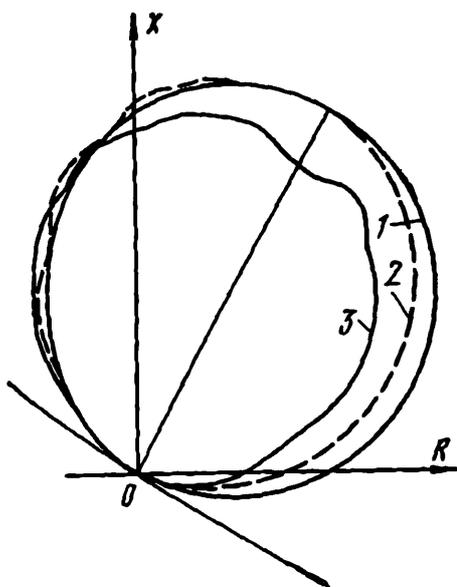


Рис. 3-13. Зоны работы реле сопротивления КРС-132, уставка  $Z_p = 10$  Ом.

1 — теоретическая характеристика при синусоидальном токе; 2 — действительная характеристика при синусоидальном токе; 3 — характеристика при несинусоидальном токе ( $K_n = 1,54$ ).

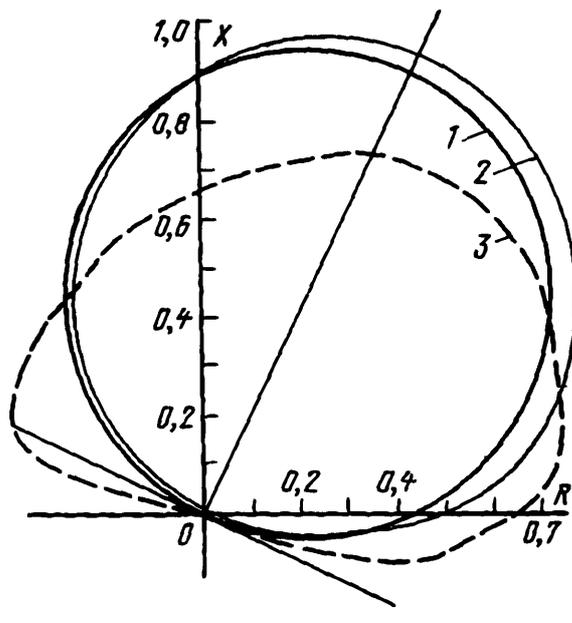


Рис. 3-14. Зоны работы дистанционного органа защиты ДЗ-2 при несинусоидальных токах. Уставка сопротивления 1 Ом,  $I_{дейст} = 5$  А.

1 — теоретическая характеристика при синусоидальном токе; 2 — действительная характеристика при синусоидальном токе; 3 — характеристика при несинусоидальном токе ( $f = 50\%$ ).

к. з. в защищаемой зоне, не превышает  $120-135^\circ$ , правильная работа защиты обеспечена. При работе ТТ с токовой погрешностью в установившемся режиме к. з. до  $50\%$  включительно указанное условие выполняется.

На основании этих данных, а также результатов проверки физической модели защиты ДФЗ-503 в ГО ЭСП и положительного опыта эксплуатации защиты можно сделать вывод о допустимости повышенных токовых погрешностей ТТ при к. з. в зоне действия дифференциально-фазных защит.

Для обеспечения надежной манипуляции в. ч. передатчиком допустимая токовая погрешность регламентируется следующим образом [39]:

$$f_{\text{доп}} \leq \frac{3(0,92 - I_{1\text{min}}/I_{1\text{kmax}}^{(3)})}{k}, \quad (3-15)$$

где  $k$  — коэффициент фильтра;  $I_{1\text{min}}$  — минимальный ток прямой последовательности, при котором имеет место надежная манипуляция;  $I_{1\text{kmax}}^{(3)}$  — максимальный ток трехфазного к. з. в начале защищаемой линии.

### 3-6. ДИСТАНЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ

Поведение дистанционных защит определяется работой входящих в них направленных реле сопротивления. В качестве измерительных органов дистанционных защит широкое распространение получили реле сопротивления индукционного типа.

Исследования реле КРС-132 при работе ТТ на активную нагрузку с  $f \leq 60\%$  выявили лишь незначительное сокращение рабочей зоны (рис. 3-13), обусловленное некоторым увеличением пульсирующего момента в выходном органе. Вибрации контактов реле не наблюдались. Отсутствие вибрации контактов выходного органа реле КРС-132 объясняется наличием резонансного контура во вторичной цепи промежуточного трансреактора. Контур настроен на частоту, близкую к 50 Гц.

Выпускаемая в настоящее время защита ДЗ-2 содержит направленные реле сопротивления, выполненные на принципе сравнения абсолютных значений величин, сформированных из тока и напряжения, в общем случае равных

$$\left. \begin{aligned} A &= k_1 U + k_2 I; \\ B &= k_3 U - k_4 I, \end{aligned} \right\} \quad (3-16)$$

где  $k_1, k_2, k_3, k_4$  — коэффициенты преобразования тока (четные индексы) и напряжения (нечетные индексы);  $I$  и  $U$  — соответственно разность фазных токов и междуфазное напряжение, подводимые к реле сопротивления. В качестве измерительного элемента используется магнитоэлектрическое реле.

Исследования защиты ДЗ-2, проведенные для широкого диапазона кратностей тока и значений токовой по-

грешности ( $I_1=5-25$  А;  $f=10-50\%$ ), показали, что при несинусоидальном токе наблюдается сокращение зоны действия дистанционного органа и изменение угла максимальной чувствительности. Так, при  $f=50\%$  зона действия уменьшается примерно на 26%, а угол максимальной чувствительности уменьшается с 60 до 25° (рис. 3-14). С уменьшением погрешности степень изменения указанных параметров снижается. Время срабатывания реле сопротивления при несинусоидальных токах не превышает значения, гарантированного заводом-изготовителем. При срабатывании защиты в зоне ее действия и любых искажениях входного тока вибрации контактов магнитоэлектрического реле практически не наблюдается. Это объясняется наличием сглаживающих фильтров в цепи реле.

Отмеченное сокращение зоны и уход угла максимальной чувствительности можно считать допустимыми, так как повышенные погрешности ТТ допускаются лишь при близких к з., когда изменение характеристик не приводит к отказу в срабатывании защиты.

## ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

### ВЫБОР ДОПУСТИМЫХ НАГРУЗОК НА ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

#### 4-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Расчетные условия для выбора допустимых нагрузок на обмотки ТТ, питающие токовые цепи устройств релейной защиты определяются на основе следующих требований [40].

1. Обеспечения точности работы измерительных органов релейной защиты при к. з. в расчетных точках электрической сети (полная погрешность ТТ  $\epsilon$  не должна превышать 10%).

2. Предотвращения отказа срабатывания защиты при наибольших токах к. з. в месте установки защиты вследствие чрезмерного увеличения угловой погрешности ТТ или вибрации контактов электромеханических реле, вызванной искаженной формой кривой тока.

3. Ограничения напряжения во вторичных цепях ТТ до допустимых значений.

Учитывая, что искаженная форма кривой тока оказывает неодинаковое влияние на различные измерительные органы устройств защиты, для них соответственно могут допускаться и различные погрешности ТТ. Значения  $f_{\text{доп}}$ , при которых обеспечивается устойчивое функционирование устройств релейной защиты, приняты на основании экспериментальных данных (см. гл. 3) и приведены в табл. 4-1.

Таблица 4-1

Тип защиты и реле	$f_{\text{доп}} \%$
Максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени и отсечка с реле тока: РТ-40 модернизированные, выпускаются с 1969 г. РТ-40/Р на базе модернизированного РТ-40	50 Не регламентируется
РТ-40, выпускались до 1969 г. ЭТ-520	40 13
Максимальная токовая защита с ограниченно зависимой выдержкой времени на реле РТ-80, РТ-90	50
Направленные максимальные токовые и дистанционные защиты от междуфазных к. з. с реле: РБМ с жесткими упорами, выпускаются с 1970 г. РБМ и ИМБ, выпускались до 1970 г. РБМ с жесткими упорами и конденсаторами	30 10 50
Направленные токовые защиты нулевой последовательности от к. з. на землю в сетях 110 кВ и выше с реле: РБМ с жесткими упорами, выпускаются с 1970 г. РБМ и ИМБ, выпускались до 1970 г. РБМ с жесткими упорами и конденсаторами	20 10 40 50
Дистанционная защита с направленными реле сопротивления (индукционными и магнитоэлектрическими)	Не регламентируется
Продольные дифференциальные токовые защиты (трансформаторов, генераторов, шин и линий) с реле РНТ, ДЗТ (если тормозная обмотка не обтекается током при к. з. в защищаемой зоне)	Не регламентируется
Дифференциально-фазные высокочастотные защиты ДФЗ-2; ДФЗ-201; ДФЗ-402, ДФЗ-501	См. (3-15)

В зависимости от принципа действия измерительных органов релейной защиты определяющим ее поведение фактором является токовая или полная погрешность.

Так, например, для продольных дифференциальных токовых защит (шин, генераторов, трансформаторов, линий), а также для линейных защит, включенных на сумму токов нескольких ТТ, ток небаланса определяется током намагничивания наиболее нагруженного ТТ, поэтому для них следует регламентировать полную погрешность и пользоваться кривыми предельных кратностей.

Поведение релейных защит с токовыми или дистанционными измерительными органами (ИО) зависит от значения и фазы тока защищаемого объекта. Для таких защит регламентируются токовая и угловая погрешности ТТ. При массовых расчетах, выполняемых на этапе проектирования энергетических объектов, необходимость использования двух видов погрешностей ТТ представляет определенные неудобства. Поэтому учитывая, что кривые предельных кратностей  $K_{10}=f(Z_H)$ , построенные по условию  $\varepsilon \leq 10\%$ , незначительно (на 10—12%) отличаются от кривых 10%-ных кратностей  $m=f(Z_H)$ , построенных по условию  $f \leq 10\%$ , с целью единообразия в типовых расчетах допустимо использовать кривые  $K_{10}=f(Z_H)$  независимо от типа защиты; это дает определенный расчетный запас. Для более точных расчетов должны использоваться те виды погрешностей ТТ, которые определяют поведение защиты.

Анализ большого числа характеристик ТТ, выполненный с привлечением информационных материалов заводов, свидетельствует о том, что  $K_{10ном}$  часто занижается. Это приводит к тому, что точка, соответствующая  $K_{10ном}$ , может располагаться ниже кривой предельной кратности. Приводимые в заводских информационных материалах значения следует рассматривать как гарантированные (в ряде случаев с довольно большим запасом). Поэтому для повышения точности расчетов целесообразно определять  $K_{10ном}$  по действительным (экспериментальным) кривым предельных кратностей или расчетным путем.

#### 4.2. РАСЧЕТНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ЗАЩИТ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ

**Токовые защиты с независимой выдержкой времени.** Для обеспечения необходимой чувствительности и предотвращения отказов в срабатывании защиты токовая погрешность ТТ не должна превышать 10% при токе срабатывания реле.

## Расчетная кратность тока

$$K_{\text{расч}} = \frac{1,1I_{1с.з}}{I_{1НОМ}}, \quad (4-1)$$

где  $I_{1с.з}$  — первичный ток срабатывания защиты;  $I_{1НОМ}$  — номинальный первичный ток; коэффициент 1,1 учитывает увеличение кратности первичного тока по сравнению с кратностью вторичного тока вследствие 10%-ной погрешности ТТ.

Для реле тока максимальных токовых защит трансформаторов, подключенных к ТТ, встраиваемым в силовые трансформаторы (автотрансформаторы), в условиях срабатывания реле может быть допущена  $\epsilon > 10\%$ , если при  $K_{\text{расч}}$  рабочая точка на кривой предельных кратностей расположена ниже точки перегиба (на «обратной» части кривой, — см. рис. П2-45, кривые 1—4). В этом случае коэффициент чувствительности защиты должен определяться с учетом увеличенной погрешности ТТ.

С целью предотвращения отказа в срабатывании защиты при к. з. в защищаемой зоне из-за вибрации контактов токовых реле токовая погрешность не должна превышать значений, приведенных в табл. 4-1.

Максимальная кратность тока к. з., при которой токовая погрешность не должна превышать предельных значений, определяется соотношением

$$K_{\text{max}} = \frac{I_{1к \text{ max}}}{I_{1НОМ}}, \quad (4-2)$$

где  $I_{1к \text{ max}}$  — максимально возможный ток при к. з. в начале защищаемого присоединения. Для реле РТ-40 при  $\cos \varphi_2 \leq 0,8$ , а также для реле РТ-40/Р (при любом характере нагрузки на ТТ)  $K_{\text{max}}$  не регламентируется.

Следует отметить, что для токовых защит нет необходимости проверять коэффициент чувствительности при близких к. з., так как абсолютное значение вторичного тока ТТ, несмотря на увеличенную токовую погрешность, всегда больше по сравнению с условием проверки чувствительности при повреждении в конце зоны действия защиты, где  $f \leq 10\%$ . Это положение справедливо для защит, ИО которых реагируют на интегральные значения токов (действующие и средние) и чувствительность которых практически не снижается при искаженной форме кривой тока (реле РТ-40, РТ-40/Р и др.).

**Максимальные токовые защиты с ограниченно-зависимой выдержкой времени. Для обеспечения селективности**

защиты токовая погрешность не должна превышать 10% при токе к. з., по которому производится согласование временных характеристик ступеней защиты,

$$K_{\text{расч}} = \frac{1,1I_{1\text{согл}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (4-3)$$

где  $I_{1\text{согл}}$  — первичный ток, при котором производится согласование по времени ступеней защиты. Для создания некоторого запаса часто принимают  $I_{1\text{согл}}$  равным току, при котором начинается независимая часть характеристики реле [41]. Максимальная кратность тока к. з., при которой токовая погрешность не должна превышать предельных значений (табл. 4-1), определяется по (4-2).

**Направленные токовые и дистанционные защиты.** Для обеспечения необходимой чувствительности и предотвращения излишнего срабатывания при внешних к. з. ступенчатых защит токовая погрешность ТТ не должна превышать 10% при повреждениях в расчетной точке. Расчетной является точка к. з. в конце зоны действия первой ступени защиты.

Если согласование защит смежных элементов с первой ступенью данной защиты не производится, расчетная точка к. з. может приниматься в конце зоны действия второй ступени.

Расчетная кратность

$$K_{\text{расч}} = \frac{I_{1\text{расч}}}{I_{\text{ном}}} \quad (4-4)$$

(для токовых защит  $I_{1\text{расч}} = 1,1I_{\text{к.з.}}$ ).

Предельно допустимая токовая погрешность при повреждении в защищаемой зоне с максимальной кратностью тока к. з. по (4-2) не должна превышать значений, определяемых типом реле (см. табл. 4-1).

Для предотвращения излишнего срабатывания защиты при внешних к. з. токовая погрешность не должна превышать 10% при повреждениях на шинах подстанции, к которым подключено защищаемое присоединение (к. з. «за спиной»). В качестве расчетного при этом принимается наибольший ток, протекающий по защищаемой линии.

**Продольные дифференциальные токовые защиты (трансформаторов, генераторов, шин и линий).** Для предотвращения излишнего срабатывания защиты при

внешних к. з. полная погрешность ТТ не должна превышать 10% при наибольшем токе внешнего к. з.:

$$K_{расч} = \frac{I_{1расч}}{I_{1ном}}. \quad (4-5)$$

Максимальная кратность тока  $K_{max}$ , которая для дифференциальных токовых защит трансформаторов (автотрансформаторов) во много раз превышает  $K_{расч}$ , может не регламентироваться при использовании реле типа РНТ (и ДЗТ при отсутствии тока в тормозной обмотке в режиме определения  $K_{max}$ ), несмотря на загробление этих реле при искаженной форме кривой тока. Это допустимо, поскольку большая кратность тока в реле обеспечивает его надежное срабатывание.

В случае использования дифференциальных реле с торможением (типа ДЗТ) при обтекании током тормозной обмотки в режиме определения  $K_{max}$  следует руководствоваться рекомендациями [42].

**Дифференциально-фазные высокочастотные защиты.** Для предотвращения излишнего срабатывания защиты при наибольшем токе внешнего к. з. токовая погрешность ТТ не должна превышать 10%.

Расчетная кратность

$$K_{расч} = \frac{I_{1расч}}{I_{1ном}}. \quad (4-6)$$

Для обеспечения надежной работы органа манипуляции при повреждениях в защищаемой зоне допустимая токовая погрешность при  $K_{max}$  не должна превышать значений, определяемых по (3-15). Значения тока  $I'_{1min}$  в (3-15), приведенные ко вторичным величинам ТТ, представлены в табл. 4-2 [39].

Таблица 4-2

Тип панели	$I'_{1min}$ , А, при $k$ :			
	4	6	8	10
ДФЗ-2, ДФЗ-201	1,1	1,6	2,0	—
ДФЗ-402, ДФЗ-502	—	0,18	0,24	0,3

**Защиты, включенные на сумму токов двух и более ТТ.** Здесь необходимо учитывать следующее:

а) Трансформаторы тока, совместно питающие защиту, часто бывают разнотипными (например, один встроенный в силовой трансформатор, а другой опорный)

и их характеристики (за исключением коэффициента трансформации) могут весьма существенно отличаться.

б) В цепи нагрузки протекает сумма вторичных токов обоих ТТ, что увеличивает индукцию в их магнитопроводах и погрешности по сравнению с одиночно работающим ТТ при том же токе через его первичную обмотку.

в) Точность работы ИО защиты характеризуется суммарной токовой (или полной) погрешностью ТТ, которая и должна регламентироваться.

Суммарная токовая погрешность (по аналогии с токовой погрешностью одиночного ТТ), %, будет:

$$f_{\Sigma} = \frac{n_{11} I_{2\Sigma} - I_{1\Sigma}}{I_{1\Sigma}} 100, \quad (4-7)$$

где  $I_{2\Sigma}$  — ток в нагрузке, подключенной на сумму токов двух ТТ;  $I_{1\Sigma}$  — суммарный первичный ток, подлежащий трансформации.

При  $f_{\Sigma} \leq 10\%$  погрешность одного из ТТ может быть существенно больше  $10\%$ ; она определяется параметрами ТТ и током, протекающим через его первичную обмотку. Трансформаторы тока оказывают взаимное влияние друг на друга, особенно заметное в режимах насыщения магнитопроводов. Расчет погрешностей ТТ в установившемся режиме к. з. для этих случаев иллюстрируется примером, приведенным в § 4-5. Особенности работы защит при включении их на сумму вторичных токов двух ТТ частично рассмотрены в [43].

#### 4.3. РАСЧЕТ СЕЧЕНИЙ ЖИЛ КОНТРОЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ

**Вывод расчетных выражений.** Независимо от схемы соединения вторичных цепей ТТ и вида к. з. сопротивление нагрузки (по модулю) можно записать в общем виде:

$$Z_{\text{расч}} = | \underline{a} Z_{\phi} + \underline{b} Z_0 + \underline{d} R_{\text{каб}} | + R_{\text{пер}}, \quad (4-8)$$

где  $Z_{\phi}$  — полное сопротивление релейной нагрузки в наиболее нагруженной фазе;  $Z_0$  — то же, но в нейтрали при соединении ТТ по схеме звезды (или в общей цепи схемы неполной звезды);  $R_{\text{каб}}$  — активное сопротивление кабеля от зажимов вторичной обмотки ТТ до места установки релейной аппаратуры;  $R_{\text{пер}}$  — переходное сопротивление

соединительных контактов в токовых цепях защит;  $\underline{a}$ ,  $\underline{b}$ ,  $\underline{d}$  — коэффициенты, зависящие от схемы соединения обмоток ТТ, схемы включения нагрузки и вида к. з. (в общем случае комплексные);  $Z_{\text{расч}}$  — расчетное сопротивление нагрузки на ТТ.

Методика расчета  $R_{\text{каб}}$  основывается на следующих допущениях.

1. При вычислении  $Z_{\phi}$  и  $Z_0$  с целью упрощения принимается, что все полные сопротивления последовательно включенных элементов в фазной цепи и цепи нейтрали имеют одинаковые углы, т. е. могут складываться арифметически (аналогичное допущение принималось и ранее).

2. Выражение (4-8) заменяется расчетным соотношением

$$Z_{\text{расч}} = |\underline{a}Z_{\phi} + \underline{b}Z_0| + |\underline{d}R_{\text{каб}}| + R_{\text{пер}}. \quad (4-9)$$

При этом предполагается, что комплексные сопротивления  $\underline{a}Z_{\phi} + \underline{b}Z_0$  и  $\underline{d}R_{\text{каб}}$  совпадают по углу. Принятое упрощение приводит к некоторой погрешности расчета и создает дополнительный запас. Погрешность расчета может быть определена по формуле

$$\Delta = \frac{R'_{\text{каб}} - R_{\text{каб}}}{R'_{\text{каб}}} = \left( 1 - \frac{1 - n}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \lambda - n \cos \lambda}} \right) 100,$$

где

$$n = \frac{|\underline{a}Z_{\phi} + \underline{b}Z_0| + R_{\text{пер}}}{Z_{\text{расч}}};$$

$\lambda$  — угол сдвига между комплексными сопротивлениями  $\underline{a}Z_{\phi} + \underline{b}Z_0$  и  $\underline{d}R_{\text{каб}}$ ;  $R'_{\text{каб}}$ ,  $R_{\text{каб}}$  — сопротивления кабеля, определенные соответственно при  $\lambda \neq 0$  и  $\lambda = 0$ . Например, при  $n = 0,5$  и  $\lambda = 30^\circ$   $\Delta = 6,5\%$ ; а при  $n = 0,5$  и  $\lambda = 45^\circ$   $\Delta = 15,3\%$ .

3. Допустимое сопротивление нагрузки на ТТ определяется по кривым предельных кратностей, построенным при  $\cos \varphi_2 = 0,8$ . В реальных условиях  $\cos \varphi_2$  — параметр переменный, зависящий от ряда факторов (применяемой аппаратуры и схем защиты, длины и сечения контрольного кабеля, кратности токов к. з. и др.). Обычно его значения лежат в пределах 0,6—1,0. Когда  $\cos \varphi_2 > 0,8$ , использование кривых предельных кратностей дает расчетный запас (5—7%), так как при активном

характере нагрузки допустимое сопротивление на ТТ увеличивается (см. векторную диаграмму ТТ на рис. 1-3). При  $\cos \varphi_2 < 0,8$  допустимое сопротивление на ТТ по сравнению с выбранным по кривым должно быть уменьшено, однако степень этого уменьшения при реальных углах  $\varphi_2$  ( $\cos \varphi_2 \geq 0,6$ ) настолько мала (1—5%), что может не учитываться при расчетах, тем более, что первые два допущения дают существенно больший запас.

Выразим  $Z_{\text{расч}}$  в (4-9) через  $Z_{\text{н.доп}}$ , определенное по кривым при известном  $K_{\text{расч}}$ :

$$Z_{\text{расч}} = m Z_{\text{н.доп}} \quad (4-10)$$

В общем случае распределение нагрузки между  $N$  последовательно включенными ТТ определяется соотношением их мощностей или параметров  $B$ ,  $Q$ ,  $\omega_2$ , т. е.

$$m = \frac{1}{B_{(p)} Q_{(p)} \omega_{2(p)}} \sum_{\alpha=1}^N B_{\alpha} Q_{\alpha} \omega_{2\alpha},$$

где  $B_{(p)}$ ,  $Q_{(p)}$ ,  $\omega_{2p}$  — соответственно индукция, сечение магнитопровода и число вторичных витков ТТ, для которого выполняется расчет;  $B_{\alpha}$ ,  $Q_{\alpha}$ ,  $\omega_{2\alpha}$  — те же параметры ТТ с номером  $\alpha$ .

При  $N=2$

$$m = \frac{B_{(1)} Q_{(1)} \omega_{2(1)} + B_{(2)} Q_{(2)} \omega_{2(2)}}{B_{(p)} Q_{(p)} \omega_{2(p)}}, \quad (4-11)$$

где  $p=1$ , если расчет ведется для первого ТТ и  $p=2$  — для второго ТТ.

Если допустить, что в магнитопроводах ТТ, вторичные обмотки которых соединены последовательно, индукция примерно одинакова, то из (4-11) получим:

$$m \approx \frac{Q_{(1)} \omega_{2(1)} + Q_{(2)} \omega_{2(2)}}{Q_{(p)} \omega_{2(p)}}. \quad (4-12)$$

Из (4-9) с учетом (4-10) можно определить

$$R_{\text{каб}} = \frac{m(1-n)}{d} Z_{\text{н.доп}}, \quad (4-13)$$

где

$$n = \frac{|aZ_{\phi} + bZ_0| + R_{\text{пер}}}{mZ_{\text{н.доп}}}. \quad (4-14)$$

Используя известную зависимость

$$l = R_{\text{каб}} \frac{S}{\rho}, \quad (4-15)$$

из (4-13) получаем расчетное выражение для допустимой длины контрольного кабеля:

$$l_{\text{доп}} = Z_{\text{н.доп}} \frac{mS(1-n)}{\rho d}, \quad (4-16)$$

где  $S$  — сечение жилы кабеля,  $\text{м}^2$ ;  $\rho$  — удельное сопротивление материала жил кабеля,  $\text{Ом} \cdot \text{м}$ ;  $l_{\text{доп}}$  — допустимая длина кабеля,  $\text{м}$ .

Расчетные выражения для  $n$  и  $d$  в зависимости от схемы соединения вторичных цепей ТТ и вида к. з. приведены в табл. 4-3 для  $m=1$ . При  $m \neq 1$  значения  $n$  следует разделить на  $m$ .

Можно отметить, что подстановка значений коэффициентов  $n$  и  $d$  в (4-9) приводит к известным расчетным соотношениям. Использование принятых коэффициентов, характеризующих все схемы соединения обмоток ТТ и виды к. з., удобно, в частности, для выполнения расчетов на ЭВМ.

Практические расчеты удобно вести в базисных величинах, вычисленных, например, для кабеля с медными жилами сечением  $2,5 \text{ мм}^2$ . В этом случае из (4-16) при  $m=1$ ;  $S_6=2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ ;  $\rho=1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  получим:

$$\frac{l_6}{Z_{\text{н.доп}}} = 143 \frac{1-n}{d}. \quad (4-17)$$

Вычислив  $l_6$  из (4-17) при известном  $Z_{\text{н.доп}}$ , из соотношения

$$\frac{S_{\text{расч}}}{S_6} = \frac{l_{\text{дейст}}}{l_6} \quad (4-18)$$

находим расчетное сечение жил кабеля,  $\text{мм}^2$ :  
с медными жилами

$$S_{\text{расч Cu}} = 2,5 \frac{l_{\text{дейст}}}{l_6}; \quad (4-19)$$

с алюминиевыми жилами

$$S_{\text{расч Al}} = 4 \frac{l_{\text{дейст}}}{l_6}. \quad (4-20)$$

Здесь  $l_{\text{дейст}}$  — действительная длина кабеля от ТТ до места установки релейной аппаратуры,  $\text{м}$ .

Таблица 4-3

Схема соединенный ТТ в нагрузки	Вид к. з.	n	d
	$K^{(s)}$ и $K^{(s)}$	$\frac{Z_\phi + R_{пер}}{Z_{доп}}$	1
	$K^{(s)}$	$\frac{Z_\phi + Z_0 + R_{пер}}{Z_{доп}}$	2
	$K^{(s,1)}$	$\frac{\sqrt{Z_\phi^2 + 2(1 + \cos \alpha)(Z_0 + Z_\phi Z_0)} + R_{пер}}{Z_{доп}}$	$\sqrt{5 + 4 \cos \alpha}$
	$K^{(s)}$ за трансформатором $\Delta/\Delta-11$	$\frac{Z_\phi + R_{пер}}{Z_{доп}}$	1
	$K^{(s)}$ и $K^{(s)}$ за трансформатором $\Delta/\Delta-11$	$\frac{3Z_\phi + R_{пер}}{Z_{доп}}$	3

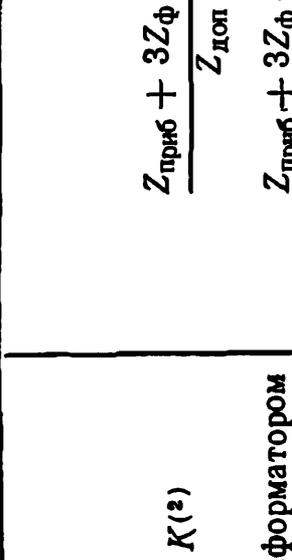
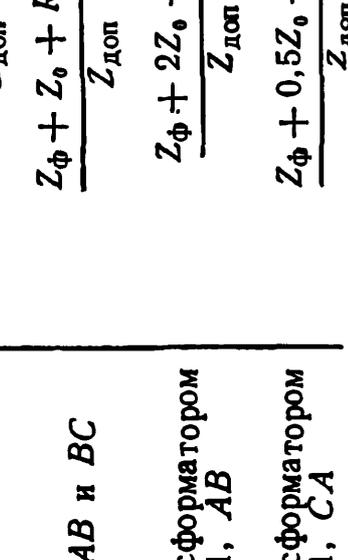
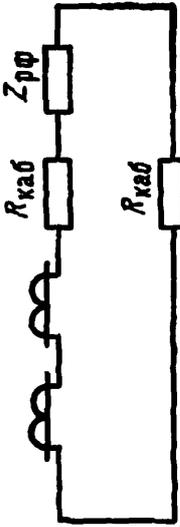
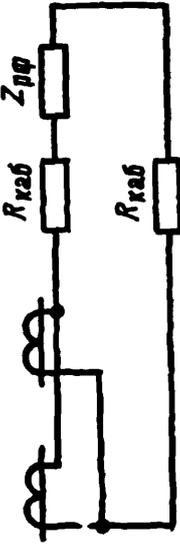
Схема соединений ТТ и нагрузки	Вид к. з.	n	d
	<p><math>K^{(1)}</math> и <math>K^{(2)}</math></p> <p><math>K^{(2)}</math> за трансформатором <math>\lambda/\Delta</math>-11</p>	$\frac{Z_{\text{приб}} + 3Z_{\phi} + R_{\text{пер}}}{Z_{\text{доп}}}$ $\frac{Z_{\text{приб}} + 3Z_{\phi} + R_{\text{пер}}}{Z_{\text{доп}}}$	<p>2</p> <p>2</p>
	<p><math>K^{(3)}</math></p> <p><math>K^{(2)}</math> фаз AB и BC</p> <p><math>K^{(2)}</math> за трансформатором <math>\lambda/\Delta</math>-11, AB</p> <p><math>K^{(2)}</math> за трансформатором <math>\lambda/\Delta</math>-11, CA</p>	$\frac{\sqrt{Z_{\phi}^2 + Z_0^2 + Z_{\phi}Z_0 + R_{\text{пер}}}}{Z_{\text{доп}}}$ $\frac{Z_{\phi} + Z_0 + R_{\text{пер}}}{Z_{\text{доп}}}$ $\frac{Z_{\phi} + 2Z_0 + R_{\text{пер}}}{Z_{\text{доп}}}$ $\frac{Z_{\phi} + 0,5Z_0 + R_{\text{пер}}}{Z_{\text{доп}}}$	<p>1,73</p> <p>2</p> <p>3</p> <p>1,5</p>

Схема соединений ТТ и нагрузки	Вид к. з.	$n$	$d$
	$K^{(1)}$	$\frac{1,73Z_{\phi} + R_{пер}}{Z_{доп}}$	3,46
	$K^{(2)}, CA$	$\frac{2Z_{\phi} + R_{пер}}{Z_{доп}}$	4
	$K^{(2)}, AB$ и $BC$	$\frac{Z_{\phi} + R_{пер}}{Z_{доп}}$	2
	$K^{(2)}, AB$ и $BC$		2
	$K^{(2)}, CA$	$\frac{Z_{\phi} + R_{пер}}{Z_{доп}}$	3
	$K^{(2)}$ за трансформатором $\Delta/\Delta-11, BC$ и $CA$		2,65
	$K^{(2)}$	$\frac{VZ_{\phi}^2 + 3Z_{диф}^2 + 3Z_{\phi}Z_{диф} + R_{пер}}{Z_{доп}}$	2,65
	$K^{(2)}, CA$	$\frac{3Z_{\phi} + R_{пер}}{Z_{доп}}$	3
	$K^{(2)}, AB$ и $BC$	$\frac{2Z_{\phi} + R_{пер}}{Z_{доп}}$	2
	$K^{(2)}$ за трансформатором $\Delta/\Delta-11, BC$ и $CA$	$\frac{Z_{\phi} + 1,5Z_{диф} + R_{пер}}{Z_{доп}}$	2,5

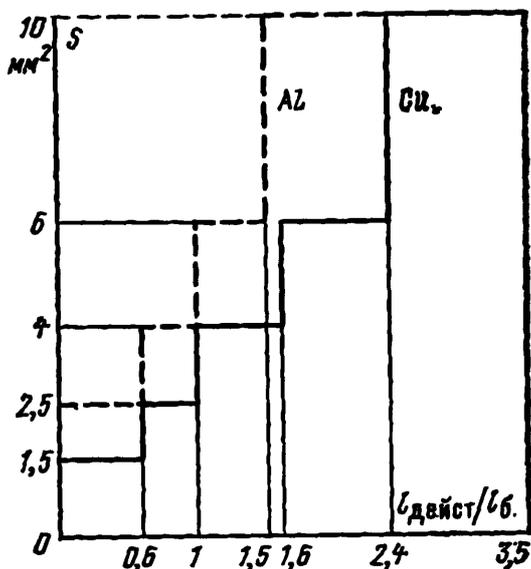
Схема соединений ТТ и нагрузки	Вид к. з.	n	d
	—	$\frac{Z_{\phi} + R_{\text{пер}}}{2Z_{\text{доп}}}$	1
	—	$\frac{2Z_{\phi} + R_{\text{пер}}}{Z_{\text{доп}}}$	4

Примечания: 1. Расчет параметров n и d для дифференциальных схем производится отдельно для каждого плеча по приведенным схемам.

2. K(1), K(2), K(3), K(1.1) — обозначения соответственно однофазного, двухфазного, трехфазного и двухфазного на землю к. з.

3. Расомеждения по определению угла α наложены в ПП.

Рис. 4-1. Диаграмма для выбора допустимого сечения жил контрольного кабеля.



В соответствии с (4-19) и (4-20) построены диаграммы (рис. 4-1), позволяющие по отношению  $I_{дейст}/I_б$  определить расчетное сечение жил кабеля с медной или алюминиевой жилой. Диаграммы имеют вид ступенчатых функций с учетом существующего ряда стандартных сечений жил кабелей и проводов. Диаграммы справедливы и для случая  $m > 1$ , при этом  $I_б$  определяется из (4-17) с учетом реальных значений  $m$  и  $n$ .

Проверка ТТ на предельно допустимую токовую погрешность. Допустимые кратности при повышенных токовых погрешностях определяются умножением предельных кратностей на повышающий коэффициент  $A$ :

$$K_{max} = K_{расч} A. \quad (4-21)$$

Коэффициент

$$A = C_e / C, \quad (4-22)$$

где  $C_e$  — обобщенный параметр, аналогичный (1-23), вычисленный при  $\epsilon = 10\%$ , т. е.

$$C_e = \frac{222 B_s Q \omega_2 n_{ном}}{K_{расч} I_{1н} Z_{2расч}}; \quad (4-23)$$

$C$  — обобщенный параметр, вычисленный по (1-23) при  $K_{max}$ , т. е.

$$C = \frac{222 B_s Q \omega_2 n_{ном}}{K_{max} I_{1н} Z_{2расч}}, \quad (4-24)$$

где  $I_{1ном}$  — номинальный первичный ток ТТ;  $Z_{2расч}$  — расчетное сопротивление вторичной цепи ТТ, состоящее из сопротивления нагрузки  $Z_н$  и сопротивления вторичной обмотки  $Z_{2в}$ .

Учитывая, что  $A$  зависит от максимально допустимой токовой погрешности для релейной аппаратуры, удобно представить его в виде  $A = \Psi(f)$ . Эта зависимость, построенная при  $\epsilon = 0,1 = \text{const}$  и  $\cos \varphi_в = 0,8$  с использова-

нием обобщенных характеристик [14], приведена на рис. 4-2.

Следует отметить, что некоторое влияние на зависимость  $A(f)$  оказывает изменение  $Z_{2в}$  от кратности первичного тока у ряда ТТ (особенно у ТТ с несимметричным расположением первичной обмотки относительно магнитопровода и вторичной обмотки). Однако, как показал анализ, выполненный по данным [14], это влияние выражено слабо и не вносит большой погрешности в расчет.

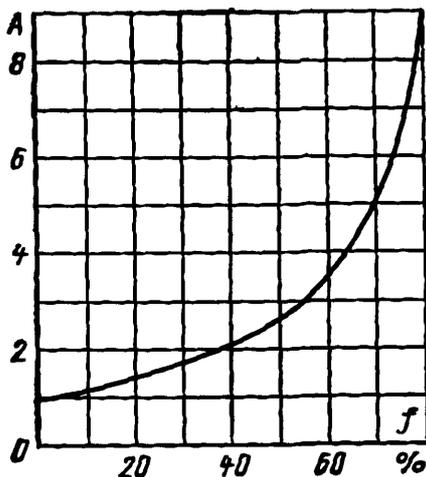


Рис. 4-2. Зависимость коэффициента  $A$  от токовой погрешности ТТ.

При построении  $A = \Psi(f)$  параметр  $A$  принимался для нагрузок, при которых он имеет наименьшее значение, т. е. с некоторым запасом.

Зависимость  $A = \Psi(f)$  справедлива при  $B > 1Т$  в магнитопроводе ТТ. Этому условию удовлетворяют кривые предельных кратностей, не содержащие точки перегиба в пределах чертежа. При наличии такой точки указанное условие удовлетворяется для кратностей, превышающих кратность в точке перегиба.

Проверка на предельно допустимую токовую погрешность фактически заключается в определении откорректированной (с учетом допустимой токовой погрешности) расчетной кратности тока, по которой следует выбирать  $Z_{н.доп}$  из кривых  $K_{10}(Z_n)$ . Эта проверка выполняется в следующей последовательности.

При известном  $f_{доп}$  для конкретных устройств защиты (см. табл. 4-1) из рис. 4-2 определяется  $A$  и вычисляется отношение  $K_{max}/A$ .

Если  $K_{max}/A > K_{расч}$ , то в качестве расчетной кратности принимается

$$K'_{расч} = \frac{K_{max}}{A}. \quad (4-25)$$

Если  $K_{max}/A \leq K_{расч}$ , то в качестве расчетной сохраняется кратность  $K_{расч}$ .

**Методика расчета сечений жил контрольных кабелей.** Исходные данные, необходимые для выполнения расчета: тип защиты; тип ТТ, его коэффициент трансформации и схема соединения обмоток; наибольшие значения токов

в рассматриваемых присоединениях при различных видах к. з. в расчетной точке (для определения  $K_{расч}$ ) и в месте установки защит (для определения  $K_{max}$ ); максимально допустимая для данного типа защиты токовая погрешность ТТ (определяется по табл. 4-1); длина контрольного кабеля от панелей защит до ТТ и материал жил кабеля (медь или алюминий).

Если в расчете требуется учет двухфазного к. з. на землю, дополнительно вычисляется угол  $\alpha$  между токами в поврежденных фазах по (П1-6).

Порядок расчета следующий:

Определяются  $K_{расч}$  и  $K_{max}$  для различных видов к. з. По известной погрешности  $f_{доп}$  из рис. 4-2 определяется параметр  $A$ . Вычисляется  $K'_{расч}$  по (4-25) и в качестве расчетной принимается бóльшая из кратностей  $K_{расч}$  или  $K'_{расч}$ . По кривым предельных кратностей для заданных ТТ (см. П2) и выбранной расчетной кратности определяется допустимое сопротивление нагрузки  $Z_{н.доп}$ . В соответствии с выражениями табл. 4-3 для заданной схемы соединения ТТ рассчитываются коэффициенты  $n$  и  $d$ . По значениям  $n$  и  $d$  из (4-17) определяются отношения  $l_6/Z_{доп}$ . Из соотношения  $l_6/Z_{доп}$  при известном  $Z_{доп}$  определяется  $l_6$ . Определяется отношение  $l_{дейст}/l_6$  и по рис. 4-1 — расчетное (из стандартного ряда) сечение жил контрольного кабеля с алюминиевой или медной жилой.

В условиях эксплуатации возникает необходимость оценить наибольшие погрешности ТТ, например при увеличении токов к. з., замене контрольного кабеля, изменения коэффициента трансформации ТТ и т. п. При этом параметры ТТ, нагрузка, сечение жил контрольного кабеля и максимальная кратность тока к. з. известны и являются исходными данными для расчета.

Расчет выполняется в следующей последовательности. По кривой предельных кратностей для известной нагрузки на ТТ с учетом сопротивления контрольного кабеля определяется  $K_{расч}$ , затем определяется  $A = K_{max}/K_{расч}$  и из рис. 4-2 — токовая погрешность ТТ.

**Расчет напряжений на вторичных обмотках ТТ.** Амплитуда напряжения на вторичной обмотке ТТ при нагрузке, мало зависящей от значения тока, определяется с учетом апериодической составляющей тока к. з. по выражению

$$U_{2max} = K_y K_{max} \sqrt{2} I_{2ном} Z_{н.расч}, \quad (4-26)$$

где  $K_y$  — ударный коэффициент тока к. з., определяемый в том же режиме, что и кратность  $K_{max}$  по рис. 4-3 ( $\cos \varphi_n = 0,8$ ) в зависимости от постоянной времени первичной сети  $T_1$ ;  $Z_{н.расч}$  — фактическая вторичная нагрузка на ТТ, Ом, вычисленная по выражению

$$Z_{н.расч} = nZ_{н.доп} + d \frac{\rho l_{дейст}}{S'_{расч}} \quad (4-27)$$

Полученное по (4-26) напряжение  $U_{2max}$  сравнивается с допустимым. Действующее напряжение  $U_{2доп}$  по [44] принимается равным 1000 В. Должно соблюдаться условие

$$U_{2max} \leq \sqrt{2} U_{2доп} = 1410 \text{ В.} \quad (4-28)$$

Напряжение на зажимах вторичной обмотки ТТ при максимальной кратности тока к. з. в ряде случаев превышает 1000 В. Это имеет место в основном, во вторичных цепях ТТ с  $I_{2ном} = 1$  А. Характерно, что сопротивление контрольного кабеля в этих случаях обычно не превышает 10—15% общего сопротивления нагрузки, поэтому увеличение сечения жил не может существенно влиять на уменьшение напряжения.

С другой стороны, расчет по (4-26) создает весьма существенный запас, поскольку он выполняется при максимально возможном значении аperiodической составляющей тока к. з., не учитывает насыщение магнитопровода ТТ в этих условиях и характерное для тяжелых случаев значение  $\cos \varphi < 0,8$ . Поэтому считается допустимым неучет аperiodического процесса при расчете напряжений на зажимах вторичной обмотки ТТ, т. е. принятие  $K_y = 1$  в (4-26).

**Примеры расчета сечений жил контрольных кабелей в токовых цепях релейной защиты. Пример 4-1.** Выбрать сечение жил контрольных кабелей в токовых цепях максимальной токовой защиты понижающего трансформатора 110/10 кВ мощностью 63 000 кВ·А. Токовые цепи защиты подключены к ТТ типа ТВТ-110,  $n_{ном} = 600/5$ . Вторичные обмотки ТТ соединены в звезду. Ток срабатывания защиты  $I_{с.з} = 480$  А. Максимальный ток трехфазного к. з. на стороне 110 кВ  $I_{max}^{(3)} = 25000$  А;  $T_1 = 0,05$  с;  $\cos \varphi_n = 0,8$ ;  $f_{доп} = 50\%$  (см. табл. 4-1). Длина контрольных кабелей от ТТ до места установки защит  $l_{дейст} = 90$  м (жилы алюминиевые). Сопротивление наиболее нагруженной фазы вторичной обмотки ТТ  $Z_{\phi} = 0,8$  Ом.

Решение. Определяются расчетная и максимальная кратности токов к. з. соответственно по (4-1) и (4-2):

$$K_{\text{расч}} = \frac{1,1 \cdot 480}{600} = 0,88; K_{\text{max}} = \frac{25\,000}{600} = 41,6.$$

Для предельно допустимой погрешности  $f=50\%$  по рис. 4-2 находится  $A=2,6$ . Определяется новое значение расчетной кратности  $K'_{\text{расч}}$  с учетом коэффициента  $A$  по (4-25):

$$K'_{\text{расч}} = \frac{41,6}{2,6} = 16.$$

Так как  $K'_{\text{расч}} > K_{\text{расч}}$  ( $16 > 0,88$ ), то за расчетную принимается  $K'_{\text{расч}}$ . Из кривых предельных кратностей ТТ ТВТ-110, 600/5 (рис. П2-45, кривая 6) для  $K'_{\text{расч}}=16$  находится  $Z_{\text{н.доп}}=4,5$  Ом. Из табл. 4-3 для схемы 1 определяются

$$n = \frac{0,8 + 0,05}{4,5} = 0,189; d = 1.$$

По  $n$  и  $d$  определяется из (4-17) отношение

$$\frac{l_6}{Z_{\text{н.доп}}} = 143 \frac{1 - 0,189}{1} = 116.$$

Базисная длина контрольного кабеля, м, находится умножением  $l_6/Z_{\text{н.доп}}$  на  $Z_{\text{н.доп}}$ , т. е.  $l_6=116 \cdot 4,5=522$  м. Определяется отношение

$$\frac{l_{\text{дейст}}}{l_6} = \frac{90}{522} = 0,172;$$

по его значению — сечение алюминиевой жилы контрольного кабеля  $S=2,5$  мм<sup>2</sup> (см. рис. 4-1).

С учетом выбранного сечения кабеля по (4-27)

$$Z_{\text{н.расч}} = 0,189 \cdot 4,5 + 1 \frac{0,028 \cdot 90}{2,5} = 1,85 \text{ Ом.}$$

Из рис. 4-3 при  $\cos \varphi_{\text{н}}=0,8$  и  $T_1=0,05$  с определяется  $K_{\text{у}}=1,64$ . По (4-26) вычисляется амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке ТТ:

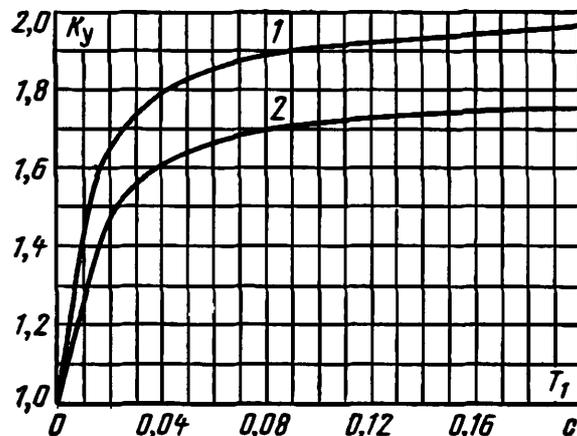
$$U_{2\text{max}} = 1,64 \cdot 41,6 \cdot 1,41 \cdot 1,85 = 890 \text{ В.}$$

Условие (4-28) выполняется.

Пример 4-2. Определить сечение жил контрольных кабелей в токовых цепях защит (основных и резервных) линий 110 кВ. На линии установлены: дифференциально-фазная

Рис. 4-3. Зависимости ударного коэффициента тока к. з. от постоянной времени первичной сети.

1 —  $\cos \varphi_{2\text{н}}=1,0$ ; 2 —  $\cos \varphi_{2\text{н}}=0,8$ .



высокочастотная защита типа ДФЗ-201; дистанционная защита и направленная токовая защита от к. з. на землю (панель защиты ЭПЗ-1636-73/2). Токовые цепи защит подключены ко вторичным обмоткам ТТ типа ТВ-110-50;  $n_{ном} = 400/5$ . Панель ЭПЗ-1636-73/2 и ДФЗ-201 включены на разные обмотки ТТ. Вторичные обмотки ТТ соединены в звезду (схема 1 в табл. 4-3).

Расчетные и максимальные токи к. з.  $I_{расч}^{(3)} = 3100$  А;  $I_{max}^{(3)} = 8800$  А;  $I_{расч}^{(1)} = 3200$  А;  $I_{max}^{(1)} = 9000$  А;  $I_{расч}^{(1,1)} = 3000$  А;  $I_{max}^{(1,1)} = 8500$  А.

Предельно допустимые токовые погрешности: для дистанционной защиты  $f_{доп} = 50\%$ ; для защиты от замыканий на землю  $f_{доп} = 20\%$ ; для ДФЗ-201  $f_{доп}$  определяется по (3-15) с учетом табл. 4-2 при  $k=6$  ( $f_{доп} = 46\%$ ).

Сопротивление наиболее нагруженной фазы панели ЭПЗ-1636-73/2  $Z_{\phi} = 1,1$  Ом; сопротивление нагрузки в нулевом проводе  $Z_0 = 1,11$  Ом; сопротивление наиболее нагруженной фазы защиты ДФЗ-201  $Z_{\phi} = 1,0$  Ом;  $Z_0 = 0,114$  Ом. Нагрузка на ТТ имеет  $\cos \phi_{в} \approx 0,8$ . Постоянная времени первичной сети в режиме определения  $I_{max}$  составляет 0,02 с ( $T_1 = 0,02$  с). Действительная длина контрольных кабелей от ТТ до панелей защит  $l_{дейст} = 130$  м. Контрольный кабель с медными жилами. Соотношения сопротивлений линий и системы в расчетной точке к. з. (обозначения см. П1):

$$\frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}} = 0,26; \quad \frac{X_{1л}}{X_{1\phi}} = 0,11; \quad \frac{X_{0с}}{X_{1с}} = 0,2; \quad \frac{X_{0л}}{X_{1с}} = 0,39.$$

Решение. Определяются расчетные и максимальные кратности токов к. з. соответственно по (4-4) и (4-2):  
при  $K^{(3)}$

$$K_{расч} = \frac{3100}{400} = 7,86; \quad K_{max} = \frac{8800}{400} = 22;$$

при  $K^{(1)}$

$$K_{расч} = \frac{3200}{400} = 8,0; \quad K_{max} = \frac{9000}{400} = 22,5;$$

при  $K^{(1,1)}$

$$K_{расч} = \frac{3000}{400} = 7,5; \quad K_{max} = \frac{8500}{400} = 21,3.$$

Для предельно допустимых погрешностей из рис. 4-1 определяется коэффициент  $A$ . Для  $f_{доп} = 50\%$   $A = 2,6$ ; для  $f_{доп} = 20\%$   $A = 1,5$ ; для  $f_{доп} = 46\%$   $A = 2,4$ .

Определяются  $K'_{расч}$  с учетом допустимых погрешностей по (4-25). Для ДФЗ-201 при  $K^{(3)}$   $K'_{расч} = 22/2,4 = 9,2$ ; при  $K^{(1)}$   $K'_{расч} = 22,5/2,4 = 9,4$ ; при  $K^{(1,1)}$   $K'_{расч} = 21,3/2,4 = 8,9$ .

Для панели ЭПЗ-1636-73/2 при  $K^{(3)}$   $K'_{расч} = 22/2,6 = 8,45$ ; при  $K^{(1)}$   $K'_{расч} = 22,5/1,5 = 15$ ; при  $K^{(1,1)}$   $K'_{расч} = 21,3/1,5 = 14,2$ . Во всех случаях  $K'_{расч} > K_{расч}$ , поэтому в дальнейших расчетах используется  $K'_{расч}$ .

Из кривой по рис. П2-47 определяются значения  $Z_{н.доп}$ . Для ДФЗ-201 при  $K'_{расч}=9,2$   $Z_{н.доп}=4,8$  Ом; при  $K'_{расч}=9,4$   $Z_{н.доп}=4,7$  Ом; при  $K'_{расч}=8,9$   $Z_{н.доп}=5,1$  Ом. Для ЭПЗ-1636-73/2 при  $K'_{расч}=8,45$   $Z_{н.доп}=5,4$  Ом; при  $K'_{расч}=15$   $Z_{н.доп}=2,8$  Ом; при  $K'_{расч}=14,2$   $Z_{н.доп}=3$  Ом.

Определяются коэффициенты  $n$  и  $d$  по выражениям, приведенным в табл. 4-3.

При двухфазных к. з. на землю предварительно требуется вычислить угол  $\alpha$  между токами в поврежденных фазах по (П1-6) с учетом (П1-3):

$$K = 0,26 \frac{0,11 + 1}{0,39 + 0,2} = 0,49;$$

$$\alpha = 2 \arctg \frac{\sqrt{3}(0,5 + 0,26)}{0,5 + 0,49} = 106^\circ.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 4-4.

Таблица 4-4

Павель защиты	Вид к. з.	$n$	$d$	$\frac{I_0}{Z_{н.доп}}$	$I_0 \cdot m$	$\frac{I_{дейст}}{I_0}$	$S, \text{мм}^2$	$U_{з \max}$ В
ДФЗ-201	$K^{(2)}$	0,22	1	112	540	0,52	1,5	586
	$K^{(1)}$	0,25	2	53,5	250			955
	$K^{(1,1)}$	0,224	1,97	56,4	287			920
ЭПЗ-1636-73/2	$K^{(2)}$	0,213	1	30,4	165	3,43	10	374
	$K^{(1)}$	0,81	2	13,6	38			635
	$K^{(1,1)}$	0,744	1,97	18,6	56			592

Во всех случаях напряжение на вторичных обмотках ТТ не превышает допустимого по (4-28). В табл. 4-4  $I_{дейст}/I_0$  определяется для меньшего из значений  $I_0$ .

#### 4-4. ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕДЕЛЬНЫХ КРАТНОСТЕЙ ВСТРОЕННЫХ ТТ ПРИ МАЛЫХ КРАТНОСТЯХ ТОКА

При малых кратностях тока к. з. характеристики часто имеют точку перегиба (рис. 4-4). Участки кривой до и после точки перегиба, условно названные соответственно прямой и обратной ветвями, характеризуются следующей особенностью. На прямой ветви имеет место соотношение  $dK/dZ < 0$ , т. е. уменьшение кратности тока приводит к увеличению допустимой нагрузки на обмотку ТТ. На обратной ветви уменьшение кратности тока приводит к уменьшению допустимой нагрузки, т. е.  $dK/dZ > 0$ .

Существование обратной ветви объясняется особенностями кривых намагничивания, которые при малых  $I_0$  существенно нелинейны. Это приводит к уменьшению

магнитной проницаемости, а следовательно, и сопротивления ветви намагничивания ТТ по сравнению с режимом работы на линейном участке характеристики намагничивания. Поэтому для сохранения требуемого по условию  $\varepsilon \leq 10\%$  соотношения  $I_0 = 0,1I'_1$  при уменьшении тока (начиная с некоторого значения, соответствующего переходу на нелинейную часть характеристики намагничивания) необходимо снижать нагрузку.

Обратная ветвь характеристики  $K_{10} = f(Z_H)$  при кратностях тока  $K_{10} = 1+5$  имеется у встроенных ТТ с отно-

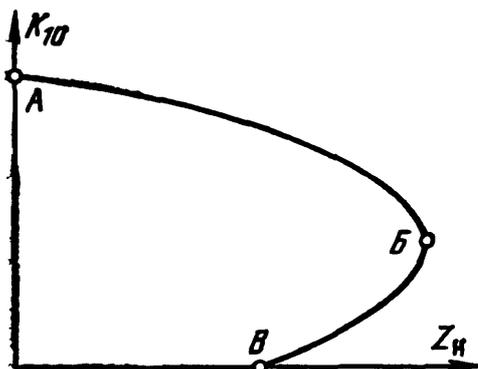


Рис. 4-4. Кривая предельных кратностей ТТ.  
 АВ — прямая ветвь; ВВ — обратная ветвь.

сительно небольшими коэффициентами трансформации ( $n_{ном} < 40$ ). У этих ТТ отношение  $l_{ср}/\omega_2$  ( $l_{ср}$  — средняя длина магнитного пути,  $\omega_2$  — число витков вторичной обмотки) относительно велико и для получения малых  $I_0$  напряженность поля должна быть небольшой ( $I_0 = Hl_{ср}/\omega_2$ ). При этих значениях характеристика  $B = f(H)$  нелинейна. Для встроенных ТТ с большими коэффициентами трансформации, а также многовитковых опор-

ных ТТ, у которых  $\omega_2$  существенно больше, чем у встроенных ТТ с тем же  $n_{ном}$ , а  $l_{ср}$  меньше, точка перегиба характеристики смещается в область малых кратностей тока ( $K_{10} < 1$ ) и не имеет существенного значения.

Наличие обратной ветви на кривой предельной кратности приводит к тому, что при малых кратностях тока к. з. и реальных нагрузках на ТТ часто трудно обеспечить  $\varepsilon \leq 10\%$ . В частности, это имеет место для максимальных токовых защит трансформатора, у которых в соответствии с расчетными условиями (§ 4-2) токовая погрешность ТТ не должна превышать 10% в условиях срабатывания реле. Ток срабатывания защиты трансформатора обычно близок к номинальному току ТТ и допустимая нагрузка на обмотки ТТ, определенная из кривых для этого тока, мала.

В тех случаях, когда рабочая точка при расчетной кратности расположена на обратной ветви кривой, а нагрузка, определенная из этой кривой, слишком мала, допустимо иметь  $\varepsilon > 10\%$  в условиях срабатывания реле.

Так как ТТ работает при небольших индукциях (без насыщения магнитопровода), то отказов в срабатывании реле из-за вибрации контактов не будет. Критерием допустимости подобных режимов должен быть приемлемый (по ПУЭ) коэффициент чувствительности защиты, который следует определять с учетом увеличенной токовой погрешности ТТ. Она может быть рассчитана по МЭС (гл. 1).

Порядок расчета. По (4-27) определяется расчетная нагрузка на обмотки ТТ. Вторичная э. д. с. на обмотке ТТ при первичном токе срабатывания защиты определяется по выражению

$$E_2 = 0,9 Z_{н.расч} \frac{I_{1с.з}}{n_{ном}} \approx U_2, \quad (4-29)$$

где 0,9 — коэффициент, учитывающий (в первом приближении) уменьшение вторичного тока из-за погрешности ТТ. Индукция в магнитопроводе ТТ рассчитывается по (1-15), по кривой  $B = f(H)$  определяется  $H$ , рассчитывается  $I_0 = \frac{HI_{ср}}{\omega_2}$ . Вычисляется полная погрешность ТТ в предположении, что углы сопротивлений нагрузки и ветви намагничивания ТТ равны:

$$\varepsilon = \frac{I_0}{I_1} 100. \quad (4-30)$$

Если  $\varepsilon > 20\%$ , целесообразно уточнить коэффициент в (4-29) (вместо 0,9 подставить меньший коэффициент) и вновь рассчитать все параметры, начиная с э. д. с.  $E_2$ . Расчет  $\varepsilon$  заканчивается, если  $(1 - \varepsilon/100)$  отличается от принятого в (4-29) коэффициента не более чем на 10%.

Определяется коэффициент чувствительности защиты

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к min}}^{(2)}}{I_{1с.з} + I_0 n_{ном}}. \quad (4-31)$$

Работа с увеличенной погрешностью допустима, если  $K_{\text{ч}} \geq 1,5$ .

**Примечание.** Если  $K_{\text{ч}} < 1,5$  на 10—15%, можно выполнить уточненный расчет погрешностей по МЭС с учетом реального угла нагрузки и угла потерь (см. гл. 1).

Для продольных дифференциальных токовых защит трансформаторов в соответствии с (4-5) полная погрешность ТТ не должна превышать 10% при наибольшем токе внешнего к. з. Поэтому току должна выбираться допустимая нагрузка на обмотки ТТ.

Как известно, сопротивления большинства типов понижающих трансформаторов, оборудованных РПН, существенно изменяются при крайних положениях регулятора РПН. Поэтому наибольший (расчетный) ток к. з. может быть значительно больше наименьшего тока к. з. При меньшем токе, если расчетная точка располагается на обратной ветви характеристики предельной кратности, пол-

ная погрешность будет больше 10% ( $\epsilon > 10$ ). Аналогичное условие может иметь место и в расчетном режиме, если к. з. возникло через переходное сопротивление.

Однако оба этих режима при  $\epsilon > 10\%$  могут считаться допустимыми, так как абсолютное значение тока небаланса при внешних к. з., несмотря на увеличенную  $\epsilon$ , будет меньше, чем в расчетном режиме, что обуславливается уменьшением индукции в магнитопроводах ТТ по сравнению с расчетным режимом. Увеличенную полную погрешность следует учитывать только при расчете чувствительности защиты аналогично тому, как это выполнено выше для максимальной токовой защиты.

#### 4-5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПОЛНОЙ И ТОКОВОЙ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ЗАЩИТ НА СУММУ ТОКОВ ДВУХ ТТ

Исходная упрощенная схема первичных соединений приведена на рис. 4-5,а. Анализ выполняется при допущении, что токи  $I_{11}$  и  $I_{12}$  при к. з. в точке К совпадают по фазе и  $n_{\text{ном1ТТ}} = n_{\text{ном2ТТ}}$ .

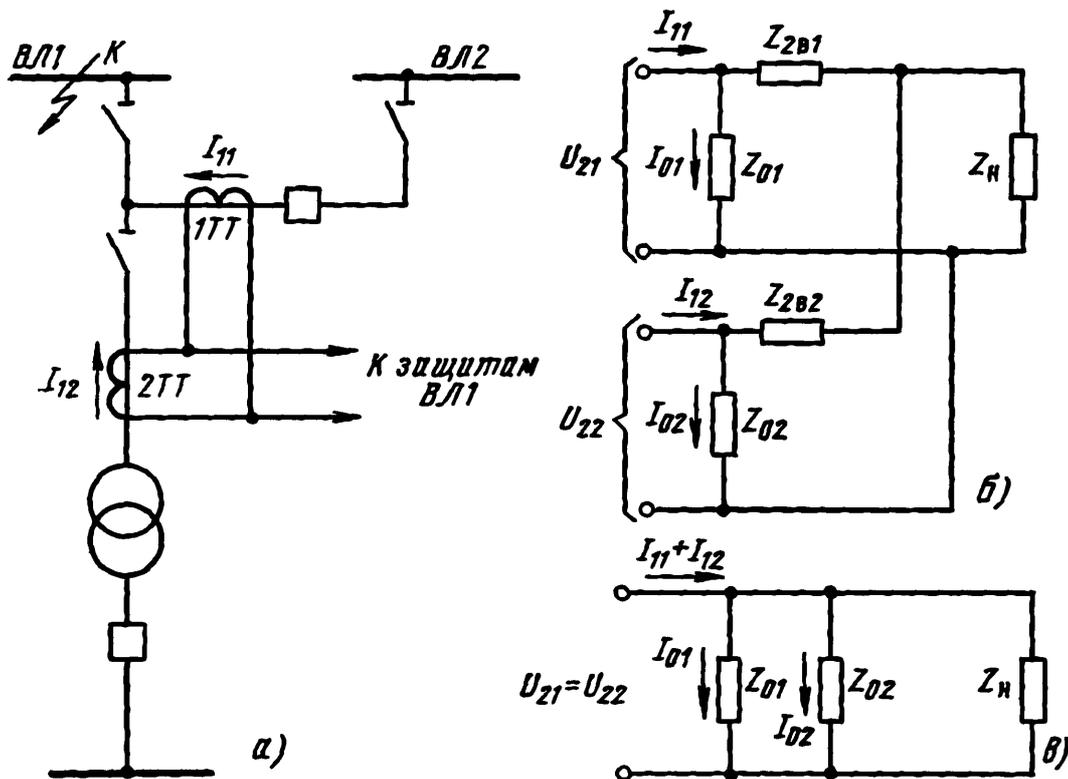


Рис. 4-5. Схема включения защит на сумму токов двух ТТ. а — схема первичных соединений и включения защиты на сумму токов; б — расчетная схема замещения; в — упрощенная схема замещения.

По аналогии с одиночно работающим ТТ необходимо определить суммарную полную погрешность

$$\epsilon_{\Sigma} = \frac{I_{0\Sigma} n_{\text{ном}}}{I_{11} + I_{12}} 100, \quad (4-32)$$

здесь

$$\begin{aligned} I_{11} &= K_{1\text{расч}} I_{1\text{ном}}; \\ I_{12} &= K_{2\text{расч}} I_{1\text{ном}}; \\ I_{0\Sigma} &= I_{01} + I_{02}, \end{aligned} \quad (4-33)$$

где  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  — соответственно токи намагничивания 1ТТ и 2ТТ.

Расчетная схема замещения ТТ приведена на рис. 4-5,б.

Расчет погрешности выполняется следующим образом.

Определяется напряжение на вторичной обмотке каждого ТТ при к. з. в расчетной точке

$$U_{11} = \frac{I_{11}}{n_{\text{ном}}} Z_{2в1} + \frac{I_{11} + I_{12}}{n_{\text{ном}}} Z_{\text{н}} = \frac{1}{n_{\text{ном}}} [I_{11} (Z_{\text{н}} + Z_{2в1}) + I_{12} Z_{\text{н}}]; \quad (4-34)$$

$$U_{22} = \frac{1}{n_{\text{ном}}} [I_{12} (Z_{\text{н}} + Z_{2в2}) + I_{11} Z_{\text{н}}], \quad (4-35)$$

где  $Z_{2в1}$ ,  $Z_{2в2}$  — соответственно сопротивления вторичных обмоток 1ТТ и 2ТТ;  $Z_{\text{н}}$  — сопротивление нагрузки.

Определяется индукция в магнитопроводе каждого ТТ при 50 Гц по выражению

$$B_{\text{max}} = \frac{U_2}{222Q\omega_2}. \quad (4-36)$$

По типовой кривой  $B(H)$  для данной марки стали определяется значение напряженности магнитного поля для каждого ТТ.

Ток намагничивания каждого ТТ определяется по выражению

$$I_0 = \frac{Hl}{\omega_2}; \quad (4-37)$$

где  $l$  — средняя длина магнитной силовой линии магнитопровода ТТ, м.

Определяются  $I_{0\Sigma}$  по (4-33) и  $\varepsilon_{\Sigma}$  по (4-32). Если  $\varepsilon_{\Sigma} \leq \leq 10\%$ , точность работы релейных устройств может считаться обеспеченной. Когда

$$\left. \begin{aligned} \frac{I_{11} Z_{2в1} 100}{(I_{11} + I_{12}) Z_{\text{н}}} &\leq 10; \\ \frac{I_{12} Z_{2в2} 100}{(I_{11} + I_{12}) Z_{\text{н}}} &\leq 10, \end{aligned} \right\} \quad (4-38)$$

схема замещения ТТ может быть упрощена (рис. 4-5, в); при этом выражения (4-34) и (4-35) также упрощаются:

$$U_{21} \approx U_{22} = \frac{1}{n_{\text{ном}}} (I_{11} + I_{12}) Z_{\text{н}}. \quad (4-39)$$

Пример 4-4. Рассчитать  $\epsilon_2$  для схемы на рис. 4-5, а при следующих данных: 1ТТ типа ТФНД-220,  $n_{\text{н}}=600/5$ , класс Р,  $Q=21,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $\omega_2=240$ ,  $l=1,06 \text{ м}$ ,  $Z_{2в1}=0,55 \text{ Ом}$ ; 2ТТ типа ТВТ-220, 600/5,  $Q=94,5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ,  $\omega_2=119$  витков,  $l=2,5 \text{ м}$ ,  $Z_{2в2}=0,915 \text{ Ом}$ .

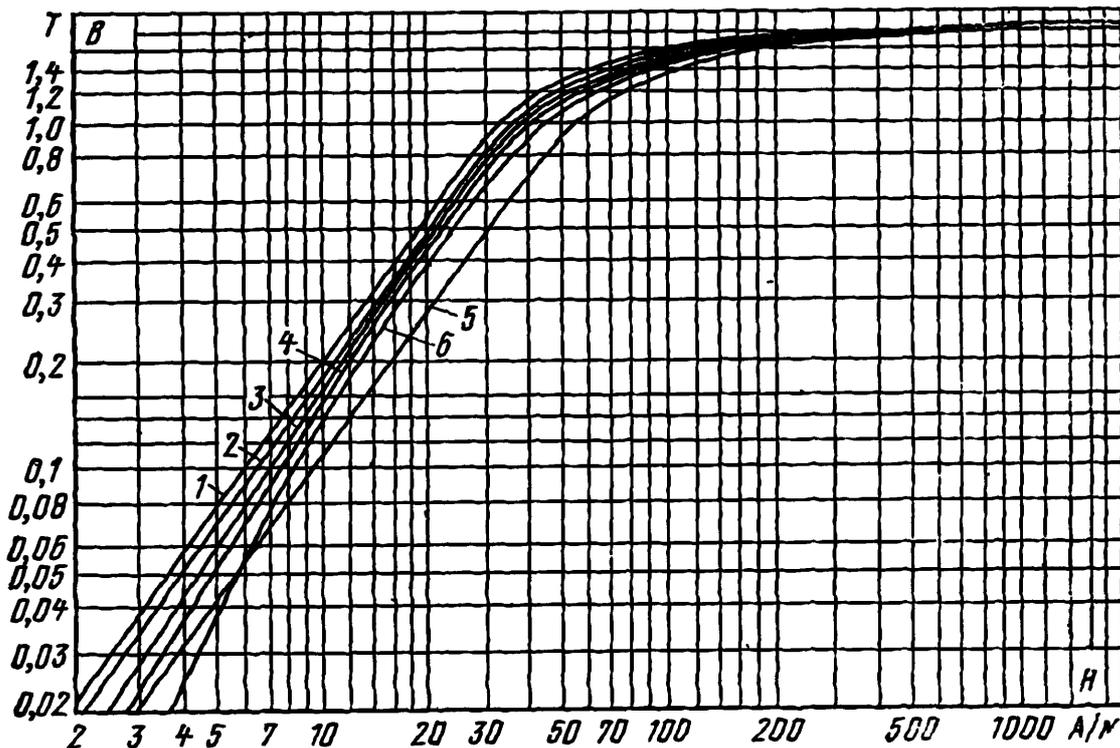


Рис. 4-6. Кривые намагничивания электротехнических сталей, применяемых для изготовления магнитопроводов ТТ.

1 — сталь бельгийская марки М6, отожженная,  $\delta=0,35 \text{ мм}$ ; 2 — то же неотожженная; 3 — сталь французская марки М6Х, отожженная,  $\delta=0,35 \text{ мм}$ ; 4 — то же неотожженная; 5 — сталь американская марки Unisil № 3, отожженная,  $\delta=0,34 \text{ мм}$ ; 6 — сталь марки Э-310,  $\delta=0,35 \text{ мм}$ .

Расчетная кратность тока при трехфазном к. з.  $K_{\text{расч}}=10$ ;  $K_{2\text{расч}}=3$ ;  $Z_{\text{н}}=1,5 \text{ Ом}$ . Технические данные обоих ТТ взяты из ПЗ. Решение. Проверяются условия (4-38) для 1ТТ и 2ТТ:

$$\frac{10 \cdot 600 \cdot 0,55 \cdot 100}{13 \cdot 600 \cdot 1,5} = 28,2 > 10.$$

Условия (4-38) не выполняются, поэтому расчет ведется по (4-34) и (4-35):

$$U_{21} = \frac{1}{120} [10 \cdot 600 (1,5 + 0,55) + 3 \cdot 600 \cdot 1,5] = 125 \text{ В};$$

$$U_{22} = \frac{1}{120} [3 \cdot 600 (1,5 + 0,915) + 10 \cdot 600 \cdot 1,5] = 113 \text{ В.}$$

По (4-36) определяется индукция в магнитопроводе каждого ТТ:

$$B_{max1ТТ} = \frac{125}{222 \cdot 21,5 \cdot 10^{-4} \cdot 240} = 1,09 \text{ Т;}$$

$$B_{max2ТТ} = \frac{113}{222 \cdot 94,5 \cdot 10^{-4} \cdot 119} = 0,46 \text{ Т.}$$

По кривой 1 на рис. 4-6 определяются  $H_{1ТТ} = 37 \text{ А/м}$ ;  
 $H_{2ТТ} = 18 \text{ А/м}$ .

По (4-37) определяются токи намагничивания ТТ:

$$I_{01} = \frac{37 \cdot 1,03}{240} = 0,163 \text{ А;}$$

$$I_{02} = \frac{18 \cdot 2,5}{119} = 0,378 \text{ А.}$$

По (4-33) определяется суммарный ток намагничивания:

$$I_{0\Sigma} = 0,163 + 0,378 = 0,541 \text{ А.}$$

Суммарная полная погрешность вычисляется по (4-32):

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{0,541 \cdot 120}{13 \cdot 600} 100 = 0,834 \text{ \%}.$$

*Вывод. Точность работы измерительных органов обеспечена.*

*Примечание. Следует отметить, что погрешность 2ТТ (с меньшим расчетным током к. з.)*

$$\varepsilon_{2ТТ} = \frac{0,378 \cdot 120}{3 \cdot 600} 100 = 2,52, \text{ \%},$$

т. е. превышает  $\varepsilon_{\Sigma}$ , несмотря на то что 2ТТ более мощный.

#### 4-6. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ПРЕДЕЛЬНЫХ КРАТНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Согласно [3] в информационных материалах на ТТ должны приводиться кривые предельных кратностей, построенные по условию  $\varepsilon \leq 10\%$ . В связи с тем что при испытаниях ТТ время измерений составляет 3—4 с, заводские кривые фактически ограничиваются кратностью тока, допустимой по условию трех- четырехсекундной термической стойкости. Кроме того, для ряда ТТ приводится вместо кривой одна точка — предельная кратность при номинальной нагрузке  $K_{10н}$ .

Для проектирования защит энергообъектов и выбора оптимальных сечений жил контрольных кабелей в цепях ТТ необходимо иметь кривые в широком диапазоне изменения нагрузок. Располагая основными техническими данными ТТ, можно построить такие кривые расчетным путем.

Ниже дается методика построения кривых предельных кратностей ТТ. В расчетах используется типовая кривая намагничивания стали магнитопровода ТТ (рис. 4-7).

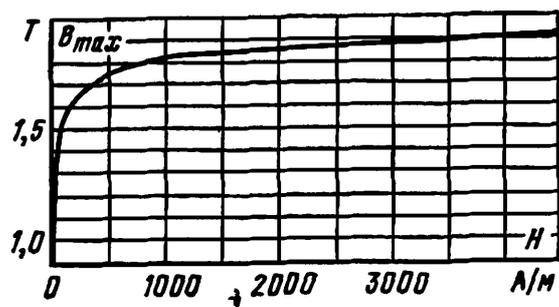


Рис. 4-7. Типовая кривая намагничивания, рекомендуемая объединением «Электроаппарат» для расчета параметров ТТ.

Значение искомой предельной кратности можно найти из выражения

$$K_{10} = \frac{222 B_{\text{пр}} Q \omega_2}{I_{\text{ном}} Z_2}, \quad (4-40)$$

где  $B_{\text{пр}}$  — предельная индукция в магнитопроводе ТТ, при которой  $\epsilon = 10\% = \text{const}$ ;  $Q$  — сечение стали магнитопровода, ТТ, м<sup>2</sup>;  $\omega_2$  — число витков вторичной обмотки ТТ;  $I_{\text{ном}}$  — номинальный вторичный ток, А;  $Z_2 = Z_{\text{н}} + Z_{2\text{в}}$  — полное сопротивление цепи вторичной обмотки ТТ, Ом;  $Z_{\text{н}}$  — полное сопротивление внешней вторичной нагрузки, Ом;  $Z_{2\text{в}}$  — полное сопротивление вторичной обмотки ТТ, Ом.

При  $\epsilon = 10\% = \text{const}$  имеем:

$$\frac{I'_1 \omega_2}{l_{\text{ср}}} = 10H, \quad (4-41)$$

где  $I'_1$  — первичный ток ТТ, приведенный ко вторичной обмотке, А;  $l_{\text{ср}}$  — средняя длина магнитного пути в магнитопроводе ТТ, м;  $H$  — напряженность магнитного поля в магнитопроводе ТТ, А/м.

Дальнейший анализ удобно вести в удельных величинах:

а) удельный первичный ток, А/м,

$$I'_{1\text{уд}} = \frac{I'_1 \omega_2}{l_{\text{ср}}}; \quad (4-42)$$

б) удельное напряжение на нагрузке, В/м<sup>2</sup>,

$$U_{2уд} = \frac{U_2}{Q\omega_2}; \quad (4-43)$$

в) удельное сопротивление, Ом/м,

$$Z_{2уд} = Z_2 \frac{l_{ср}}{Q\omega_2^2}; \quad (4-44)$$

г) удельная кратность

$$K_{10уд} = K_{10} \frac{\omega_2}{l_{ср}}. \quad (4-45)$$

Подставляя (4-41) в (4-42), находим:

$$I_{1уд} = 10H. \quad (4-46)$$

Для предельной кратности  $\epsilon = 10\%$  удельное напряжение на нагрузке может быть представлено в виде

$$U_{2уд} = 222B_{пр}. \quad (4-47)$$

Из (4-47) и (4-46) получаем выражение для  $Z_{2уд}$ :

$$Z_{2уд} = 22,2 \frac{B_{пр}}{H}. \quad (4-48)$$

По (4-48) и данным на рис. 4-7 строится зависимость  $B_{пр} = f(Z_{2уд})$  (рис. 4-8, кривая 1). Подставляя (4-40) и (4-44) в (4-45) и учитывая, что  $B_{пр} = f(Z_{2уд})$ , получим обобщенную зависимость предельной кратности, выраженной в удельных величинах:

$$K_{10уд} = \frac{222B_{пр}Z_{2уд}}{I_{2ном}Z_{2уд}}. \quad (4-49)$$

По (4-49) и кривой 1 на рис. 4-8 построены зависимости  $K_{10уд} = f(Z_{2уд})$  при номинальном вторичном токе 5 и 1 А (рис. 4-9).

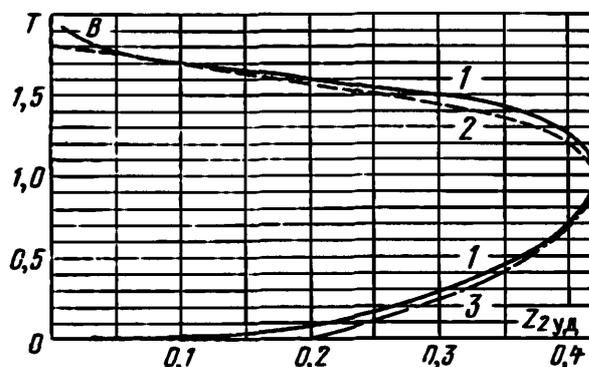


Рис. 4-8. Предельная индукция в магнитопроводе в зависимости от удельного сопротивления вторичной цепи ТТ при  $\epsilon = 10\%$ .

1 — кривая, построенная по характеристике намагничивания для стали Э-310 (рис. 4-6); 2 — кривая, построенная с применением аппроксимации характеристики намагничивания по (4-53) при  $B_{пр} \geq 1$  Т; 3 — то же, что и 2, но при  $B_{пр} \leq 1$  Т.

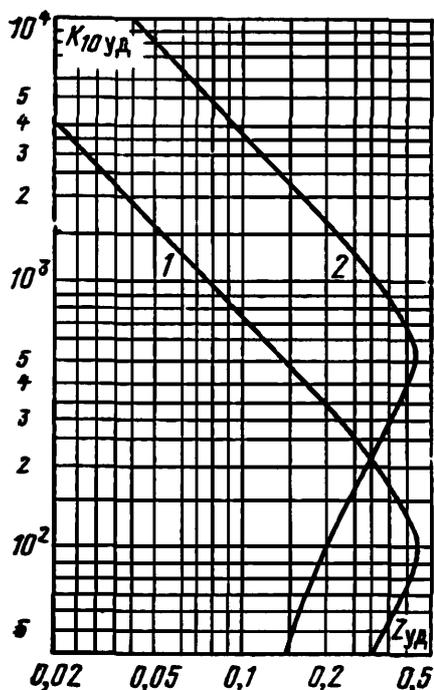


Рис. 4-9. Обобщенные кривые предельных кратностей ТТ.

1 —  $I_{2ном} = 5$  А; 2 —  $I_{2ном} = 1$  А.

Пользуясь кривыми на рис. 4-9, можно для любого ТТ при известных  $I_{2ном}$ ,  $Q$ ,  $\omega_2$ ,  $l_{ср}$  и  $Z_{2в}$  (см. П2), определить  $K_{10}$  во всем диапазоне нагрузок, при которых  $\varepsilon = 10\%$ .

Пример 4-5. Рассчитать значение предельной кратности ТТ типа ТВТ-220;  $n_{ном} = 300/5$ ;  $Q = 94,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $l_{ср} = 2,5$  м;  $\omega_2 = 58$ ;  $R_{2в} = 0,18$  Ом;  $X_{2в} = 0,69$  Ом (см. П2-1) для  $Z_{н} = 4$  Ом.

Решение. Определяется полное сопротивление вторичной цепи ТТ:

$$Z_2 = Z_{н} + \sqrt{R_{2в}^2 + X_{2в}^2} = 4 + \sqrt{0,18^2 + 0,69^2} = 4,72 \text{ Ом.}$$

Из (4-44) определяется удельное сопротивление

$$Z_{2уд} = Z_2 \frac{l_{ср}}{Q\omega_2^2} = 4,72 \frac{2,5}{94,5 \cdot 10^{-4} \cdot 58^2} = 0,37 \text{ Ом/м.}$$

По кривой 1 (рис. 4-9) для  $I_{ном} = 5$  А определяются два значения удельной предельной кратности (для прямой и обратной ветвей)  $K_{уд(1)} = 1700$ ;  $K_{уд(2)} = 600$ . По (4-45) вычисляются предельные кратности

$$K_{10(1)} = 1700 \frac{2,5}{58} = 7,35, \quad K_{10(2)} = 600 \frac{2,5}{58} = 2,6.$$

Значение  $Z_{2в}$  в общем случае зависит от конструкции ТТ, кратности первичного тока и нагрузки. Поэтому в соответствии с Руководящими техническими материалами Минэлектротехпрома по расчету предельных кратностей все ТТ условно разбиваются на три группы.

Первая группа — ТТ, для которых выполняются условия:

а) вторичная обмотка равномерно распределена по кольцевому магнитопроводу;

б) первичная обмотка либо повторяет расположение вторичной, либо представляет собой стержень (шину), проходящий через центр кольца магнитопровода;

в) влияние соседних токопроводов пренебрежимо мало. Значение  $Z_{2в}$  для ТТ первой группы может быть принято равным нулю.

Вторая группа — ТТ с несимметричным расположением обмоток относительно магнитопровода. Для этих ТТ  $Z_{2в} \neq 0$  и зависит от следующих факторов: геометрической формы обмоток, номинальной м. д. с., кратности первичного тока и внешней нагрузки. Значения  $Z_{2в}$  для этой группы ТТ должны указываться в информационных материалах.

Третья группа — ТТ с любым видом исполнения обмоток, предназначенные для работы в контурах с большими токами (ТТ для вводов и токопроводов мощных генераторов). Значения  $Z_{2в}$  для этой группы ТТ не могут быть точно определены.

Если  $X_{2в}$  ( $Z_{2в}$ ) не приводятся в информационных материалах (таких ТТ большинство), они могут быть определены приближенно с использованием данных  $K_{10ном}$  и  $Z_{н.ном}$ , полученных при типовых испытаниях ТТ, следующим образом.

Обычно в условиях типовых испытаний ТТ на номинальную предельную кратность индукция в магнитопроводе составляет около 1,8 Т (1,6—1,8 Т). Поэтому, принимая с некоторым запасом  $B=1,8$  Т и подставляя в (4-40), получаем для номинальной нагрузки

$$Z_{2н} = \frac{400Q\omega_2}{I_{2ном}K_{10ном}}. \quad (4-50)$$

Затем вычисляют  $X_{2в}$  из выражения

$$Z_{2н} = \sqrt{(X_{н.ном} + X_{2в})^2 + (R_{н.ном} + 1,2R_{2в})^2}, \quad (4-51)$$

где  $X_{н.ном}$ ,  $R_{н.ном}$  — соответственно индуктивная и активная составляющие номинальной нагрузки на ТТ;  $X_{2в}$ ,  $R_{2в}$  — составляющие полного сопротивления вторичной обмотки ТТ. Коэффициент 1,2 учитывает увеличение активного сопротивления вторичной обмотки ТТ при ее нагреве до  $+75^\circ\text{C}$ . При типовых испытаниях  $\cos \varphi_2 = 0,8$ . В этом случае

$$R_{н.ном} = Z_{н.ном} \cos \varphi_2 = 0,8Z_{н.ном};$$

$$X_{н.ном} = Z_{н.ном} \sin \varphi_2 = 0,6Z_{н.ном}.$$

После определения  $X_{2в}$  вычисляют  $Z_{2в}$  по выражению

$$Z_{2в} = \sqrt{X_{2в}^2 + (1,2R_{2в})^2}; \quad (4-52)$$

параметр  $Z_{2в}$  используется при расчетах кривых предельных кратностей ТТ.

Значения  $Z_{2в}$ , рассчитанные по (4-52), могут оказаться несколько завышенными, так как в расчетах принималось  $Z_{2в} = \text{const}$ , а в действительности с ростом нагрузки (свыше  $Z_{н.ном}$ ) имеет место уменьшение  $Z_{2в}$  (на

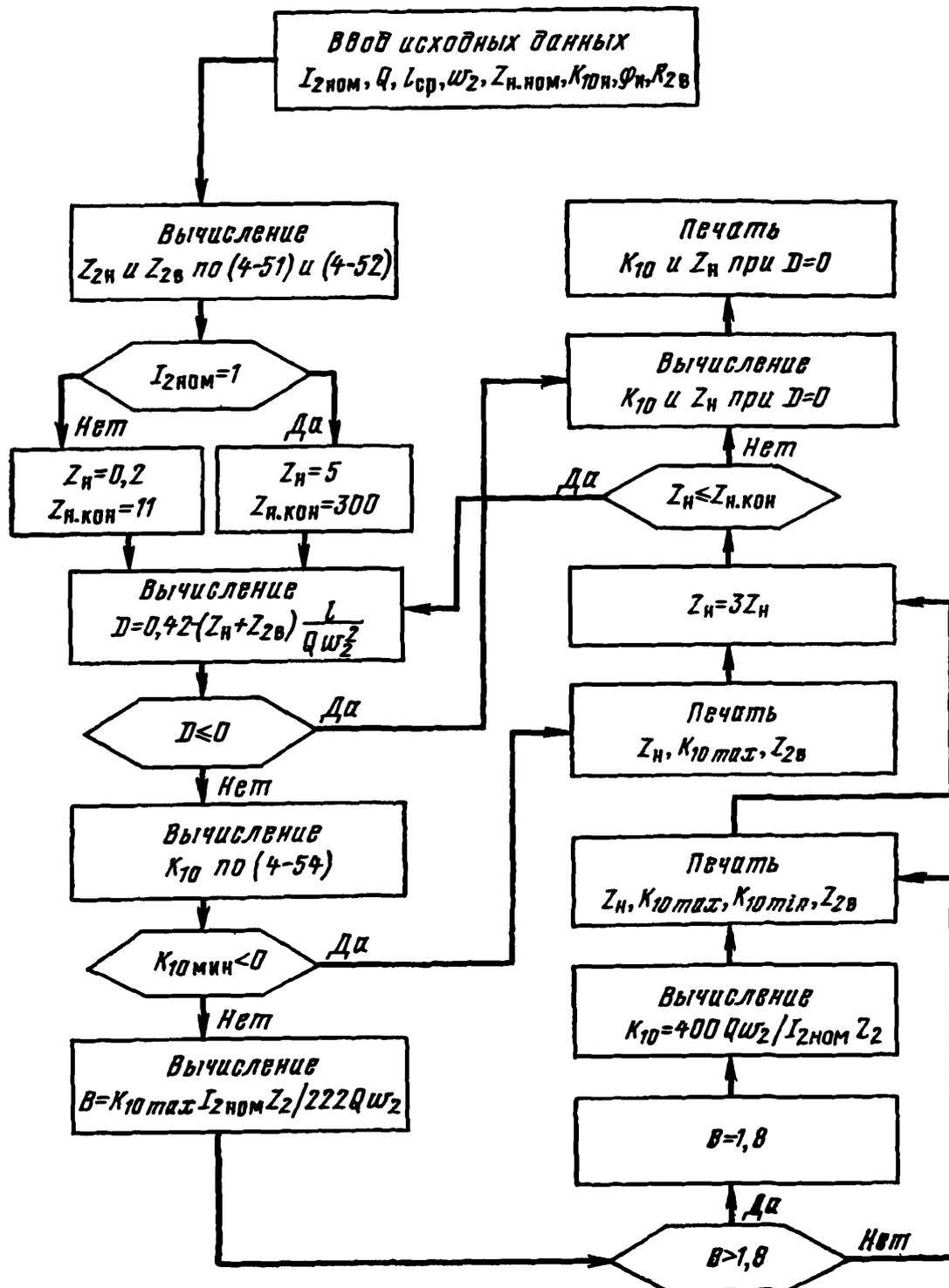


Рис. 4-10. Блок-схема программы расчета кривых предельных кратностей ТТ.

5—10%). Расчет кривых ТТ выполнялся на ЭВМ «Наири-С» по программе, блок-схема которой приведена на рис. 4-10.

При расчетах на ЭВМ зависимость  $B=f(Z_{2уд})$  (рис. 4-8, кривая 1) аппроксимировалась двумя аналитическими выражениями

$$\left. \begin{aligned} 1 + 1,24 \sqrt{0,42 - Z_{2уд}} & \text{ при } B_{пр} \geq 1 \text{ Т;} \\ 1 - 2,2 \sqrt{0,42 - Z_{2уд}} & \text{ при } B_{пр} < 1 \text{ Т.} \end{aligned} \right\} \quad (4-53)$$

В соответствии с (4-53) на рис. 4-8 построены кривая 2 (для  $B_{пр} \geq 1 \text{ Т}$ ) и кривая 3 (для  $B_{пр} < 1 \text{ Т}$ ).

Расчет предельной кратности выполнялся по выражению

$$K_{10} = \frac{222 B_{пр} (Z_{2уд}) Q w_2}{I_{2н} (Z_{н1} + Z_{2в})} \quad (4-54)$$

с учетом ограничения

$$Z_{2уд} \leq 0,42; \quad (4-55)$$

значение  $Z_{2уд} = 0,42$  соответствует предельной нагрузке на ТТ, при которой еще соблюдается условие  $\varepsilon = 10\%$  (рис. 4-9).

По изложенной методике рассчитаны и построены кривые кратностей большинства отечественных ТТ, как выпускаемых в настоящее время, так и снятых с производства, но широко распространенных в эксплуатации на действующих энергообъектах. Эти кривые приведены в П2.

#### 4.7. ПОСТРОЕНИЕ КРИВЫХ ПРЕДЕЛЬНОЙ КРАТНОСТИ ПО ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ТТ

В условиях эксплуатации возникает необходимость в построении кривых ТТ, марка стали магнитопроводов которых не известна. Для этого снимается вольт-амперная характеристика ТТ со стороны его вторичной обмотки в режиме холостого хода. Вольт-амперная характеристика должна быть построена для действующих токов и напряжений при практически синусоидальном напряжении. Кривые строятся для  $\varepsilon = 10\%$  и  $\cos \varphi_2 = 0,8$ . Так как при указанных параметрах угловая погрешность ТТ не превышает  $5^\circ$ , то с достаточной точностью (1-9) можно представить в виде скалярной суммы:

$$I_1 = I_2 + I_0. \quad (4-56)$$

На основании принятого условия  $\varepsilon=10\%$  ток намагничивания ТТ

$$I_0=0,1I_1. \quad (4-57)$$

Сопротивление вторичной нагрузки ТТ, выраженное через напряжение холостого хода, первичный ток с учетом (4-56) и (4-57) и сопротивление вторичной обмотки, может быть представлено в виде

$$Z_{\text{н}} = \frac{U_2}{0,9I'_1} - Z_{2\text{в}}, \quad (4-58)$$

где  $I'_1$  — действующее значение первичного тока, приведенного во вторичной обмотке ТТ. Значение  $Z_{2\text{в}}$  должно быть известно или определено экспериментально.

Предельная кратность определяется по выражению

$$K_{10}=I_1/I_{1\text{ном}}. \quad (4-59)$$

Кривые предельных кратностей строятся в следующей последовательности:

принимается ряд значений  $U_2$ , для каждого значения из ВАХ определяется  $I_0$ . Из (4-57) определяется  $I_1=10I_0$ , по (4-58) определяется  $Z_{\text{н}}$  для всех выбранных точек. По (4-59) при известном номинальном токе ТТ определяются значения  $K_{10}$ .

По результатам расчетов строится зависимость  $K_{10}=f(Z_{\text{н}})$ .

#### 4-8. УЧЕТ НЕЛИНЕЙНОСТИ СОПРОТИВЛЕНИИ ПРИ РАСЧЕТЕ ДОПУСТИМЫХ НАГРУЗОК

Кривые предельных кратностей ТТ строятся для линейной нагрузки с  $\cos \varphi_{\text{н}}=0,8$ , т. е. в предположении, что сопротивление не зависит от тока. В действительности аппаратура, подключаемая к ТТ, как правило, имеет нелинейную ВАХ. Нелинейность в основном определяется наличием ферромагнитных элементов в устройствах релейной защиты (магнитопроводы реле, трансформаторы, сердечники электромагнитов и т. п.).

Наиболее заметно нелинейность ВАХ выражена у реле с магнитопроводом без зазора или с небольшим немагнитным зазором (РП-341, РВМ-12, РВМ-13, РТМ, РТВ и др.). Значительно меньшая нелинейность наблюдается у элементов, имеющих магнитопроводы с большим немагнитным зазором (РТ-40, защита с трансреак-

торами во входных цепях). Для сравнения характеристики реле РП-341 и РТ-40/06 приведены на рис. 4-11.

Как отмечалось в гл. 1, ВАХ нелинейного элемента, построенная для действующих значений тока и напряжения, зависит от формы кривой подводимых величин, так как магнитная индукция в магнитопроводе является нелинейной функцией напряженности поля и ее производной по времени.

Кривые предельных кратностей, по которым проверяется нагрузка ТТ, строятся при практически синусоидальном напряжении, т. е.

в предположении, что вторичная нагрузка линейна и не вносит заметных искажений. Если  $I_1$  синусоидален, то при  $\epsilon \leq \leq 10\%$  независимо от степени нелинейности нагрузки практически синусоидален и вторичный ток ТТ. В этих условиях при нелинейной нагрузке форма кривой вторичного напряжения ТТ  $U_2$  может отличаться от синусоиды и принимать пикообразный вид, причем степень искажения  $U_2$  растет с увеличением степени нелинейности нагрузки.

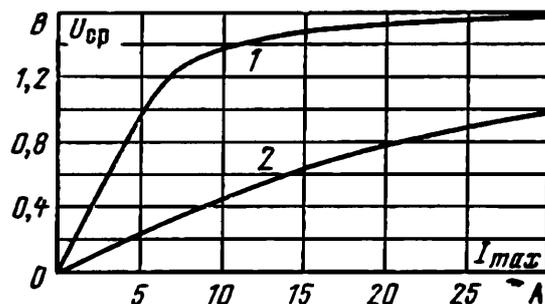


Рис. 4-11. Вольт-амперные характеристики реле РП-341 (1) и РТ-40/06 (2).

Известно, что среднее значение пикообразной кривой с заданным действующим значением ниже, чем у синусоиды с тем же действующим значением. Это означает, что при протекании синусоидального тока через нелинейную индуктивную нагрузку среднее напряжение на ней будет ниже, чем при протекании такого же тока через линейную нагрузку при условии, что действующее напряжение в обоих случаях остается неизменным.

В соответствии с существующей в проектной практике методикой расчетное сопротивление нелинейной нагрузки на ТТ определяют по заданному току из ВАХ, снятой для действующих значений напряжения и тока. Результирующую нагрузку находят как арифметическую сумму линейной и нелинейной составляющих и сравнивают ее с допустимой нагрузкой, определенной по кривым предельных кратностей ТТ. Приведенные рассуждения показывают, что точка на кривой предельных кратностей ТТ, определенная для нелинейной нагрузки

по существующей методике, соответствует меньшему значению индукции в ТТ, найденному для такой же линейной нагрузки.

Таким образом, применяемая расчетная методика учета нелинейной нагрузки несколько завышает расчетное сопротивление нагрузки, т. е. создает определенный запас. Следовательно, появляется возможность увеличения допустимой нагрузки на ТТ при  $\varepsilon=10\%$  путем более точного учета ее нелинейности:

$$Z_{н.нел.доп} + Z_{2в} = \eta (Z_{н.доп} + Z_{2в}), \quad (4-60)$$

где  $Z_{н.нел.доп}$  — допустимое по кривым предельных кратностей значение внешней нелинейной нагрузки на ТТ;  $Z_{н.доп}$  — допустимая внешняя линейная нагрузка на ТТ при  $\varepsilon=10\%$ ;  $\eta$  — коэффициент увеличения допустимого сопротивления нагрузки ТТ, зависящий от степени ее нелинейности ( $\eta \geq 1$ ). Сопротивление  $Z_{2в}$  принимается линейным.

Количественную связь между линейной и нелинейной допустимой нагрузкой на ТТ найдем из следующих соотношений [45]. В общем случае при  $\varepsilon=10\% = \text{const}$  и 50 Гц имеем:

для линейной нагрузки

$$B_{пр} = \frac{K_{10} I_{2ном} (Z_{н.доп} + Z_{2в})}{200 \cdot 1,11 Q \omega_2}; \quad (4-61)$$

для нелинейной нагрузки

$$B_{пр} = \frac{K_{10} I_{2ном} (Z_{н.нел.доп} + Z_{2в})}{200 K_{\phi} Q \omega_2}, \quad (4-62)$$

где 1,11 — коэффициент формы кривой э. д. с. на вторичной обмотке ТТ при линейной нагрузке;  $K_{\phi}$  — то же при нелинейной нагрузке.

Приравнивая правые части (4-61) и (4-62), а также учитывая (4-60), получаем:

$$\eta = 0,9 K_{\phi}. \quad (4-63)$$

Таким образом, задача сводится к экспериментальному определению  $K_{\phi}$  кривой э. д. с. на вторичной обмотке ТТ при нелинейной нагрузке.

#### 4.9. РАСЧЕТЫ НАГРУЗОК НА ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА В СХЕМАХ НА ПЕРЕМЕННОМ ОПЕРАТИВНОМ ТОКЕ

Широкое распространение в отечественной практике получили схемы защит энергетических объектов на переменном оперативном токе, источником которого являются ТТ.

Рассмотрим порядок инженерного расчета нагрузок в токовых цепях защиты с дешунтированием электромагнитов отключения (ЭО) выключателей в схемах защиты понижающих трансформаторов. Такие схемы (рис. 4-12) являются типовыми для подстанций с высшим напряжением 110—220 кВ и упрощенными схемами электрических соединений, где со стороны высшего напряжения установлены отделители и короткозамкатель.

В схемах с дешунтированием в качестве ЭО выключателей 10—35 кВ обычно используются токовые реле прямого действия (РТМ) или токовые электромагниты отключения (ТЭО). Токи срабатывания ТЭО составляют

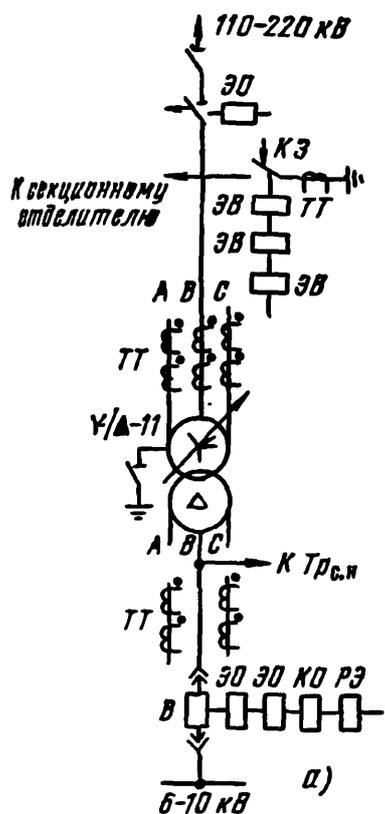
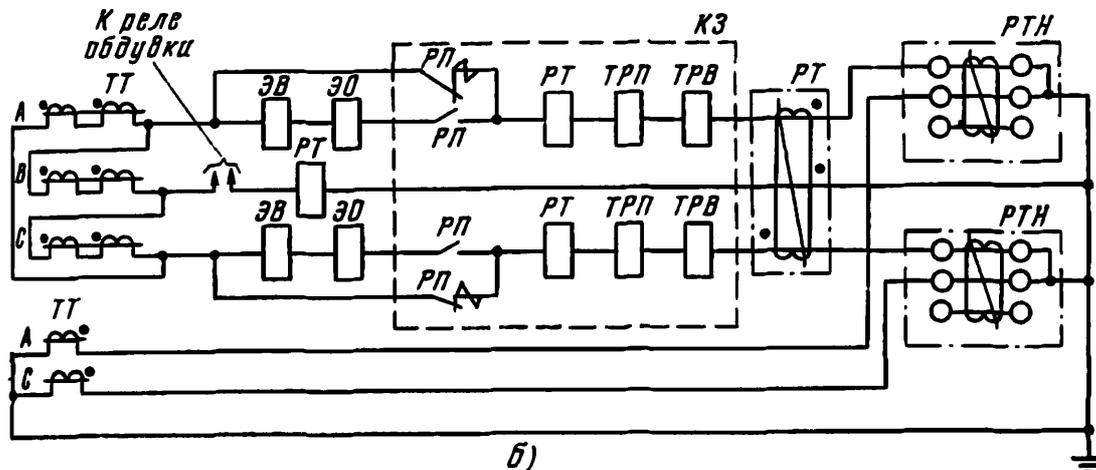


Рис. 4-12. Схема защиты трансформатора на переменном оперативном токе.

а — схема главных цепей; б — схема вспомогательных цепей.



1,5 и 3 А, а минимальный ток срабатывания РТМ 5 А. РТМ и ТЭО питаются от ТТ. В приводы включения короткозамыкателей встраиваются только РТМ<sup>1</sup>.

Учитывая, что мощность встроенных ТТ мала, в типовых схемах защиты с дешунтированием ЭО (ЭВ) применяют последовательное соединение двух вторичных обмоток ТТ в каждой фазе.

В соответствии с типовыми схемами института «Энергосетьпроект» одновременно дешунтируются ЭВ и ЭО на стороне низшего напряжения трансформатора; в эксплуатации распространены также схемы, в которых дешунтируется только ЭВ, а ЭО отключается каскадно после включения короткозамыкателя.

Следует отметить, что последовательное соединение двух обмоток встроенных ТТ не всегда требуется, так как у достаточно мощных ТТ (например, ТВТ-110,  $n_{ном} > 200/5$ ) одна обмотка обычно обеспечивает питание нагрузки при сохранении требуемой точности.

При проектировании защиты понижающего трансформатора в схемах с дешунтированием электромагнитов в общем случае должны проводиться расчеты уставок защиты понижающего трансформатора, сечения жил контрольного кабеля в токовых цепях, тока надежной работы ЭО (ЭВ), коммутационной способности контактов реле, осуществляющих дешунтирование ЭО (ЭВ), напряжения на зажимах вторичной обмотки ТТ.

Расчеты уставок должны выполняться в соответствии с [46] или другими указаниями по этому вопросу [1, 41, 42 и др.]. Остальные этапы расчета непосредственно связаны с нагрузочной способностью ТТ. Рассмотрим их более подробно.

Для проведения расчетов необходимы следующие исходные данные: сопротивление прямой последовательности (либо мощность к. з.) системы в минимальном и максимальном режиме ее работы, тип понижающего трансформатора и его паспортные данные, тип выключателя, короткозамыкателя и приводов к ним, длина контрольного кабеля (от встроенных в трансформатор ТТ до места установки реле защиты); сопротивление обмоток реле защиты в токовых цепях (или потребляе-

---

<sup>1</sup> В дальнейшем под термином «электромагнит отключения» в тексте будут подразумеваться РТМ и ТЭО, встраиваемые в приводы выключателей; под термином «электромагнит включения» (ЭВ) — реле РТМ, встраиваемые в привод короткозамыкателя.

мая этой аппаратурой мощность); тип ТТ и коэффициент трансформации.

Порядок проведения расчетов.

1. Определяется сечение жил контрольного кабеля по методике, изложенной в § 4-3. Особенность заключается в том, что нагрузка на обмотки ТТ должна определяться до дешунтирования ЭО, т. е. без учета сопротивления ЭО (ЭВ), так как только в этом режиме необходимо выполнение условия  $\epsilon \leq 10\%$ . После дешунтирования ЭО (ЭВ) погрешности ТТ не регламентируются и такой режим не является расчетным. Расчет сечений жил кабелей может проводиться только для ТТ, установленных на стороне высшего или среднего напряжения трансформатора, если на стороне низшего напряжения трансформатора выключатели, ТТ и релейная аппаратура устанавливаются в непосредственной близости друг от друга (например, в ячейках КРУ или КРУН).

2. Определяется расчетное сопротивление нагрузки на ТТ после дешунтирования ЭО (ЭВ) при расчетном двухфазном к. з. на стороне НН или СН (для трехобмоточных понижающих трансформаторов) напряжения. Нагрузка определяется по (4-13) для схемы соединения обмоток ТТ в треугольник. Подстановка коэффициентов  $n$  и  $d$  в (4-13) для этого случая приводит к известному соотношению

$$Z_{\text{н. расч}}^{(2)} = 3R_{\text{каб}} + 3Z_{\text{р}} + R_{\text{пер}}, \quad (4-64)$$

где  $Z_{\text{н. расч}}^{(2)}$  — сопротивление нагрузки на обмотки ТТ при расчетном двухфазном к. з. на стороне НН и СН трансформатора;  $R_{\text{каб}}$  — сопротивление жилы кабеля от зажимов ТТ до места установки аппаратуры;  $Z_{\text{р}}$  — сопротивления релейной аппаратуры в одной фазе после дешунтирования, т. е. с учетом сопротивления ЭВ (ЭО);  $R_{\text{пер}}$  — переходное сопротивление контактов ( $R_{\text{пер}} \approx 0,05$  Ом). Зависимости  $R_{\text{каб}} = f(l)$  для кабелей с медной и алюминиевой жилами приведены на рис. 4-13.

Сопротивление  $Z_{\text{р}}$  представляет собой сумму сопротивлений реле и ЭВ (ЭО). Примерные значения этих сопротивлений для типовой схемы даны в табл. 4-5 и 4-6. Учитывая нелинейный характер нагрузки, в табл. 4-5 приведены два значения сопротивлений: при относительно небольшой кратности тока, соответствующей к. з. за трансформатором, и при высокой кратности, соответ-

вующей к. з. на стороне ВН трансформатора. В расчетах по (4-64) используется большее значение  $Z_p$ .

Сопротивление ЭО зависит от типа выключателя и привода. В качестве расчетного принимается

$$Z_{\text{расч ЭО}} \approx 0,8Z_B, \quad (4-65)$$

где  $Z_B$  — сопротивление ЭО при втянутом сердечнике реле РТМ (ТЭО).

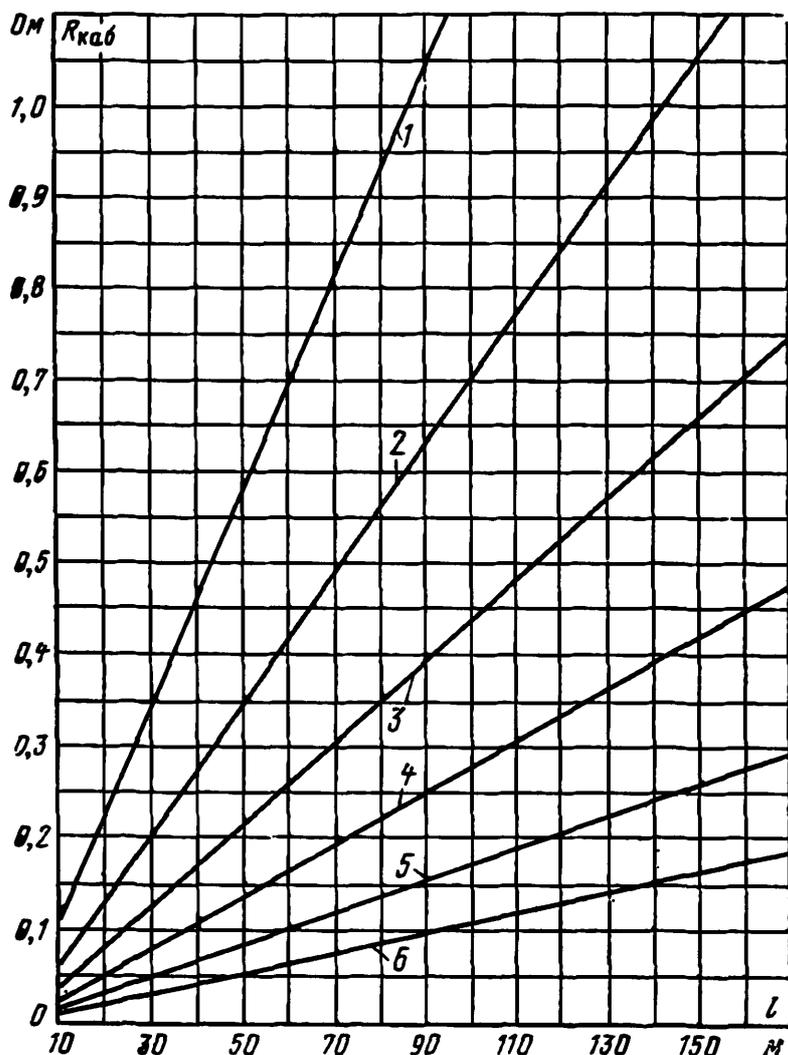


Рис. 4-13. Зависимости сопротивления жил кабеля от длины для медных  $S_1$  и алюминиевых  $S_2$  кабелей различных сечений.

1 —  $S_1=1,5$  мм<sup>2</sup>,  $S_2=2,5$  мм<sup>2</sup>; 2 —  $S_1=2,5$  мм<sup>2</sup>,  $S_2=4,0$  мм<sup>2</sup>; 3 —  $S_1=4$  мм<sup>2</sup>,  $S_2=6$  мм<sup>2</sup>; 4 —  $S_1=6$  мм<sup>2</sup>,  $S_2=10$  мм<sup>2</sup>; 5 —  $S_1=10$  мм<sup>2</sup>,  $S_2=16$  мм<sup>2</sup>; 6 —  $S_1=16$  мм<sup>2</sup>,  $S_2=25$  мм<sup>2</sup>.

Условие (4-65) подтверждено экспериментально для некоторых конструкций реле РТМ; физически оно означает, что расцепление механизма привода выключателя при срабатывании реле РТМ происходит раньше, чем

Таблица 4-5

Тип реле	Сопротивление токовой обмотки, Ом. при кратности тока	
	$K = 1-2$	$K = 10 \div 15$
РНТ-565 (активное сопротивление рабочей, первой и второй уравнильной обмоток при полностью включенных витках)	0,1	0,1
РТ-40/Р	0,35	0,2
РТ-40/10	0,08	0,08
РВМ-12 (последовательное соединение обмоток)	0,15	0,05
РП-341 (последовательное соединение обмоток)	0,1	0,05
Суммарное сопротивление аппаратуры в типовой схеме	$Z_{p\Sigma} = 0,78$	$Z_{p\Sigma} = 0,48$

Таблица 4-6

Тип ЭО (ЭВ) и привода	Ток срабатывания, А	Сопротивление, Ом	
		Сердечник опущен	Сердечник втянут
Реле РТМ в приводе ПП-67 (ПП-61)	5	0,64	2,32
Реле РТМ в приводе выключателя ВМПП-10	5	0,79	2,68
Реле РТМ в приводе ШПКМ короткозамыкателя КЗ-110М, КЗ-220М	5	0,72	2,0
ТЭО в приводе ПП-67	3	2,22	7,5*
ТЭО в приводе ПП-67	1,5	8,9	30*
ТЭО в приводе выключателя ВМПП-10	3	3,98	12*
ТЭО в приводе выключателя ВМПП-10	1,5	15,5	47,0*

\* Определено приближенным расчетом.

сердечник дойдет до упора и сопротивление реле станет равным  $Z_{в}$ .

3. Определяется ток надежной работы ЭО (ЭВ):

$$I_{н.р.ЭО} = n_{ном} \left( k_0 \frac{I_{ср.ЭО}}{K_{сх.ЭО}^2} + I_0 \right), \quad (4-66)$$

где  $k_0$  — коэффициент отстройки, учитывающий возможность изменения тока срабатывания реле относительно тока уставки, а также необходимость обеспечить время срабатывания реле менее 0,1 с [47];  $I_{ср.ЭО}$  — номинальный ток срабатывания ЭО;  $K_{сх.ЭО}^{(2)}$  — коэффициент схе-

мы включения ЭО при расчетном двухфазном к. з. за трансформатором;  $I_0$  — ток намагничивания ТТ после дешунтирования ЭО при расчетном двухфазном к. з. за трансформатором, приведенный ко вторичным цепям ТТ.

Значения коэффициентов, входящих в (4-66):  $k_0 \approx 1,4$ ;  $K_{сх\ ЭО}^{(2)} = 1,5$  — при двухфазном к. з. за трансформатором со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$ ;  $K_{сх\ ЭО}^{(2)} = 1$  — при двухфазном к. з. на стороне СН трехобмоточных трансформаторов со схемой соединений обмоток  $\lambda/\lambda/\Delta$ .

Учитывая небольшие кратности тока в ТТ при  $I_{ср.\ ЭО}$ ,  $I_0$  в первом приближении можно определить по методу эквивалентных синусоид следующим образом.

Вычисляется действующая э. д. с. на вторичной обмотке ТТ, необходимая для надежной работы ЭО при расчетном двухфазном к. з.

$$E_{2I} = \frac{k_0 I_{ср\ ЭО}}{K_{сх\ ЭО}^{(2)}} (Z_{н.\ расч}^{(2)} + Z_{2в}). \quad (4-67)$$

Для схем с двумя последовательно включенными одинаковыми обмотками сопротивление  $Z_{2в}$  удваивается.

Определяется максимальная магнитная индукция в магнитопроводе ТТ по (1-15) при  $K_\phi = 1,11$ . Для схем с двумя последовательно соединенными одинаковыми обмотками ТТ расчетное значение индукции

$$B_{расч\ max} = 0,5 B_{max}. \quad (4-68)$$

По кривой намагничивания стали ТТ (рис. 4-7) для  $B_{расч\ max}$  определяется действующая напряженность поля  $H$  (А/м) в магнитопроводе ТТ. В случаях, когда может быть снята реальная характеристика намагничивания ТТ, целесообразно в качестве расчетной использовать эту характеристику.

Определяется действующий ток намагничивания по (4-37).

Результаты расчета  $I_{н.\ p\ ЭО}$  для различных значений  $Z_{в}$  удобно представить в виде зависимостей  $K_{min} = f(Z_{н})$ , где

$$K_{min} = \frac{I_{н.\ p\ ЭО}}{I_{ном}}, \quad (4-69)$$

где  $I_{ном}$  — номинальный первичный ток ТТ.

Кривые  $K_{min}=f(Z_H)$  для ТВТ-110 приведены на рис. 4-14 и 4-15. По кривым  $K_{min}=f(Z_H)$  при рассчитанном по (4-64)  $Z_{н. расч}^{(2)}$  определяется  $K_{min}$ , а затем  $I_{н. р ЭО}$ .

В методической работе Горьковского отделения института «Энергосетьпроект» «Типовые расчеты и оценка возможности выполнения защит трансформаторов 35—220 кВ на переменном и выпрямленном оперативном

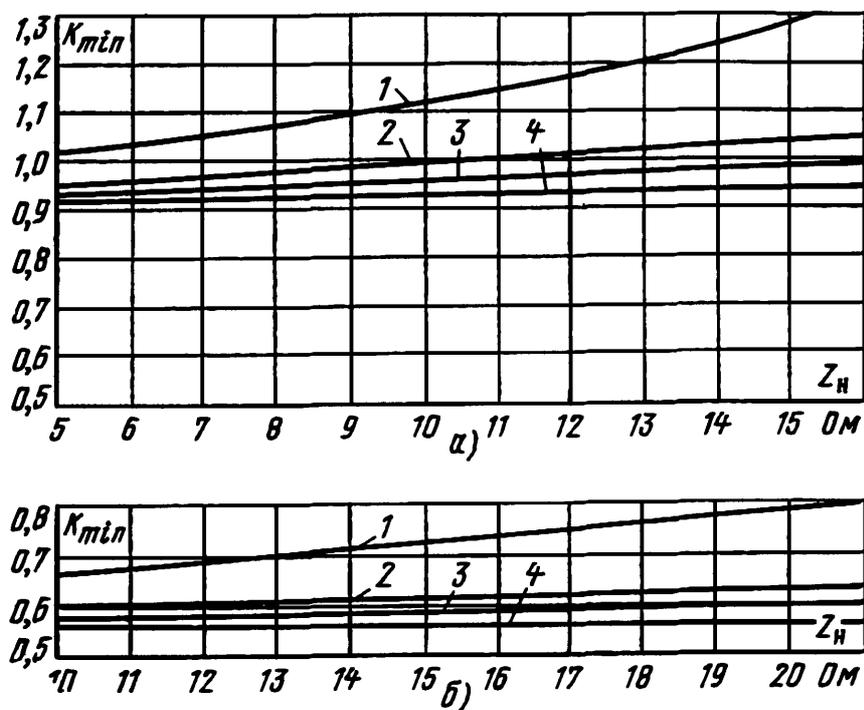


Рис. 4-14. Минимальные кратности надежной работы электромагнитов отключения (включения) в цепи ТВТ-110 применительно к двухобмоточным понижающим трансформаторам (вторичные обмотки двух ТТ соединены последовательно).

а —  $I_{ср ЭО}$  (ЭВ) = 5 А; б —  $I_{ср ЭО}$  (ЭВ) = 3 А; 1 —  $I_{1ном} = 100$  А; 2 —  $I_{1ном} = 150$  А;  
3 —  $I_{1ном} = 200$  А; 4 —  $I_{1ном} \geq 300$  А.

токе», 1977 г., приводятся кривые  $K_{min}=f(Z_H)$  для большинства отечественных встроенных в трансформатор ТТ при  $I_{ср ЭО} = 3$  А,  $I_{ср ЭО} = 5$  А, и условия использования как одной, так и нескольких последовательно соединенных обмоток ТТ.

Уточняется коэффициент чувствительности защиты

$$I_{с. з} \geq \frac{K_{сх р}^{(2)}}{K_{сх р}^{(3)}} I_{н. р ЭО}, \quad (4-70)$$

где  $I_{с. з}$  — первичный ток срабатывания защиты.

Принимается меньшее из двух значений тока — максимальной токовой защиты  $I_{с.з.м.т}$  и дифференциальной токовой  $I_{с.з.д.т}$  (если она предусматривается). Обычно  $I_{с.з.д.т} < I_{с.з.м.т}$ ;  $K_{сх.р}^{(2)}$ ,  $K_{сх.р}^{(3)}$  — коэффициенты схемы

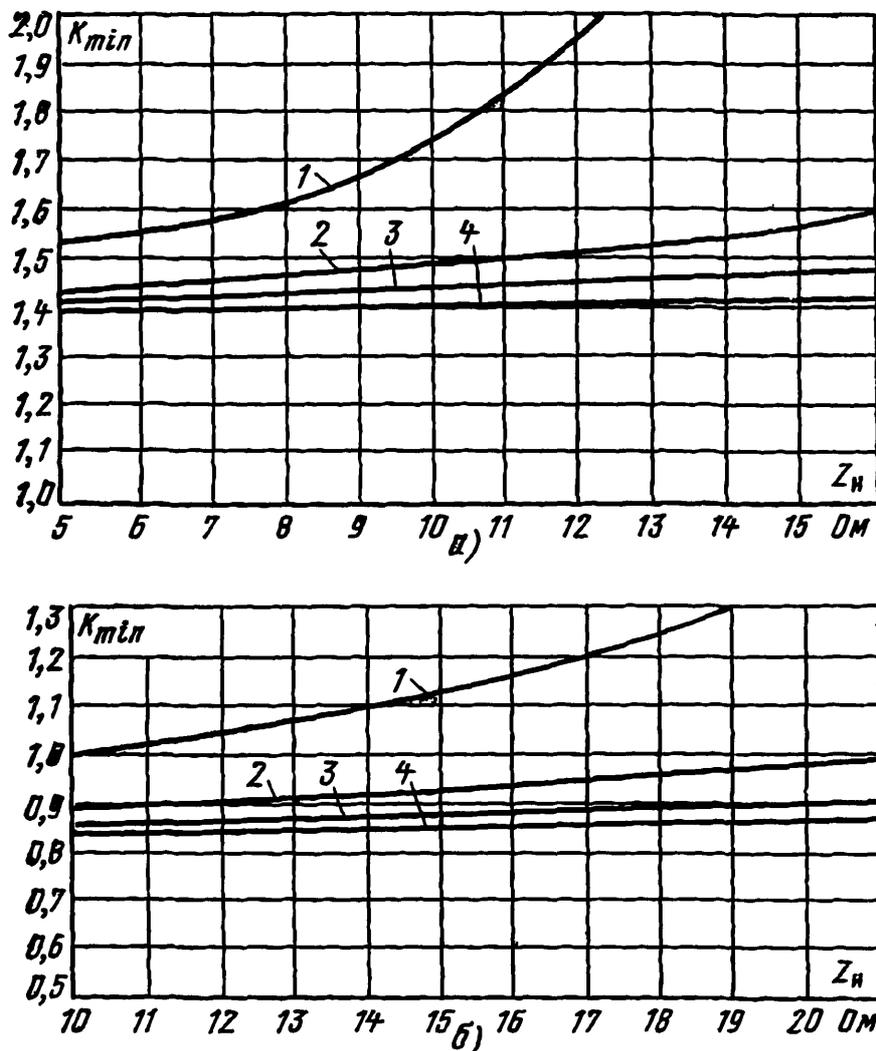


Рис. 4-15. Минимальные кратности надежной работы электромагнитов отключения (включения) в цепи ТВТ-110 применительно к трехобмоточным трансформаторам (вторичные обмотки двух ТТ соединены последовательно).

а —  $I_{ср \text{ ЭО(ЭВ)}} = 5 \text{ А}$ ; б —  $I_{ср \text{ ЭО(ЭВ)}} = 3 \text{ А}$ ; 1 —  $I_{н\text{о}м} = 100 \text{ А}$ ; 2 —  $I_{н\text{о}м} = 150 \text{ А}$ ;  
3 —  $I_{н\text{о}м} = 200 \text{ А}$ ; 4 —  $I_{н\text{о}м} \geq 300 \text{ А}$ .

включения реле соответственно при двухфазном и трехфазном к. з. за трансформатором.

При соединении обмоток ТТ в треугольник  $K_{сх.р}^{(3)} = 1,73$ ;  $K_{сх.р}^{(2)} = 1,5$  — при двухфазном к. з. за трансформатором со схемой соединения обмоток  $\Delta/\Delta$ ;  $K_{сх.р}^{(2)} = 1$  — при двух-

фазном к. з. на стороне СН трехобмоточных трансформаторов со схемой соединения обмоток  $\lambda/\lambda/\Delta$  для двухрелейной схемы;  $K_{сх.р}^{(2)} = 2$  — при двухфазных к. з. на стороне СН трехобмоточных трансформаторов со схемой соединения обмоток  $\lambda/\lambda/\Delta$  для трехрелейной схемы.

Если условие (4-70) выполняется, то чувствительность защиты определяется по току срабатывания ее измерительных органов [46], а если не выполняется, то чувствительность определяется по току срабатывания ЭО (ЭВ):

а) для двухобмоточных трансформаторов

$$k_q = \frac{I_{к min}^{(3)}}{I_{в.р.ЭО}}, \quad (4-71)$$

где  $I_{к min}$  — ток на стороне ВН трансформатора при трехфазном к. з. на стороне НН;

б) для трехобмоточных трансформаторов

$$k_q = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I'_{к min}}{I'_{в.р.ЭО}}, \quad (4-72)$$

где  $I'_{к min}$  — ток на стороне ВН трансформатора при трехфазном к. з. на стороне СН;  $I'_{в.р.ЭО}$  — ток надежной работы ЭО при расчетном двухфазном к. з. на стороне СН.

Проверяется коммутационная способность контактов реле, дешунтирующих ЭО (ЭВ). Одним из ограничивающих факторов при использовании схем с дешунтированием ЭО (ЭВ) является ток через контакты реле, осуществляющих дешунтирование. Наибольшее значение тока реле РП-341 или РТ-80 составляет 150 А при сопротивлении дешунтируемой цепи не более 4,5 Ом.

Первоначально расчет тока выполняется без учета насыщения магнитопровода ТТ по формуле

$$I_{max}^{(3)} \leq \frac{150 I_{1НОМ}}{K_{сх}^{(3)} I_{2НОМ}} = 17,3 I_{1НОМ}, \quad (4-73)$$

где  $I_{max}^{(3)}$  — ток при трехфазном к. з. на стороне ВН трансформатора в максимальном режиме работы системы;  $K_{сх}^{(3)} = \sqrt{3}$ ;  $I_{2НОМ} = 5$  А для схем с дешунтированием ЭО.

В тех случаях, когда условие не выполняется, следует проверить наличие насыщения магнитопровода ТТ. Критерием насыщения является условие

$$\varepsilon > 10\% \quad (4-74)$$

при  $K = 17,3$  и сопротивлении нагрузки  $Z_{н. расч}^{(3)}$ .

При расчете  $Z_{н. расч}^{(3)} = Z_{н. расч}^{(2)}$  следует учитывать нелинейный характер нагрузки на ТТ и расчетное значение сопротивлений реле определять при  $K = 17,3$ . Расчет  $Z_{н. расч}^{(3)}$  осуществляется по (4-64) без учета сопротивления дешунтируемых ЭО, поскольку регламентируется ток до дешунтирования ЭО. Если используются две последовательно включенные одинаковые обмотки ТТ, то расчетное сопротивление на одну обмотку

$$Z'_{н. расч} = 0,5Z_{н. расч}^{(3)} \quad (4-75)$$

Проверка условия (4-74) осуществляется по кривым предельной кратности ТТ. Если точка с координатами  $K=17,3$  и  $Z'_{н. расч}$  расположена выше кривой предельной кратности соответствующего ТТ (имеет место при  $\varepsilon > > 10\%$ ), то следует определить примерное значение тока через контакты реле, осуществляющего дешунтирование, с учетом насыщения магнитопровода ТТ.

$$I_{2р} \approx \sqrt{3} I_{2max}^{(3)} \left( 1 - \frac{f}{100k_3} \right), \quad (4-76)$$

где  $I_{2max}^{(3)} = I_{1max}^{(3)} / n_n$  — вторичный ток ТТ при трехфазном к. з. на стороне ВН трансформатора без учета насыщения магнитопровода ТТ;  $k_3$  — коэффициент запаса, учитывающий возможность использования лучших магнитных материалов для магнитопроводов ТТ ( $k_3 \approx 1,2$ ; токовая погрешность  $f$  определяется по кривой  $A = \Psi(f)$  (см. рис. 4-2).

Расчеты показывают, что у сравнительно маломощных встроенных ТТ (ТВТ-35М с  $n_{ном} = 150/5$ ;  $200/5$ ;  $300/5$ ; ТВТ-110 с  $n_{ном} = 150/5$ ;  $200/5$ ; ТВТ-220 с  $n_{ном} = 200/5$ ) при реальных нагрузках магнитопроводы насыщаются и поэтому допустимые кратности тока к. з. могут быть существенно выше 17,3.

Рассчитывается напряжение на вторичной обмотке ТТ после дешунтирования ЭО. При высоких кратностях тока к. з. на вторичных обмотках ТТ могут возникать напряжения, которые представляют опасность для изоляции вторичных цепей. Опыт свидетельствует, что расчет напряжения на вторичных обмотках ТТ, работающих на нелинейную индуктивную нагрузку (ЭО, ЭВ), должен производиться с учетом потерь на вихревые токи в магнитопроводе ЭО и ТТ. Расчет сопротивления потерь достаточно сложен, поэтому на практике часто используются приближенные или эмпирические формулы.

Приближенный расчет амплитуды напряжения на вторичных обмотках ТТ с учетом потерь на вихревые токи в магнитопроводах ЭО и ТТ (сопротивление потерь  $R_B$  включается в расчетной схеме замещения параллельно нагрузке) может производиться по [48]:

$$U_{2max} \approx 2 \sqrt{E_{kmax} R_B I_{2max}}, \quad (4-77)$$

где  $E_{kmax}$  — амплитуда напряжения на катушке ЭО при индукции в магнитопроводе, равной 0,6—0,8 Т (эта индукция соответствует максимальной магнитной проницаемости стали магнитопровода);  $R_B$  — сопротивление вихревым токам;  $I_{2max}$  — амплитуда тока, протекающего через реле (без учета насыщения ТТ).

Напряжение  $E_{kmax}$  приближенно можно определить экспериментально по ВАХ ЭО при верхнем положении сердечника — как напряжение в точке изгиба характеристики.

Область использования формулы (4-77)

$$I_{2max} R_B > 10 E_{kmax}. \quad (4-78)$$

Поскольку магнитопровод ТТ выполняется либо шихтованным, либо витым из изолированных друг от друга слоев ленты, без большой погрешности можно учесть только потери на вихревые токи в магнитопроводе ЭО (ЭВ). Это дает небольшой расчетный запас.

Примерные значения  $E_{kmax}$  и  $R_B$ , рассчитанные приближенно для ТЭО, встраиваемых в привод ПП-67, приведены ниже:

$I_{cp}$ , А	.....	1,5	3
$R_B$ , Ом	.....	140	35
$E_{kmax}$ , В	.....	48	24

Для реле РТМ, встраиваемых в привод ПП-67, с некоторым запасом параметры  $R_B$  и  $E_{kmax}$  приближенно можно оценить следующим образом:

$$E_{kmax} \approx \frac{I_{cp \text{ ТЭО}}}{I_{cp \text{ РТМ}}} E_{mk \text{ ТЭО}}; \quad (4-79)$$

$$R_{B \text{ РТМ}} \approx \left( \frac{I_{cp \text{ ТЭО}}}{I_{cp \text{ РТМ}}} \right)^2 R_{B \text{ ТЭО}}. \quad (4-80)$$

Результаты расчета по (4-79) при значениях исходных параметров, приведенных выше, хорошо совпадают с результатами экспериментов, выполненных на Рижском опытном заводе «Энергоавтоматика»: при  $I_{cp \text{ ТЭО}} = 1,5 \text{ А}$ ,  $I_2 = 100 \text{ А}$ ,  $U_{2p \text{ max}} = 1950 \text{ В}$ ,  $U_{2опытн \text{ max}} = 1900 \text{ В}$ .

Опытные и расчетные данные  $R_B$  и  $E_{kmax}$  для ТЭО и РТМ, встроенных в привод выключателя ВМПП-10, отсутствуют.

Сопоставляя мощности срабатывания реле РТМ (ТЭО), встроенных в привод выключателя ВМПП-10 и привод ПП-67, можно предположить, что напряжение на ЭО привода выключателя ВМПП-10 будет на 15—30% выше, чем рассчитанное по (4-79) для привода ПП-67. Расчетным при определении  $I_{2max}$  является режим двухфазного к. з. на стороне ВН трансформатора между фазами АВ и АС, когда в одном из ЭО протекает ток, удвоенный по сравнению с ЭО, установленным в другой фазе. Наибольшее напряжение на обмотке ТТ при двухфазном к. з.

$$U_{2\Sigma \text{ max}} = U_{2max(A)} + U_{2max(C)}, \quad (4-81)$$

где  $U_{2max(A)}$ ,  $U_{2max(C)}$  — амплитуды напряжений на зажимах ЭО, установленных соответственно в фазах А и С. Токи в этих фазах при расчетном двухфазном к. з. различаются в 2 раза, причем наибольший из токов равен току при трехфазном к. з. С учетом этого имеем:

$$I_{2max(A)} = 2I_{2max(C)} = K_{сх}^{(3)} \sqrt{2} I_2^{(3)} = \sqrt{6} I_2^{(3)}; \quad (4-82)$$

$$I_{2max(C)} = \frac{\sqrt{6}}{2} I_2^{(3)}. \quad (4-83)$$

Подставляя значения токов из (4-82) и (4-83) в (4-81) с учетом (4-77), после преобразований получаем:

$$U_{2\Sigma \text{ max}} = 5,36 \sqrt{E_{kmax} R_B I_2^{(3)}}. \quad (4-84)$$

При одновременном дешунтировании ЭО и ЭВ (с одинаковыми параметрами) выражение (4-84) принимает вид:

$$U_{2\Sigma max} = 10,72 \sqrt{E_{k max} R_B I_2^{(3)}}. \quad (4-85)$$

Если в качестве максимально допустимой амплитуды напряжения на зажимах вторичной обмотки ТТ принять 2000 В, то из (4-85) получим:

$$I_2^{(3)} = \frac{2000^2}{5,36^2 E_{k max} R_B} \quad (4-86)$$

для одного дешунтируемого ЭВ и

$$I_2^{(3)} = \frac{2000^2}{10,72^2 E_{k max} R_B} \quad (4-87)$$

для одновременного дешунтируемых ЭО и ЭВ.

Подставляя в (4-86) значения параметров, найдем  $I_2^{(3)}$ :

а) для ТЭО с  $I_{ср}=1,5$  А

$$I_2^{(3)} = \frac{2000^2}{5,36^2 \cdot 48 \cdot 140} = 20,6 \text{ А.}$$

Максимально допустимая кратность тока

$$K = 20,6 / 5 = 4,1;$$

полученная кратность мала, в результате чего схемы с ТЭО, имеющим  $I_{ср}=1,5$  А, практически не могут использоваться по условиям допустимых напряжений в токовых цепях;

б) для ТЭО с  $I_{ср}=3$  А

$$I_2^{(3)} = \frac{2000^2}{5,36^2 \cdot 35 \cdot 24} = 164 \text{ А;}$$

в) для РТМ с  $I_{ср}=5$  А при одновременном дешунтировании ЭВ и ЭО определим параметры  $E_{k max}$  и  $R_B$  по (4-79) и (4-80):

$$E_{k РТМ max} \approx \frac{3}{5} \cdot 24 = 14,4 \text{ В; } R_B \approx \left(\frac{3}{5}\right)^2 35 = 12,6 \text{ Ом;}$$

$$I_2^{(3)} = \frac{2000^2}{10,72^2 \cdot 14,4 \cdot 12,6} = 194 \text{ А.}$$

Таким образом, для случаев дешунтирования ТЭО с  $I_{ср}=3$  А и одновременного дешунтирования ЭО и ЭВ

с РТМ  $I_{\text{ср}}=5$  А допустимый ток по условиям перенапряжений на зажимах обмоток ТТ больше, чем по условию работы контактов реле  $\left(\frac{150}{\sqrt{3}}\right)$ . Поэтому при проектировании таких вариантов схем с дешунтированием расчет напряжений на зажимах вторичной обмотки ТТ может не выполняться.

Пример 4-6. Рассчитывается схема защиты понижающего трансформатора ТМН-6300/110,  $S_{\text{ном}}=6300$  кВ·А,  $U_{\text{ном}}=115$  кВ,  $U_{\text{к min}}=9,8\%$ ,  $U_{\text{к max}}=11,5\%$ ,  $U_{\text{к ср}}=10,5\%$ , диапазон регулирования напряжения под нагрузкой  $\Delta$  РПН  $\pm 16\%$ . Сопротивление прямой последовательности системы в максимальном и минимальном режимах ее работы:  $X_{\text{с max}}=20$  Ом;  $X_{\text{с min}}=40$  Ом. Трансформатор тока ТВТ-110,  $n_{\text{ном}}=150/5$ . Число последовательно включенных вторичных обмоток ТТ в каждой фазе  $N=2$ . Одновременно дешунтируются два электромагнита ЭО и ЭВ, включенные последовательно. Выключатель на стороне НН типа ВМПП-10. Ток срабатывания ЭО (ЭВ)  $I_{\text{ср ЭО}}=5$  А.

Сопротивление ЭО в верхнем положении сердечника  $Z_{\text{в ЭО}}=2,7$  Ом. Короткозамыкатель КЗ-110 М выполняется с приводом ШПК. Сопротивление ЭВ в верхнем положении сердечника  $Z_{\text{в ЭВ}}=2$  Ом. Длина контрольного кабеля от встроенных в понижающий трансформатор ТТ до реле защиты  $l_{\text{дейст}}=40$  м. Сопротивление реле защиты в токовых цепях: при к. з. на НН трансформатора  $Z_{\text{р max}}=0,8$  Ом; при к. з. на ВН трансформатора  $Z_{\text{р min}}=0,5$  Ом (см. табл. 4-5).

Решение. Определяется первичный ток срабатывания дифференциальной защиты трансформатора, например, по [41]

$$I_{\text{с.з}}=100 \text{ А.}$$

Определяется сопротивление понижающего трансформатора при положении регулятора напряжения под нагрузкой, соответствующее  $\Delta U_{\text{РПН}}=-16\%$ :

$$X_{\text{тр min}} = \frac{U_{\text{к min}} [U_{\text{ср}} (1 - \Delta U_{\text{РПН}})]^2}{100 S_{\text{ном}}} = \frac{9,8 [115 (1 - 0,16)]^2}{100 \cdot 6,3} = 144 \text{ Ом.}$$

Определяется ток трехфазного к. з. за трансформатором в максимальном режиме работы системы и  $X_{\text{тр min}}$

$$I_{\text{к max}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} (X_{\text{с max}} + X_{\text{р min}})} = \frac{115\,000}{\sqrt{3} (20 + 144)} = 405 \text{ А.}$$

Определяется кратность тока к. з. по отношению к номинальному первичному току ТТ типа ТВТ-110:

$$K = \frac{I_{\text{к max}}^{(3)}}{I_{1 \text{ ном}}} = \frac{405}{150} = 2,7.$$

Из кривых для ТВТ-110, 150/5 (рис. П2-45, кривая 2) определяется  $Z_{н.доп}=1,45$  Ом для одной обмотки ТТ. Для двух последовательно соединенных вторичных обмоток ТТ  $Z_{н.доп}=2,9$  Ом.

По выражениям табл. 4-3 для схемы 2 определяются параметры  $n$  и  $d$ :

$$n = \frac{3 \cdot 0,8 + 0,05}{2,9} = 0,845; d = 3.$$

Определяется отношение  $l_6/Z_{н.доп}$  по (4-17):

$$\frac{l_6}{Z_{н.доп}} = 143 \frac{1 - 0,845}{3} = 7,4.$$

Определяется базисная длина контрольного кабеля

$$l_6 = 7,4 \cdot 2,9 = 21,5 \text{ м.}$$

Определяется расчетное сечение жил контрольного кабеля с алюминиевыми жилами по рис. 4-1, при

$$\frac{l_{дейст}}{l_6} = \frac{40}{21,5} = 1,86$$

$$S_{расч} = 10 \text{ мм}^2.$$

Из рис. 4-13 при  $S=10 \text{ мм}^2$  и  $l=40 \text{ м}$  определяется сопротивление жил кабеля  $R_{каб}=0,11$  Ом.

Определяется расчетное сопротивление нагрузки на ТТ после дешунтирования ЭО (ЭВ) с учетом  $R_{каб}$  по (4-64):

$$Z_{н.расч}^{(2)} = 3 \cdot 0,11 + 3(0,8 + 2,7 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,8) + 0,05 = 14,08 \text{ Ом.}$$

Определяется ток надежной работы ЭО (ЭВ) (с использованием 2 рис. 4-14) по выражению

$$I_{н.р \text{ ЭО}} = I_{ном} K_{min} = 150 \cdot 1,03 = 155 \text{ А.}$$

Проверяется условие (4-70):

$$I_{с.з} \geq \frac{1,5}{3} \cdot 155 = 134 \text{ А, } 100 < 134.$$

Условие (4-70) не выполняется.

Проверяется чувствительность защиты по (4-71), для чего предварительно рассчитываются:

максимальное сопротивление трансформатора

$$X_{тр max} = \frac{U_{к max} U^2_{max}}{100 S_{ном.тр}} = \frac{11,5 \cdot 126^2}{100 \cdot 6,3} = 290 \text{ Ом;}$$

ток трехфазного к. з. за трансформатором в минимальном режиме

$$I_{к min}^{(3)} = \frac{U_{max}}{\sqrt{3}(X_{с min} + X_{тр max})} = \frac{126 \text{ 000}}{\sqrt{3} \cdot (40 + 290)} = 220 \text{ А.}$$

С учетом полученных данных определяется  $k_{ч} = 220/155 = 1,42 < 2$ .

Чувствительность защиты не обеспечивается.

Выполнение защиты с дешунтированием одного ЭВ с  $I_{ср \text{ ЭО}} = 5 \text{ А}$  не дает заметных преимуществ, так как  $I_{н.р \text{ ЭО}}$  уменьшается при

этом незначительно. Произведем расчет для варианта дешунтирования ЭВ, реле РТМ которого перемотано и имеет ток срабатывания 3 А. Выключатель на стороне НН трансформатора отключается каскадно после включения короткозамыкателя.

Пример 4-7. Рассчитывается схема защиты понижающего трансформатора ТМН-6300/110. Исходные данные такие же, как в примере 4-6, за исключением числа одновременно дешунтируемых ЭО (ЭВ). Дешунтируется один ЭВ с током срабатывания  $I_{ср\ ЭВ} = 3\text{ А}$ .

Решение. Определяется сопротивление ЭВ с  $I_{ср\ ЭВ} = 3\text{ А}$  в верхнем положении сердечника:

$$Z_{в\ ЭВ} = \left(\frac{5}{I_{ср\ ЭВ}}\right)^2 Z_{в\ ЭВ} = \left(\frac{5}{3}\right)^2 \cdot 2 = 5,55\text{ Ом}.$$

Определяется расчетное сопротивление нагрузки на ТТ после дешунтирования ЭВ с учетом  $R_{каб}$  (из примера 4-6) по (4-64):

$$Z_{в.\text{ расч}}^{(2)} = 3 \cdot 0,11 + 3(0,8 + 5,55 \cdot 0,8) + 0,05 = 16,08\text{ Ом}.$$

Определяется ток надежной работы ЭВ из рис. 4-14,б (кривая 2) по выражению

$$I_{в.\text{ р}\ ЭВ} = I_{ном} K_{min} = 150 \cdot 0,62 = 93\text{ А}.$$

Проверяется условие (4-70):

$$I_{с.\text{ з}} \geq \frac{1,5}{\sqrt{3}} \cdot 93 = 80,6\text{ А}.$$

$$100 > 80,6.$$

Условие (4-70) выполняется.

Проверяется чувствительность защиты по  $I_{с.\text{ з}}$  (при  $I_{кmin}^{(3)}$  из примера 4-6) без учета увеличенной погрешности ТТ:

$$k_{ч} = 220/100 = 2,2 > 2.$$

Проверка чувствительности защиты с учетом погрешности ТТ при  $I_{с.\text{ з}}$  выполняется в следующей последовательности:

а) Определяется значение расчетной нагрузки на ТТ до дешунтирования (с учетом данных в примере 4-6):

$$Z_{в.\text{ расч}}^{(2)} = 3R_{каб} + 3Z_{ср} + R_{пер} = 3 \cdot 0,11 + 3 \cdot 0,8 + 0,05 = 2,78\text{ Ом}.$$

б) Определяется напряжение на вторичных обмотках ТТ при  $I_{с.\text{ з}}$ :

$$U_2 = \frac{0,9 I_{с.\text{ з}}}{n_{ном}} (Z_{в.\text{ расч}}^{(2)} + 2Z_{2в}) = \frac{0,9 \cdot 100}{30} (2,78 + 2 \cdot 0,154) = 9,25\text{ В}.$$

Значение  $Z_{2в} = 0,154$  Ом принимается из табл. ПЗ. Напряжение на обмотке одного ТТ

$$U_{2расч} = 0,5U_2 = 0,5 \cdot 9,25 = 4,63 \text{ В.}$$

в) Определяется индукция в магнитопроводе ТТ:

$$B = \frac{U_{2расч}}{222Q\omega_2} = \frac{4,63}{222 \cdot 86 \cdot 10^{-4} \cdot 29} = 0,084 \text{ Т.}$$

Значения  $Q$  и  $\omega_2$  определяются из табл. ПЗ.

г) Определяется напряженность магнитного поля в магнитопроводе ТТ: из рис. 4-6 при  $B = 0,084$  Т  $H = 8,5$  А/м.

д) Определяется ток намагничивания ТТ:

$$I_0 = \frac{Hl}{\omega_2} = \frac{8,5 \cdot 1,62}{29} = 0,475 \text{ А.}$$

Значение  $l$  берется из табл. ПЗ.

е) Определяется коэффициент чувствительности с учетом погрешности ТТ:

$$k_{ч} = \frac{I_{к min}}{I_{с.з} + n_{ном}I_0} = \frac{220}{100 + 30 \cdot 0,475} = 1,93 < 2.$$

Полученная чувствительность отличается от нормируемой незначительно и может считаться приемлемой.

Определяется ток трехфазного к. з. на стороне ВН трансформатора в максимальном режиме работы системы:

$$I_{max}^{(3)} = \frac{U_{max \text{ ВН}}}{\sqrt{3}X_{с max}} = \frac{126 \text{ 000}}{\sqrt{3} \cdot 20} = 3640 \text{ А.}$$

Проверяется условие (4-74):

$$I_{max}^{(3)} \leq 17,3 \cdot 150 = 2600 \text{ А;} \\ 3640 > 2600 \text{ А.}$$

Условие (4-73) не соблюдается, поэтому выполним расчет с учетом погрешности ТТ.

Определяется максимальная кратность тока к. з. по отношению к номинальному току ТТ:

$$K_{max} = \frac{3640}{150} = 24,3.$$

Расчетная нагрузка на ТТ до дешунтирования при  $K_{max}$  (с учетом нелинейности нагрузки)

$$Z_{в. расч}^{(2)} = 3R_{каб} + 3Z_{р min} + R_{пер} = 3 \cdot 0,11 + 3 \cdot 0,5 + 0,05 = 1,88 \text{ Ом.}$$

Нагрузка на один ТТ

$$Z'_{н. расч}^{(2)} = 0,5 \cdot 1,88 = 0,94 \text{ Ом.}$$

Определяется значение предельной кратности ТТ при  $Z_{н. расч} = 0,94 \text{ Ом}$  по рис. П2-45 (кривая 2):

$$K_{10} = 16.$$

Определяется коэффициент

$$A = \frac{K_{max}}{K_{10}} = \frac{24,3}{16} = 1,52.$$

Из рис. 4-2 при  $A=1,52$  определяется значение токовой погрешности ТТ  $f=25\%$ .

Определяется действительный ток через контакты дешунтирующего реле по (4-77):

$$I_{2p} = \sqrt{3} \frac{I_{max}^{(3)}}{n_{ном}} \left( 1 - \frac{f}{100k_3} \right) = 1,73 \cdot \frac{3640}{30} \cdot \left( 1 - \frac{25}{100 \cdot 1,2} \right) = 166 \text{ А.}$$

$$I_{2p} > 150 \text{ А.}$$

По условиям работы контактов реле вариант дешунтирования ЭВ с  $I_{ср} = 3 \text{ А}$  в данном случае непригоден. В качестве источника питания оперативных цепей защиты понижающего трансформатора в данном случае могут быть использованы предварительно заряженные конденсаторы или блоки питания.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### П1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ УГЛА МЕЖДУ ТОКАМИ ПОВРЕЖДЕННЫХ ФАЗ ПРИ ДВУХФАЗНОМ К. З. НА ЗЕМЛЮ

Расчет ведется методом симметричных составляющих для общего случая линии с двухсторонним питанием при общепринятом допущении, что сопротивления прямой и обратной последовательностей элементов системы равны между собой.

При двухфазном к. з. на землю (В-С-0) токи поврежденных фаз определяются по выражениям [49]

$$i_B^{(1,1)} = -I_{max}^{(3)} \frac{m}{1 + 2X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma}} \left[ i \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \sqrt{3} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}} \right) + \left( \frac{1}{2} + K \right) \right];$$

$$j_C^{(1,1)} = I_{max}^{(3)} \frac{m}{1 + 2X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma}} \left[ j \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + \sqrt{3} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}} \right) - \left( \frac{1}{2} + K \right) \right], \quad (\text{П1-1})$$

где  $j_B^{(1,1)}$ ,  $j_C^{(1,1)}$  — соответственно векторы токов фаз  $B$  и  $C$  в месте установки трансформаторов тока;  $X_{1\Sigma}$ ,  $X_{0\Sigma}$  — суммарные сопротивления соответственно прямой и нулевой последовательностей в месте к. з.;  $m$  и  $K$  — коэффициенты, определяемые отношениями

$$m = \frac{X_{1c}}{X_{1л} + X_{1c}}; \quad (\text{П1-2})$$

$$K = \frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}} \frac{X_{1л} + X_{1c}}{X_{0л} + X_{0c}}, \quad (\text{П1-3})$$

где  $X_{1c}$ ,  $X_{0c}$  — сопротивления прямой и нулевой последовательностей системы до места установки ТТ;  $X_{1л}$ ,  $X_{0л}$  — сопротивления прямой и нулевой последовательностей линии от места установки ТТ до места к. з.

Из (П1-1) находим углы сдвига токов фаз  $B$  и  $C$  относительно тока фазы  $A$ :

$$\left. \begin{aligned} \varphi_B &= - \left[ \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{0,5 + K}{\sqrt{3} (0,5 + X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma})} \right]; \\ \varphi_C &= \frac{\pi}{2} + \operatorname{arctg} \frac{0,5 + K}{\sqrt{3} (0,5 + X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma})}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{П1-4})$$

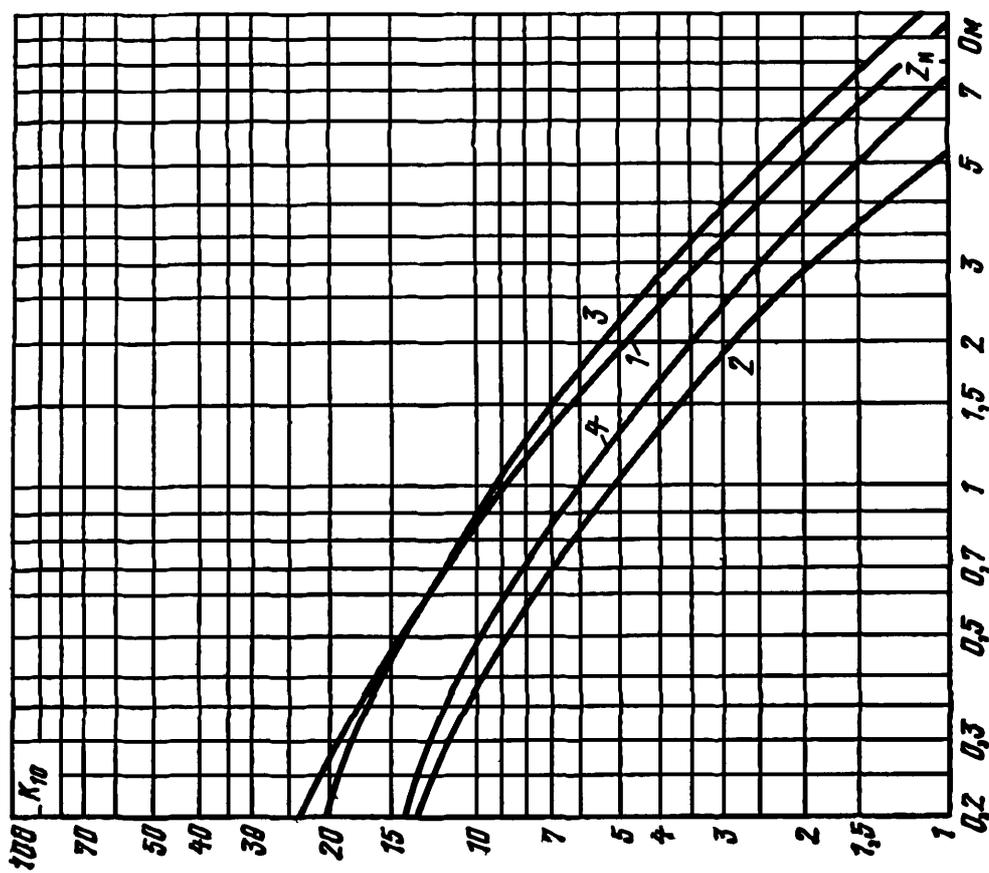
Отсюда угол между векторами  $j_B^{(1,1)}$  и  $j_C^{(1,1)}$

$$\alpha = 2\pi + \varphi_B - \varphi_C. \quad (\text{П1-5})$$

Подставляя значения  $\varphi_B$  и  $\varphi_C$  из (П1-4) в (П1-5), после преобразований получаем:

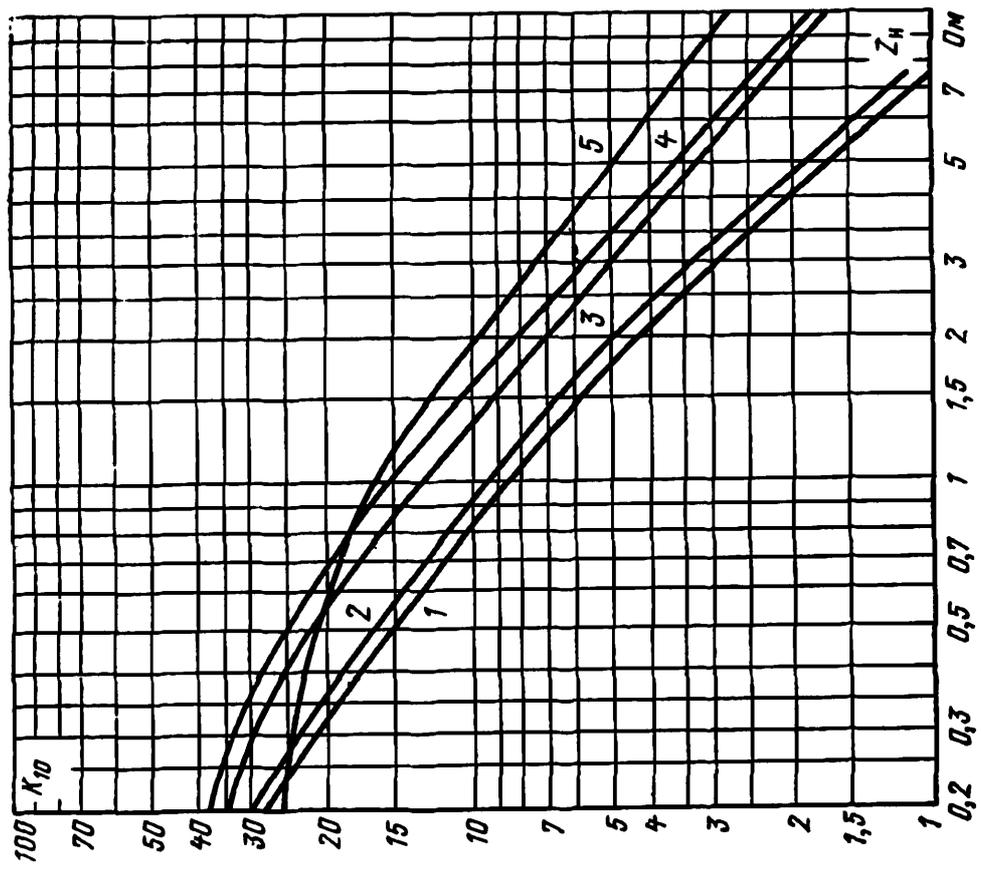
$$\alpha = 2 \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3} (0,5 + X_{0\Sigma}/X_{1\Sigma})}{0,5 + K}. \quad (\text{П1-6})$$

**П2. КРИВЫЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ КРАТНОСТЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА**



**Рис. П2-1. ТПЛ-10.**

- 1 -  $n_{ном}=5/5$  - 300/5 класс P; 2 -  $n_{ном}=5/5$  - 300/5 класс 0,5;
- 3 -  $n_{ном}=400/5$  класс P; 4 -  $n_{ном}=400/5$  класс 0,5



**Рис. П2-2. ТПЛ-10К.**

- 1 -  $n_{ном}=5/5$  - 50/5; 2 -  $n_{ном}=100/5$  - 400/5; 600/5; 3 -  $n_{ном}=800/5$ ;
- 4 -  $n_{ном}=1000/5$ ; 5 -  $n_{ном}=1500/5$ .

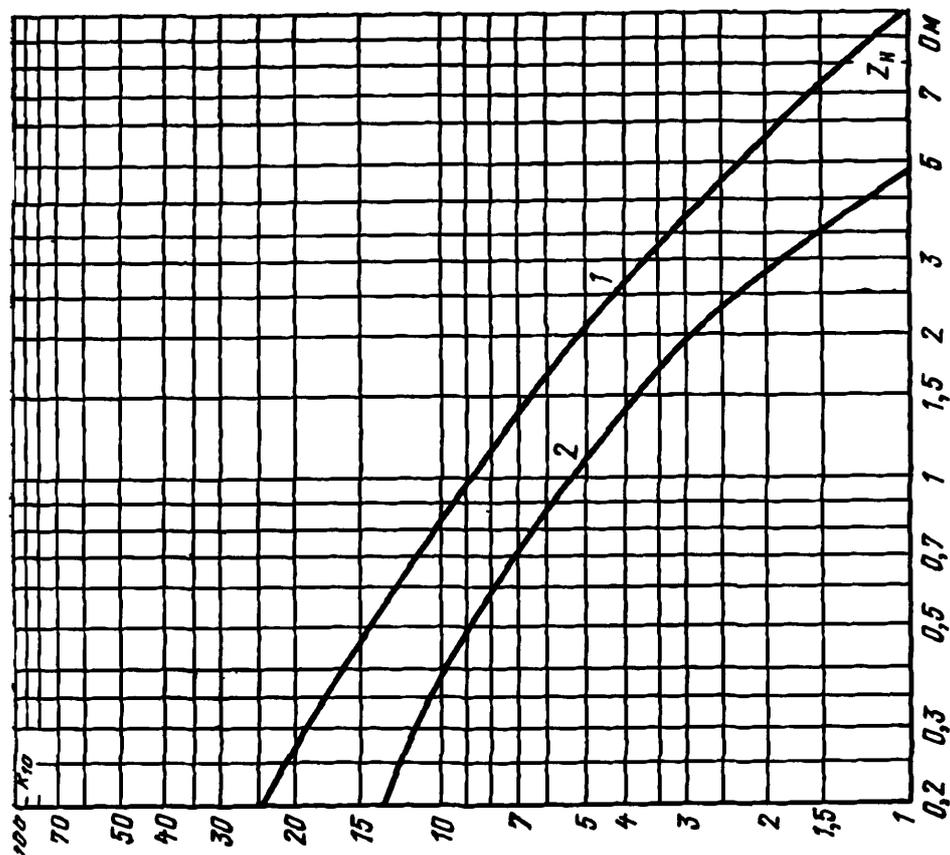


Рис. П2-3. ТПЛУ-10.

1 —  $\eta_{\text{ном}} = 5/5 + 100/5$  класса P; 2 —  $\eta_{\text{ном}} = 5/5 + 300/5$  класса 0,5.

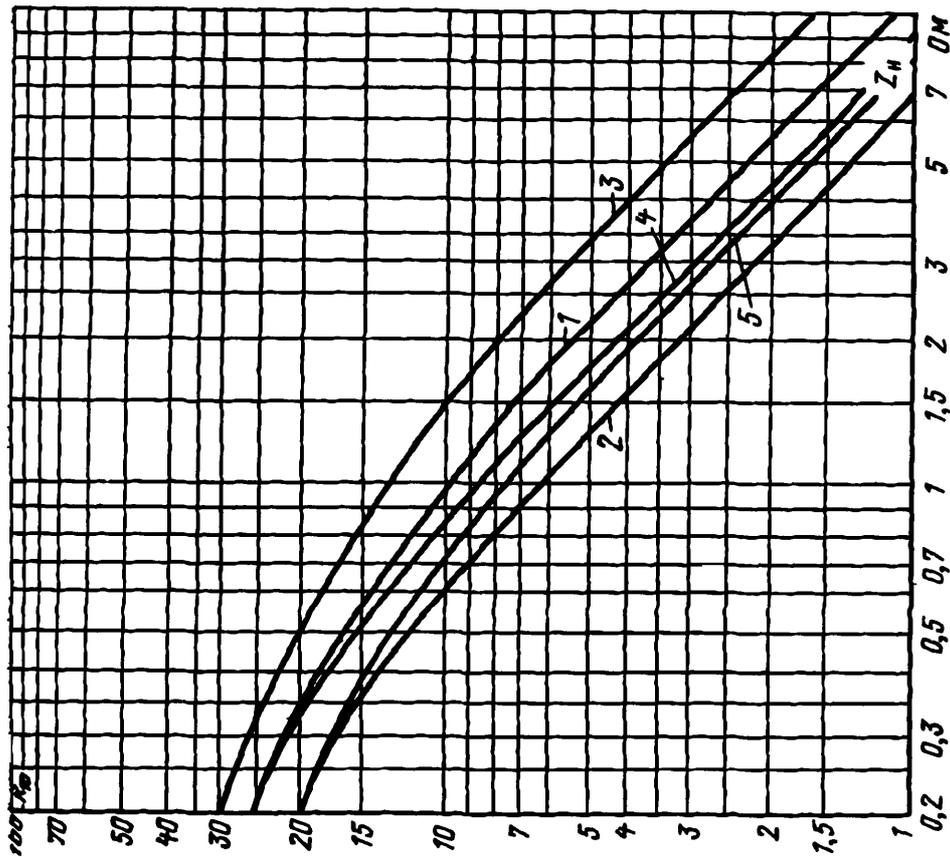


Рис. П2-4. ТПОЛ-10.

1 —  $\eta_{\text{ном}} = 600/5$  класса P,  $\eta_{\text{ном}} = 1000/5$  класса P,  $\eta_{\text{ном}} = 1500/5$  класса 0,5; 2 —  $\eta_{\text{ном}} = 600/5$  класса 0,5; 3 —  $\eta_{\text{ном}} = 800/5$  класса P,  $\eta_{\text{ном}} = 1500/5$  класса P; 4 —  $\eta_{\text{ном}} = 800/5$  класса 0,5; 5 —  $\eta_{\text{ном}} = 1000/5$  класса 0,5.

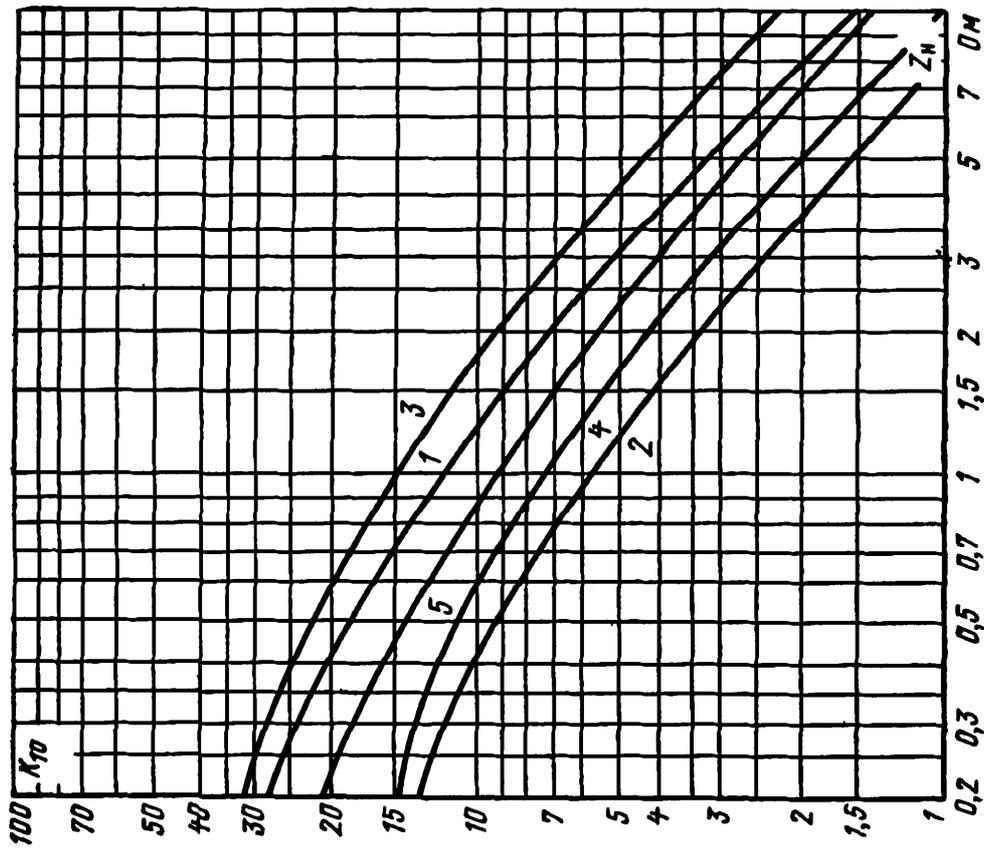


Рис. 12-6

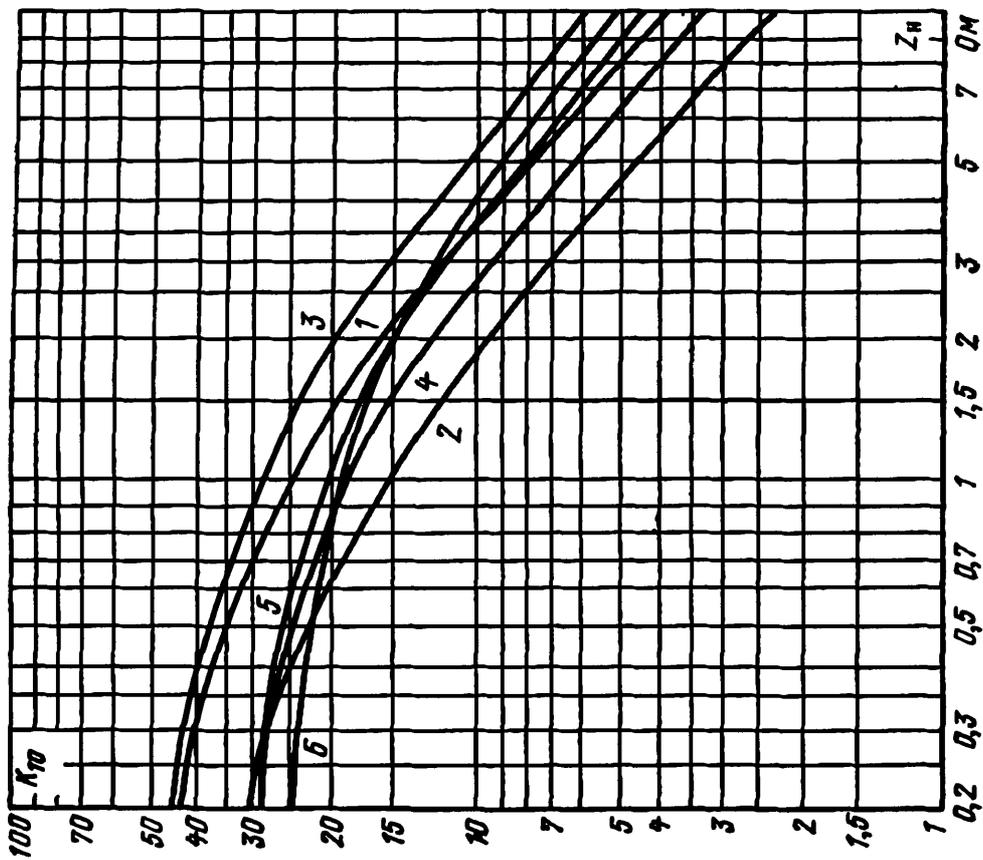


Рис. 12-5

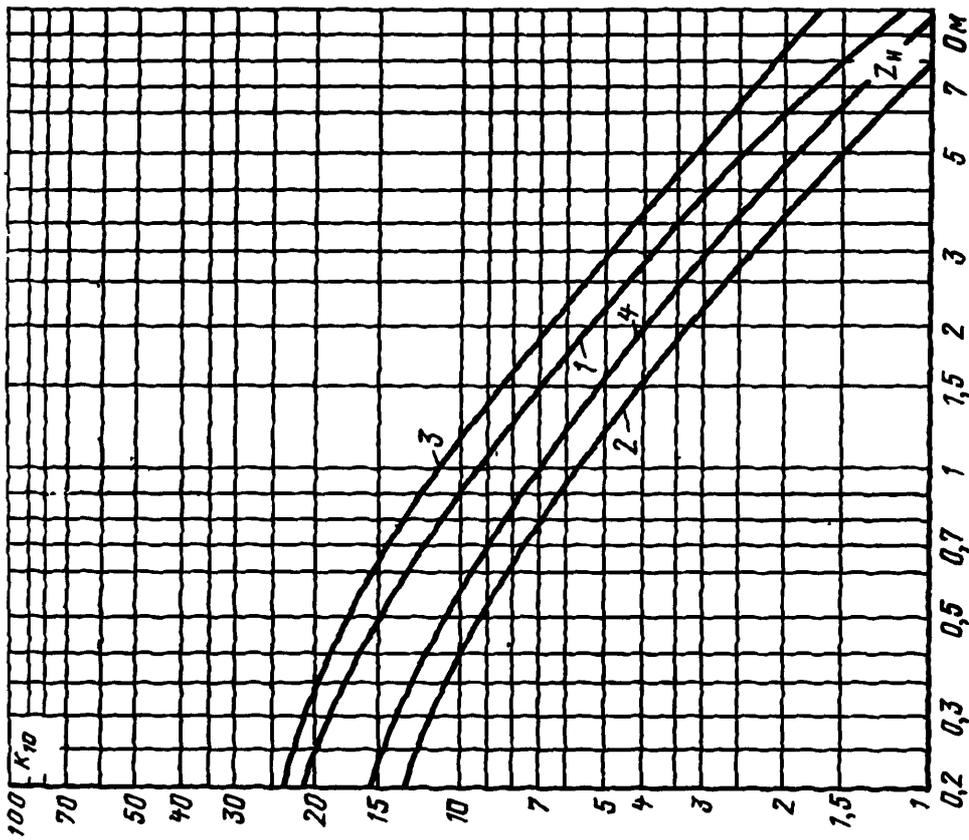


Рис. П2-7.

Рис. П2-5. ТПШЛ-10.

1 —  $\lambda_{ном} = 2000/5$  класса Р; 2 —  $\lambda_{ном} = 2000/5$  класса 0,5; 3 —  $\lambda_{ном} = 3000/5$  класса Р; 4 —  $\lambda_{ном} = 3000/5$  класса 0,5; 5 —  $\lambda_{ном} = 4000/5$  класса Р; 6 —  $\lambda_{ном} = 5000/5$  класса Р.

Рис. П2-6. ТЛМ-10, ТВЛМ-10, ТЛК-10 и ТЛШ-10.

1 —  $\lambda_{ном} = 50/5 \pm 300/5$  класса Р (ТЛМ-10),  $\lambda_{ном} = 20/5 - 300/5$  и  $600/5$  класса Р (ТВЛМ-10),  $\lambda_{ном} = 1000/5$  класса Р; 2 —  $\lambda_{ном} = 50/5 \pm 300/5$  класса 0,5 (ТЛМ-10),  $\lambda_{ном} = 20/5 \pm 300/5$  и  $600/5$  класса 0,5 (ТВЛМ-10); 3 —  $\lambda_{ном} = 400/5 \pm 800/5$  класса Р,  $\lambda_{ном} = 1500/5$  класса Р; 4 —  $\lambda_{ном} = 400/5 \pm 800/5$  класса 0,5;  $\lambda_{ном} = 1000/5$  класса 0,5; 5 —  $\lambda_{ном} = 1500/5$  класса 0,5.

Рис. П2-7. ТПЛМ-10.

1 —  $\lambda_{ном} = 5/5 \pm 300/5$  класса Р; 2 —  $\lambda_{ном} = 5/5 \pm 300/5$  класса 0,5; 3 —  $\lambda_{ном} = 400/5$  класса Р; 4 —  $\lambda_{ном} = 400/5$  класса 0,5.

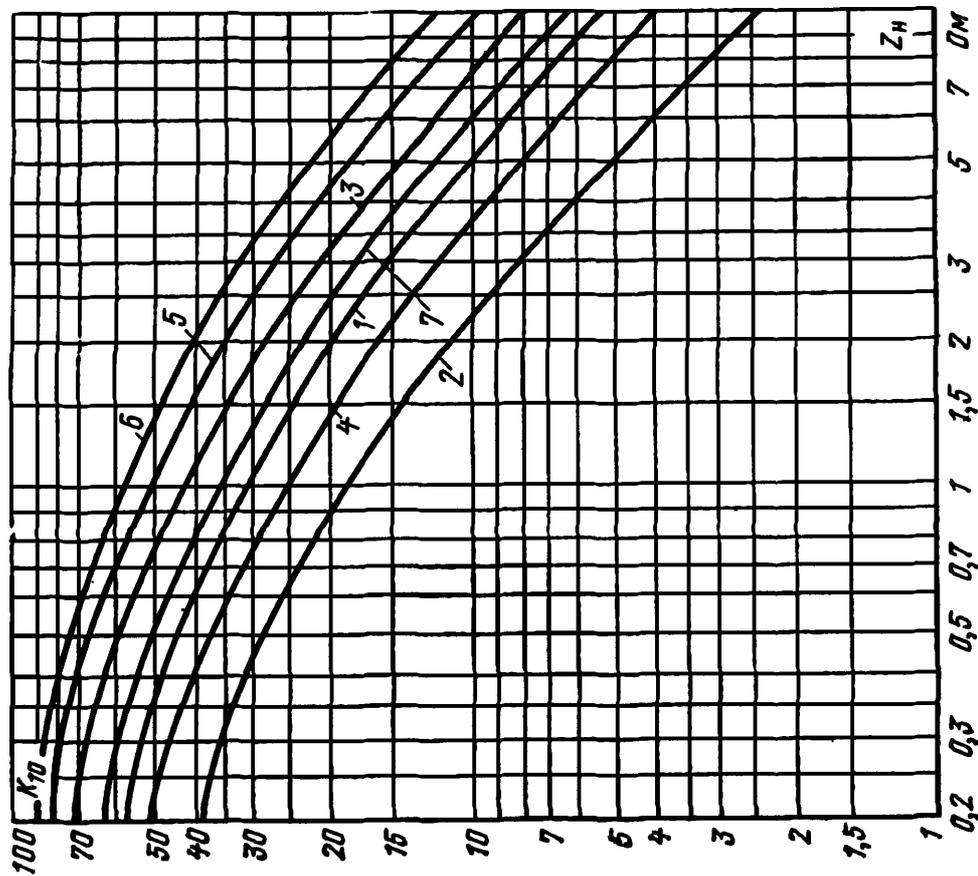


Рис. П2-8. ТШЛ-10, ТШЛ-10К.

1 -  $n_{ном} = 2000/5$  класс Р,  $n_{ном} = 4000/5$  класс 0,5; 2 -  $n_{ном} = 2000/5$  класс 0,5;  
 3 -  $n_{ном} = 3000/5$  класс Р; 4 -  $n_{ном} = 3000/5$  класс 0,5; 5 -  $n_{ном} = 4000/5$  класс Р;  
 6 -  $n_{ном} = 5000/5$  класс Р; 7 -  $n_{ном} = 5000/5$  класс 0,5

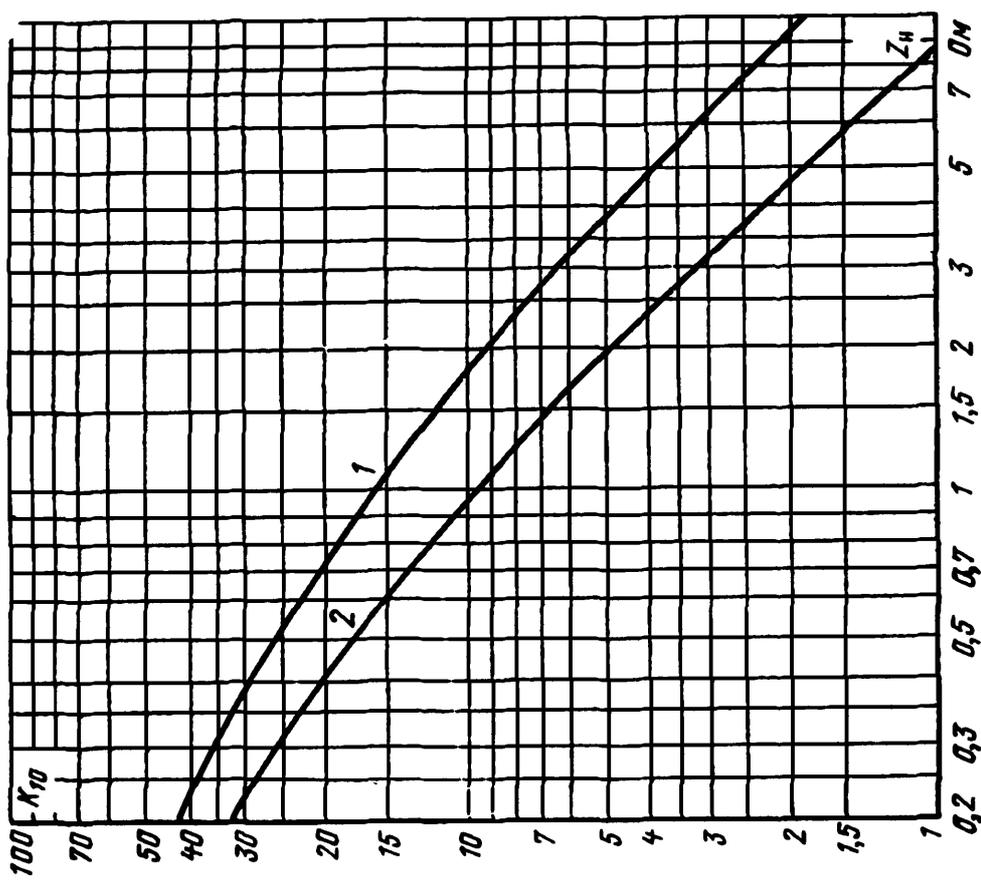


Рис. П2-9. ТШЛП-10.

1 -  $n_{ном} = 1000/5$  класса Р; 2 -  $n_{ном} = 1000/5$  класса 0,5.

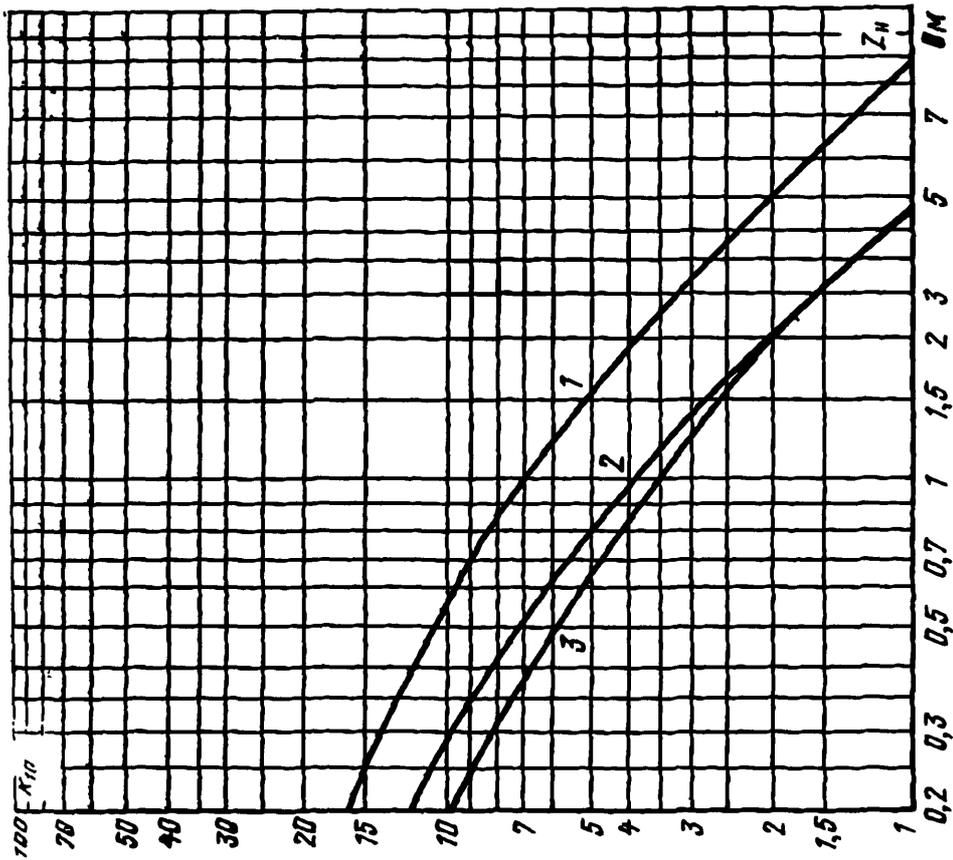


Рис. П2-11. ТПФМ-10.

1 — все  $\eta_{НОМ}$  класса 0,5; 1; 2 — все  $\eta_{НОМ}$ , кроме 400/5, класса 3; 3 —  $\eta_{НОМ} = 400/5$  класса 3.

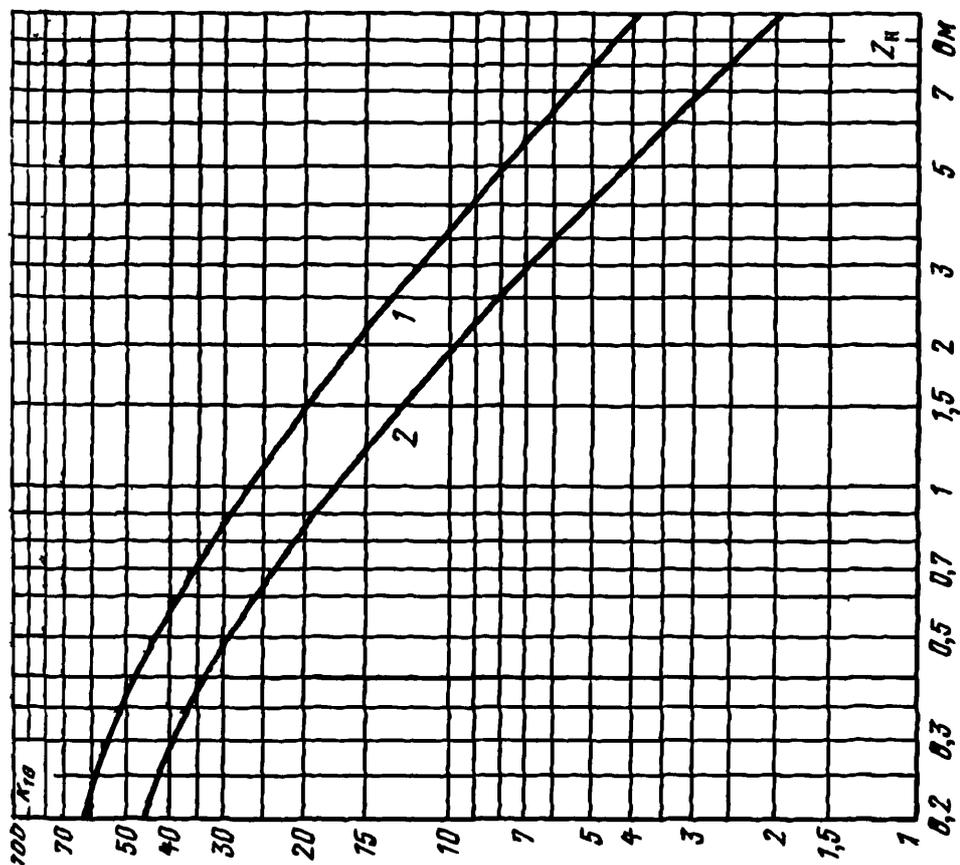


Рис. П2-10. ТШЛП-10К.

1 —  $\eta_{НОМ} = 2000/5$  класса P; 2 —  $\eta_{НОМ} = 2000/5$  класса 0,5.

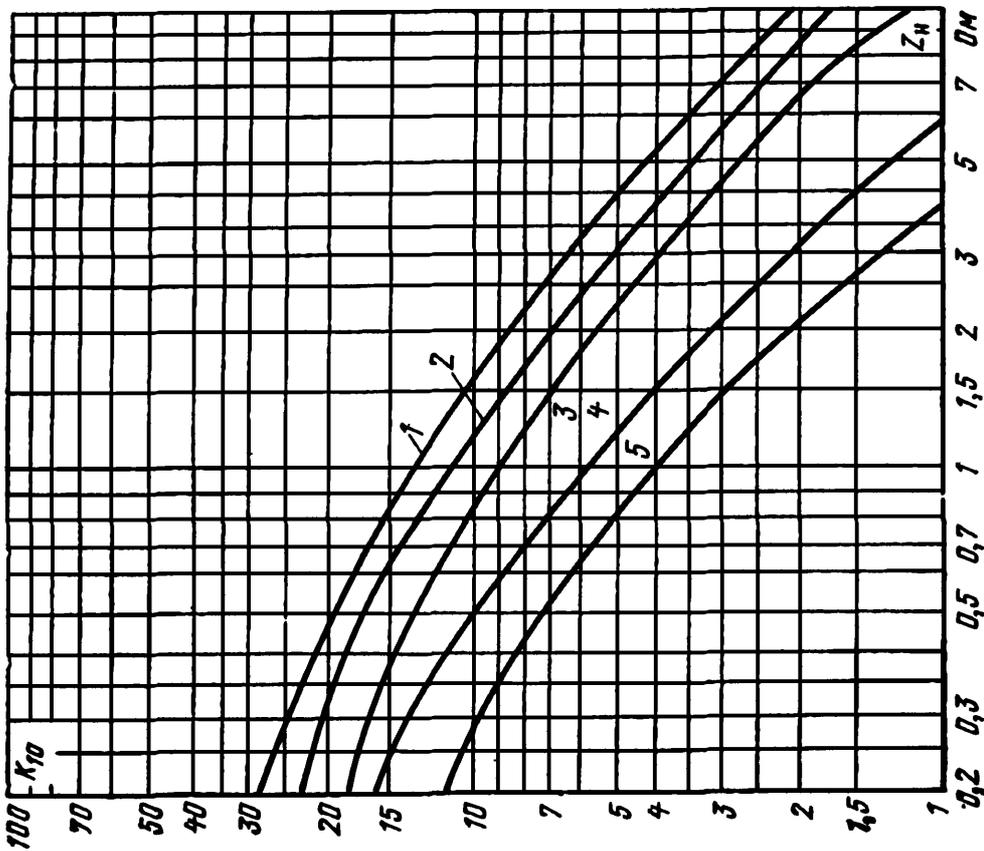


Рис. П2-12. ТПФМУД-10.

1 -  $n_{\text{ном}} = 75/5$  - 100/5, 150/5 класс Д; 2 -  $n_{\text{ном}} = 200/5$ , 300/5 класс Д;  
 3 -  $n_{\text{ном}} = 400/5$  класс Д; 4 - все  $n_{\text{ном}}$  кроме 400/5, класс 0,5 и 1;  
 5 - все  $n_{\text{ном}}$  кроме 400/5, класс 3.

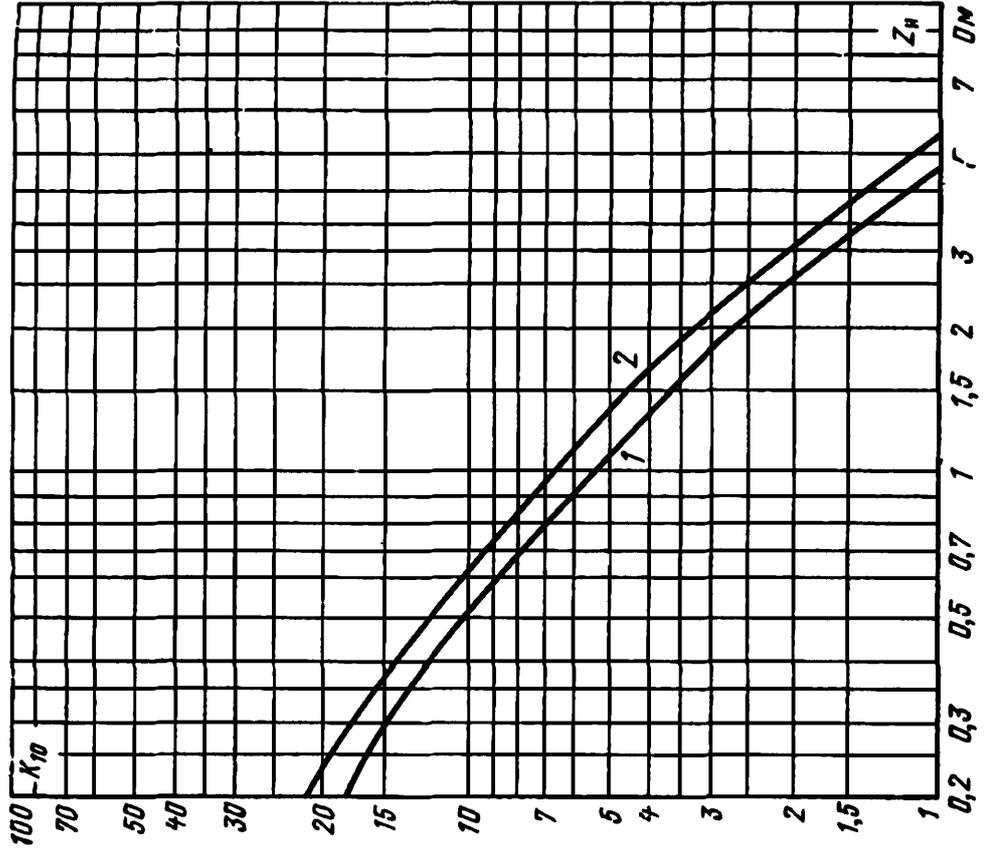


Рис. П2-13. ТПФМУ-10.

1 -  $n_{\text{ном}} = 5/5$ , 40/5, 200/5; 2 -  $n_{\text{ном}} = 50/5 \div 100/5$ , 150/5.

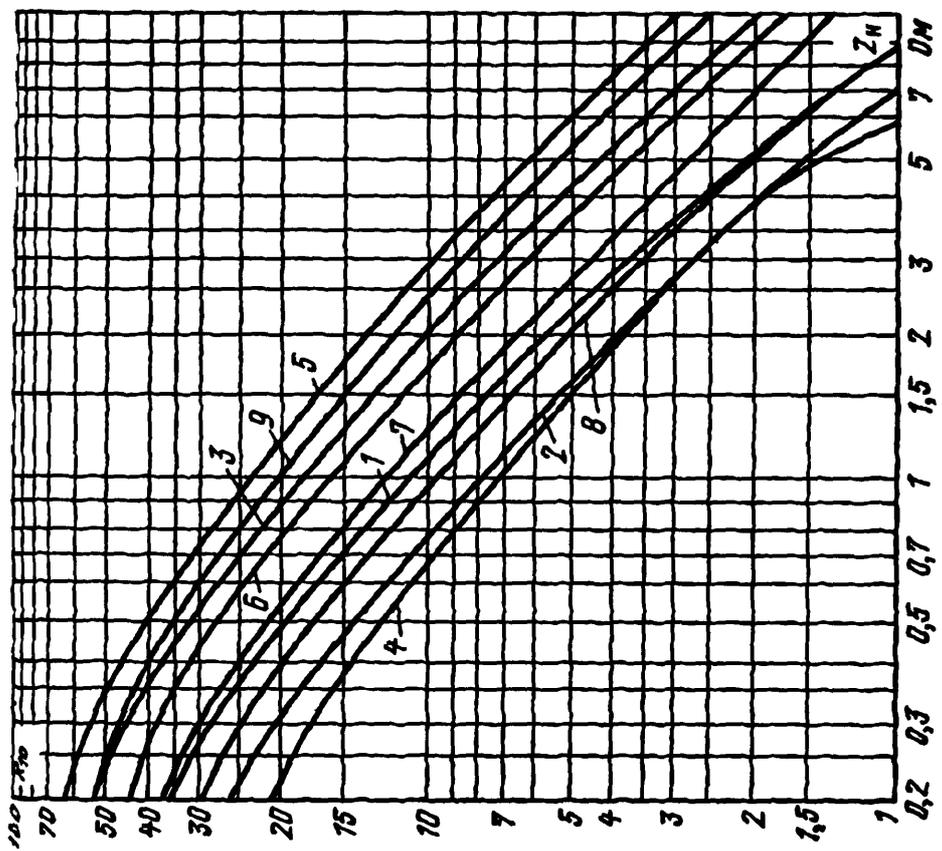


Рис. П2-14. ТПОФ-10, ТПОФУ-10.

- 1 —  $\mu_{\text{ном}} = 400/5$  класса 1; 2 —  $\mu_{\text{ном}} = 400/5$  класса 3; 3 —  $\mu_{\text{ном}} = 600/5$  класса Д; 0,5; 4 —  $\mu_{\text{ном}} = 600/5$ , 1000/5 класса 3; 5 —  $\mu_{\text{ном}} = 800/5$  класса Д; 6 —  $\mu_{\text{ном}} = 800/5$ ; 1500/5 класса 0,5; 7 —  $\mu_{\text{ном}} = 800/5$  класса 1 и 1500/5 класса 3; 8 —  $\mu_{\text{ном}} = 800/5$  класса 3 и 1000/5 класса 0,5 и 1; 9 —  $\mu_{\text{ном}} = 1000/5$ , 1500/5 класса Д.

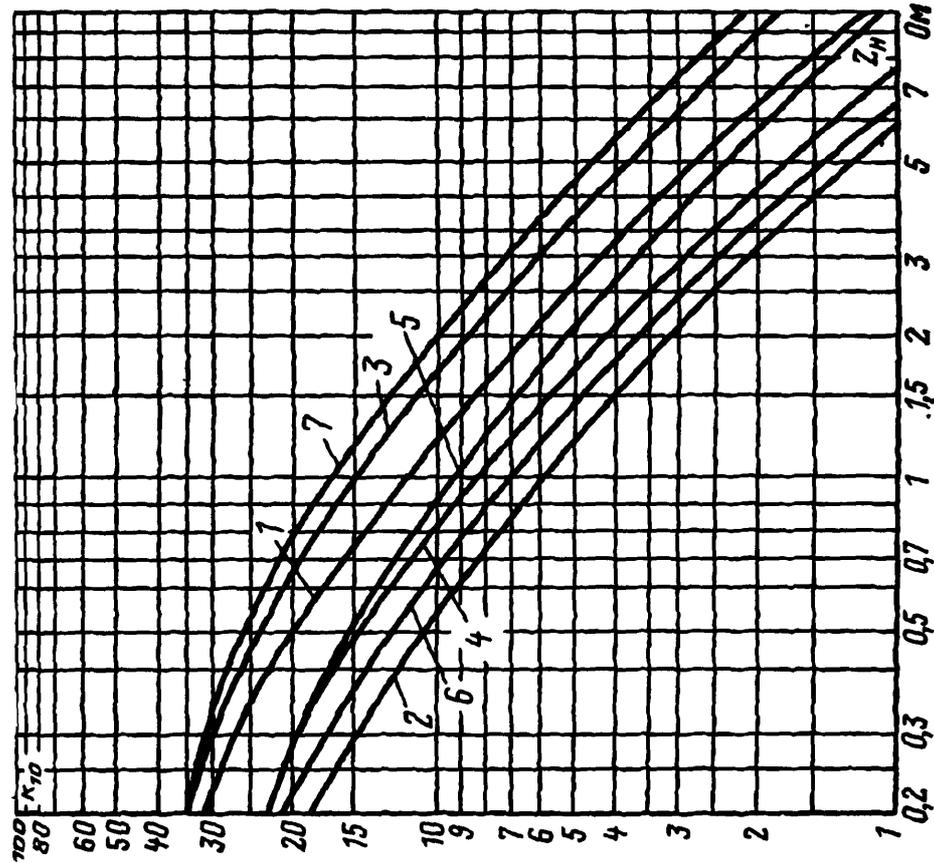


Рис. П2-15. ТОЛ-10.

- 1 —  $\mu_{\text{ном}} = 50/5 + 300/5$ ; 600/5; 1000/5 класса Р; 2 —  $\mu_{\text{ном}} = 50/5 + 300/5$ ; 600/5 класса 0,5; 3 —  $\mu_{\text{ном}} = 400/5$ , 700/5 класса Р; 4 —  $\mu_{\text{ном}} = 400/5$  класса 0,5; 5 —  $\mu_{\text{ном}} = 700/5$ ; 1500/5 класса 0,5; 6 —  $\mu_{\text{ном}} = 1000/5$  класса 0,5; 7 —  $\mu_{\text{ном}} = 1500/5$  класса Р.

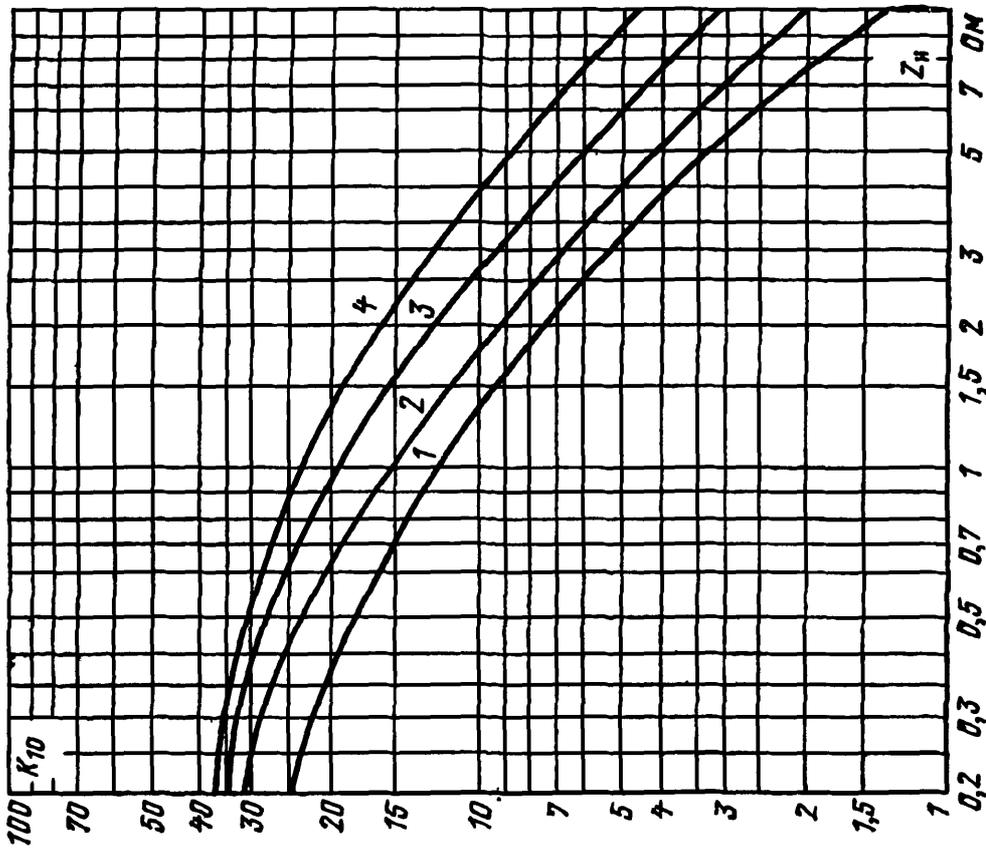


Рис. П2-16. ТВТ-10/30, ТВ-10/20.

1 -  $P_{ном} = 800/5$ ; 2 -  $P_{ном} = 1000/5$ ; 3 -  $P_{ном} = 1500/5$ ; 4 -  $P_{ном} = 2000/5$

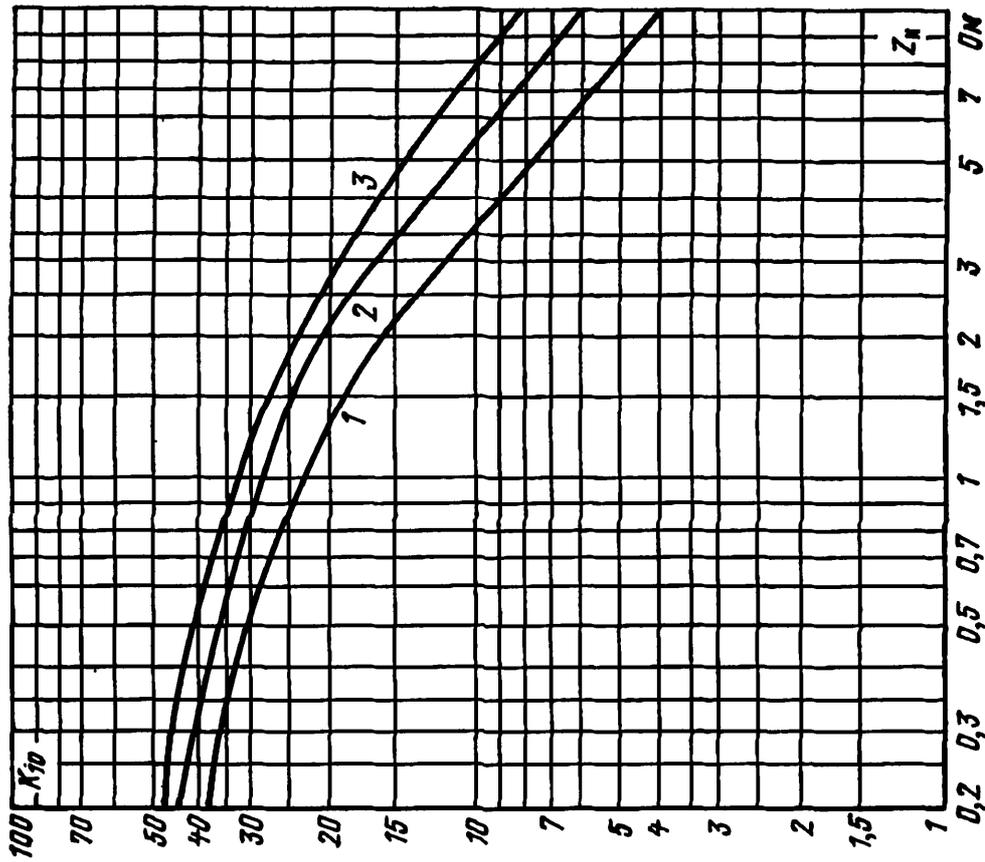


Рис. П2-17. ТВТ-10/30, ТВ-10/50.

1 -  $P_{ном} = 2000/5$ ; 2 -  $P_{ном} = 3000/5$ ; 3 -  $P_{ном} = 4000/5$ .

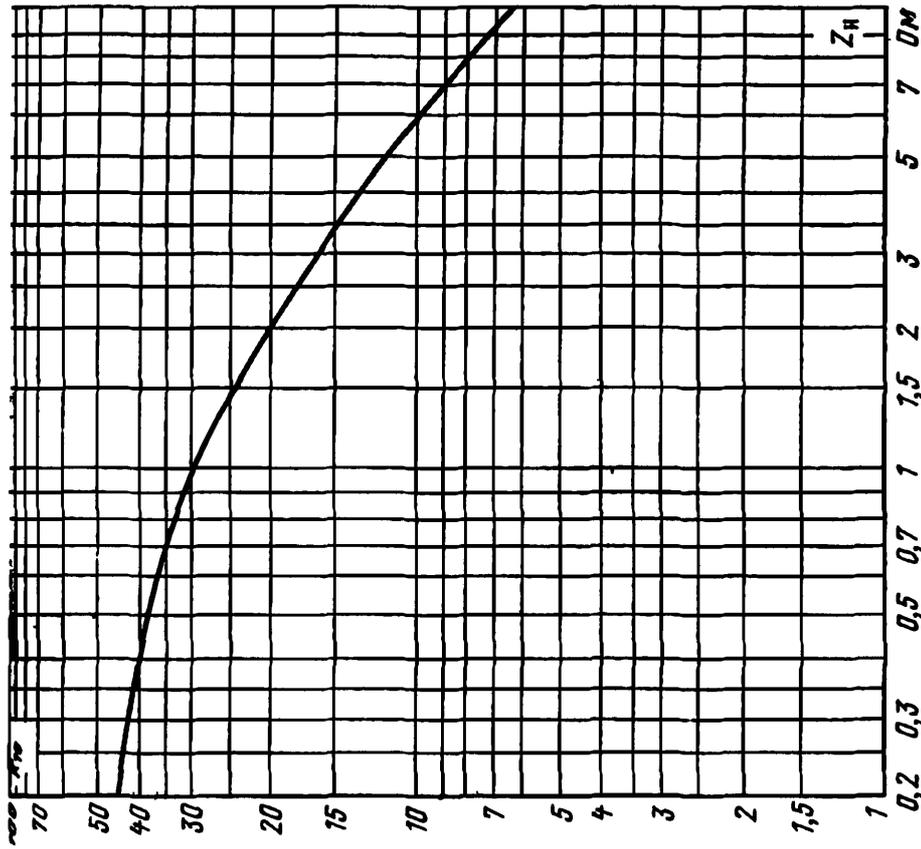


Рис. П2-19. ТВТ-10.  
 $\mu_{\text{ном}} = 5000/5, 6000/5, 12000/5.$

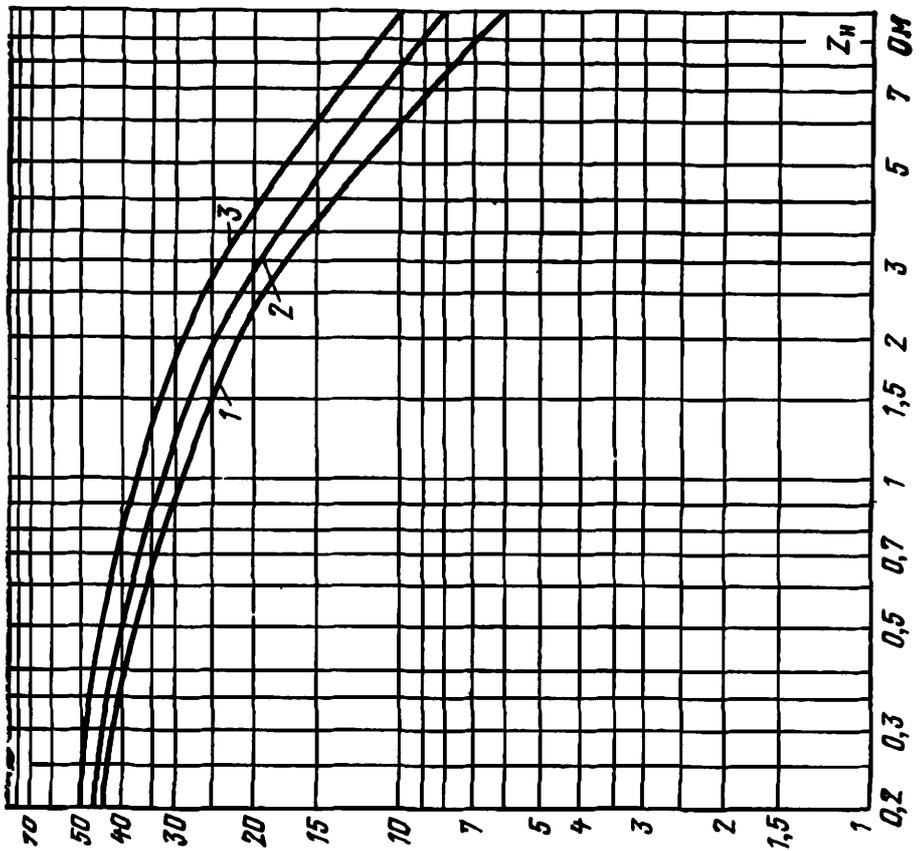


Рис. П2-18. ТВТ-10/50, ТВ-10/60.  
 $1 - \mu_{\text{ном}} = 3000/5; 2 - \mu_{\text{ном}} = 4000/5; 3 - \mu_{\text{ном}} = 5000/5.$

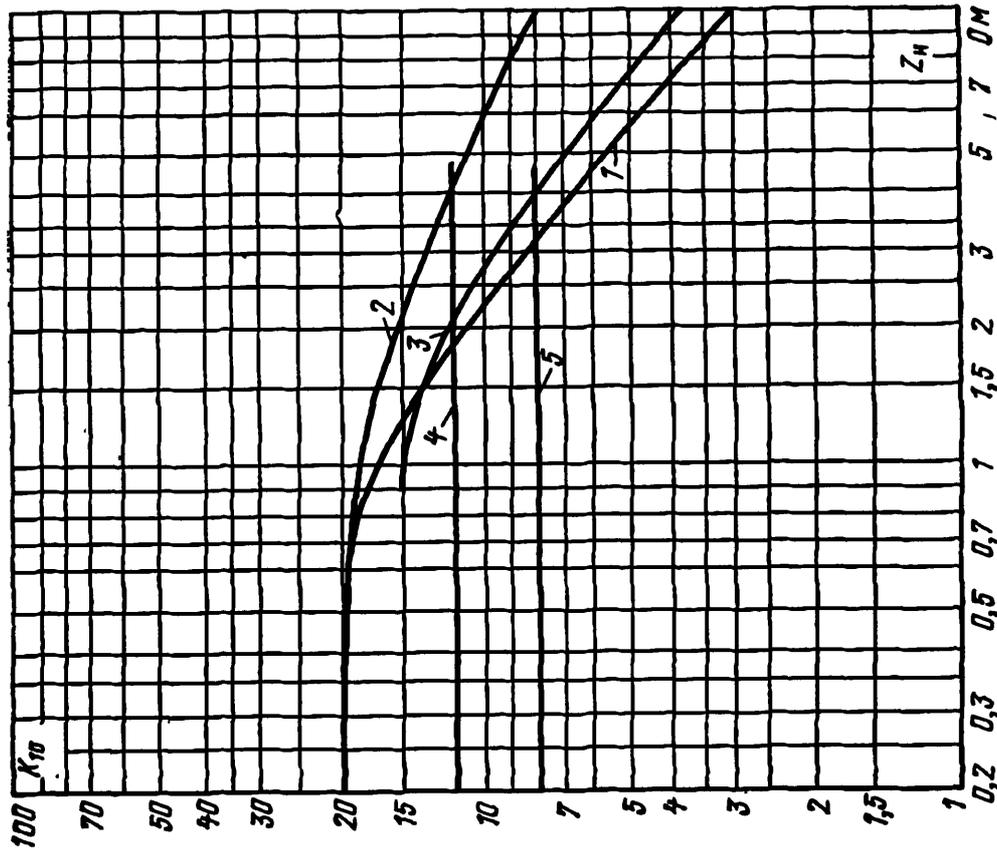


Рис. П2-21.

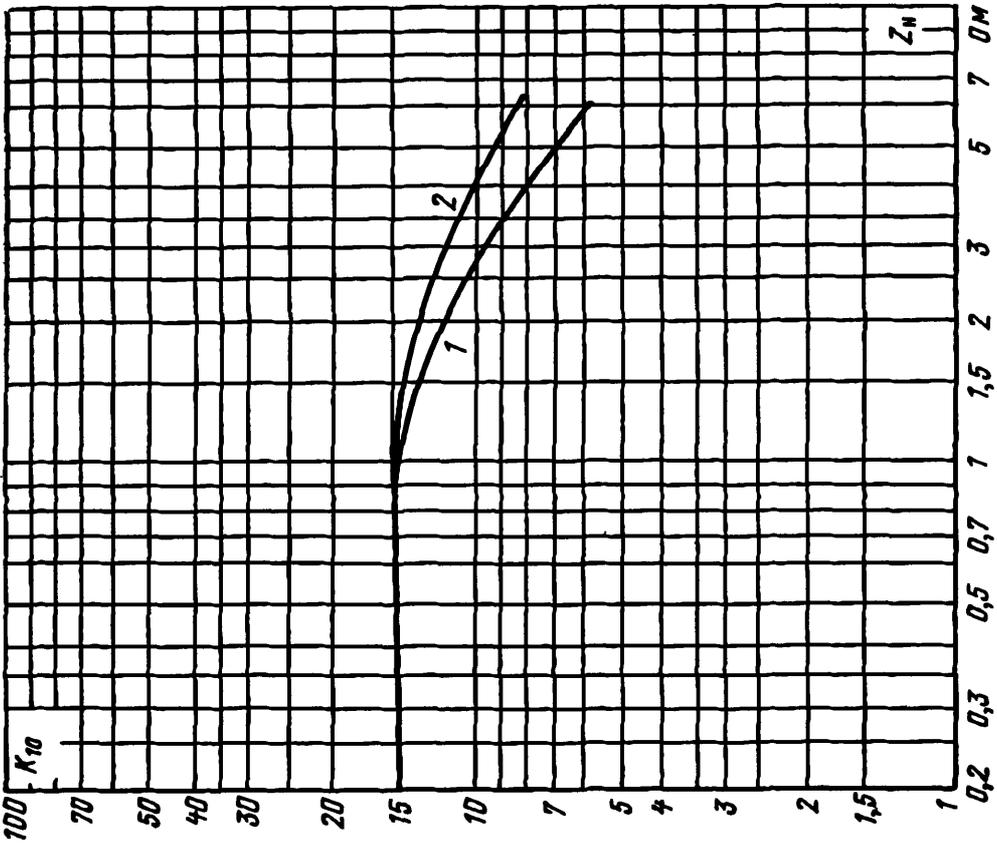


Рис. П2-20.

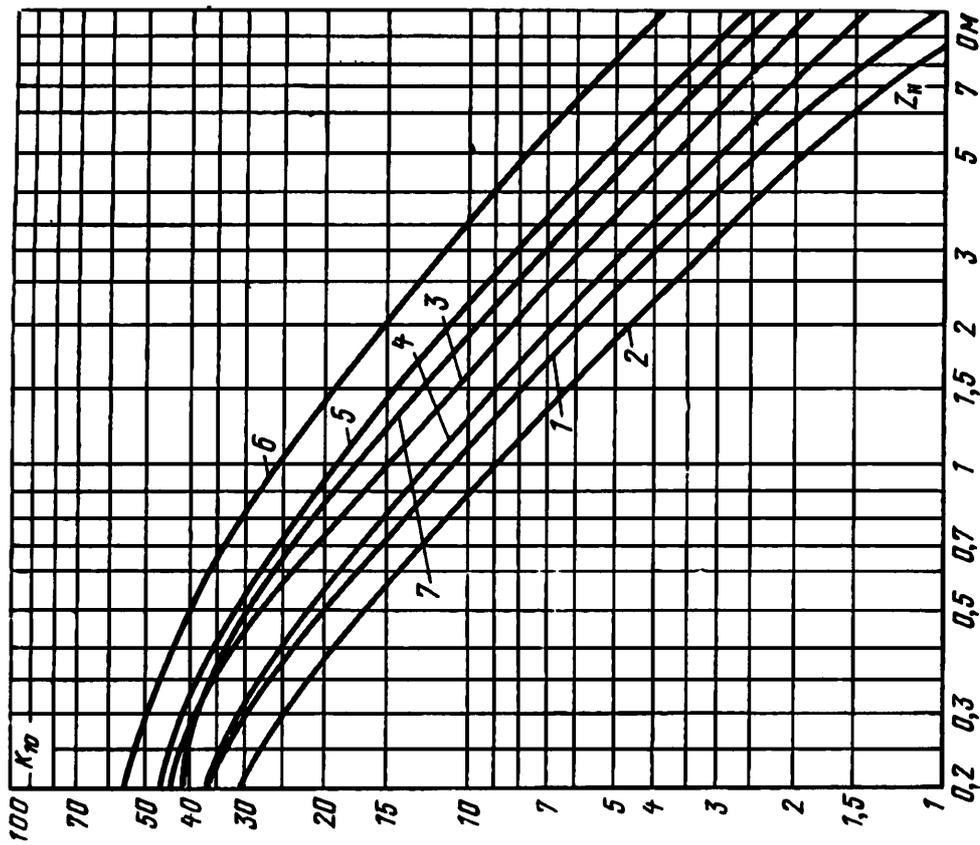


Рис. П2-22.

Рис. П2-20. ТШВ-15.

1 —  $\rho_{\text{ном}} = 6000/5$  класса Р; 2 —  $\rho_{\text{ном}} = 8000/5$  класса Р.

Рис. П2-21. ТШЛ-20-1, ТШЛ-20-11, ТШЛ-20Б-1,  
ТШЛ-20Б-11, ТШЛ-20Б-111.

1 —  $\rho_{\text{ном}} = 6000/5$  класса Р; 2 —  $\rho_{\text{ном}} = 8000/5$  класса Р; 3 —  $\rho_{\text{ном}} = 10\ 000/5$  класса Р; 4 —  $\rho_{\text{ном}} = 12\ 000/5$  класса Р; 5 —  $\rho_{\text{ном}} = 18\ 000/5$  класса Р.

Рис. П2-22. ТПОЛ-20, ТПОЛ-35.

1 —  $\rho_{\text{ном}} = 400/5$  класса Р; 2 —  $\rho_{\text{ном}} = 400/5$  класса 1; 3 —  $\rho_{\text{ном}} = 600/5$  класса Р;  $\rho_{\text{ном}} = 800/5$  класса 0,5; 4 —  $\rho_{\text{ном}} = 600/5, 1000/5$  класса 0,5; 5 —  $\rho_{\text{ном}} = 800/5, 1000/5$  класса Р; 6 —  $\rho_{\text{ном}} = 1500/5$  класса Р; 7 —  $\rho_{\text{ном}} = 1500/5$  класса Р.

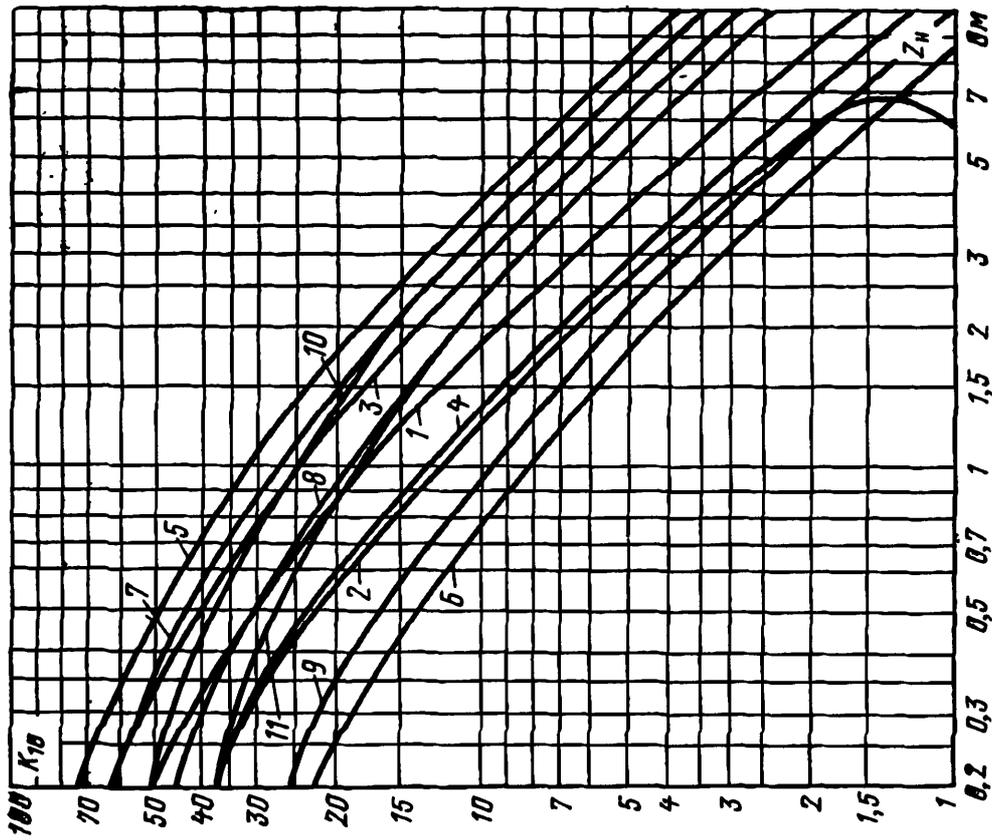


Рис. П2-24.

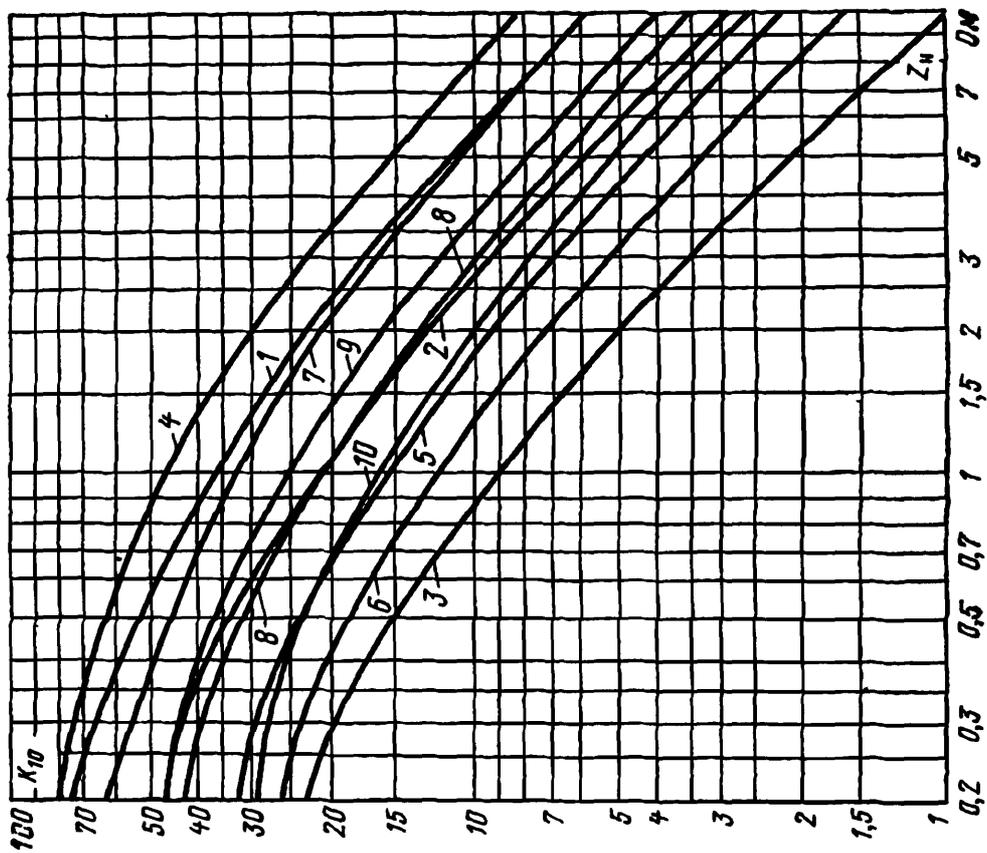


Рис. П2-23.

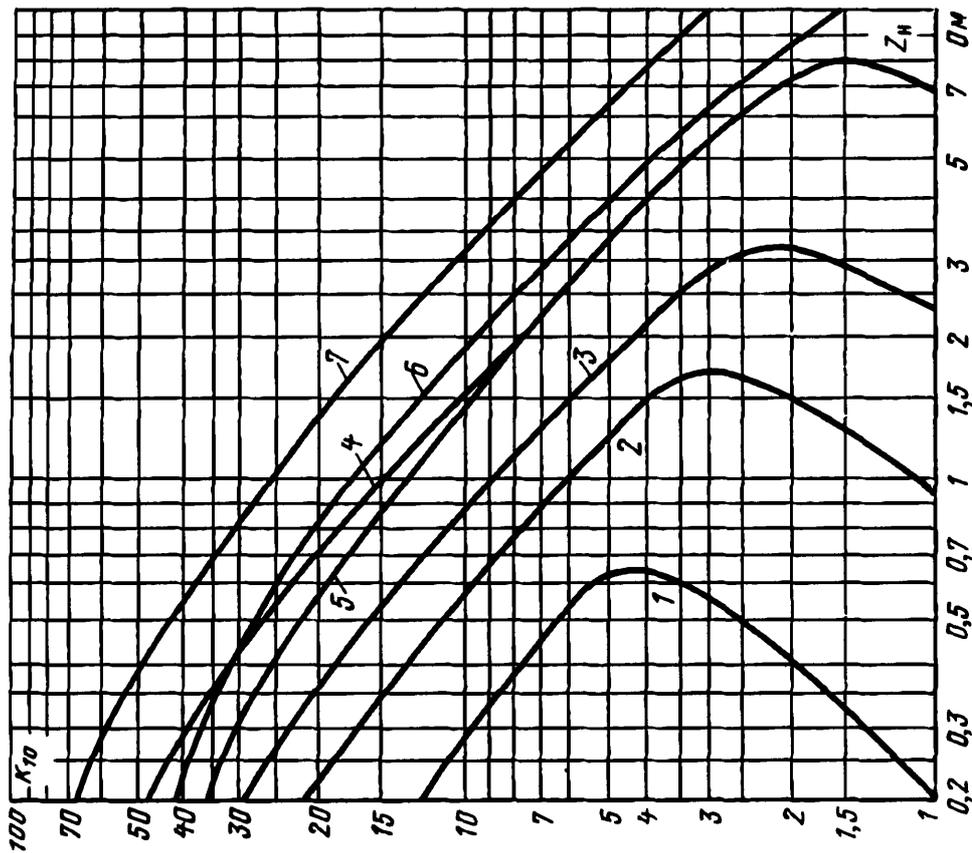


Рис. П2-23. ТПШФА-10, ТПШФА-20, ТПШФ-20.  
 1 —  $\rho_{\text{ном}}=2000/5$  класса Д; 2 —  $\rho_{\text{ном}}=2000/5$  класса 0,5; 3 —  
 $\rho_{\text{ном}}=2000/5$  класса 3; 4 —  $\rho_{\text{ном}}=3000/5$  класса Д; 5 —  $\rho_{\text{ном}}=$   
 $3000/5$  класса 0,5; 6 —  $\rho_{\text{ном}}=3000/5$  класса 3; 7 —  $\rho_{\text{ном}}=4000/5$   
 класса Д; 8 —  $\rho_{\text{ном}}=4000/5$  класса 0,5; 9 —  $\rho_{\text{ном}}=5000/5$  и 6000/5  
 класса Д,  $\rho_{\text{ном}}=5000/5$  класса 0,5; 10 —  $\rho_{\text{ном}}=6000/5$  класса 0,5.

Рис. П2-24. ТПОФ-20.

1 —  $\rho_{\text{ном}}=400/5$  классов Д и 1,0; 2 —  $\rho_{\text{ном}}=400/5$  класса 3; 3 —  
 $\rho_{\text{ном}}=600/5$  классов Д и 0,5; 4 —  $\rho_{\text{ном}}=600/5$  класса 3; 5 —  
 $\rho_{\text{ном}}=800/5$  классов Д и 0,5; 6 —  $\rho_{\text{ном}}=800/5$  класса 3;  
 7 —  $\rho_{\text{ном}}=1000/5$  класса Д; 8 —  $\rho_{\text{ном}}=1000/5$  класса 0,5; 9 —  
 $\rho_{\text{ном}}=1000/5$  класса 3; 10 —  $\rho_{\text{ном}}=1500/5$  класса Д; 11 —  $\rho_{\text{ном}}=$   
 $1500/5$  класса 0,5.

Рис. П2-25. ТМГД-35, ТМГ-35.

1 —  $\rho_{\text{ном}}=100/5$ ; 2 —  $\rho_{\text{ном}}=150/5$ ; 3 —  $\rho_{\text{ном}}=200/5$ ; 4 —  $\rho_{\text{ном}}=300/5$   
 (вариант исполнения 300/5); 5 —  $\rho_{\text{ном}}=300/5$  (вариант исполне-  
 ния 600/5); 6 —  $\rho_{\text{ном}}=400/5$ ; 7 —  $\rho_{\text{ном}}=600/5$ .

Рис. П2-25.

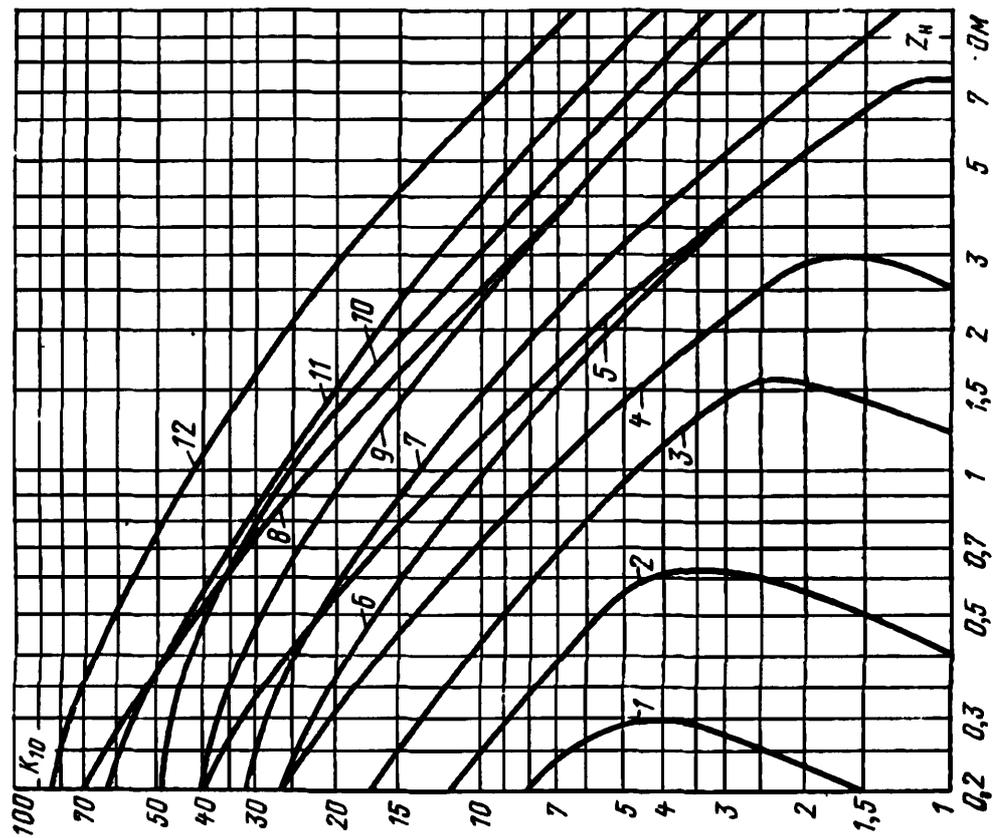


Рис. П2-27,

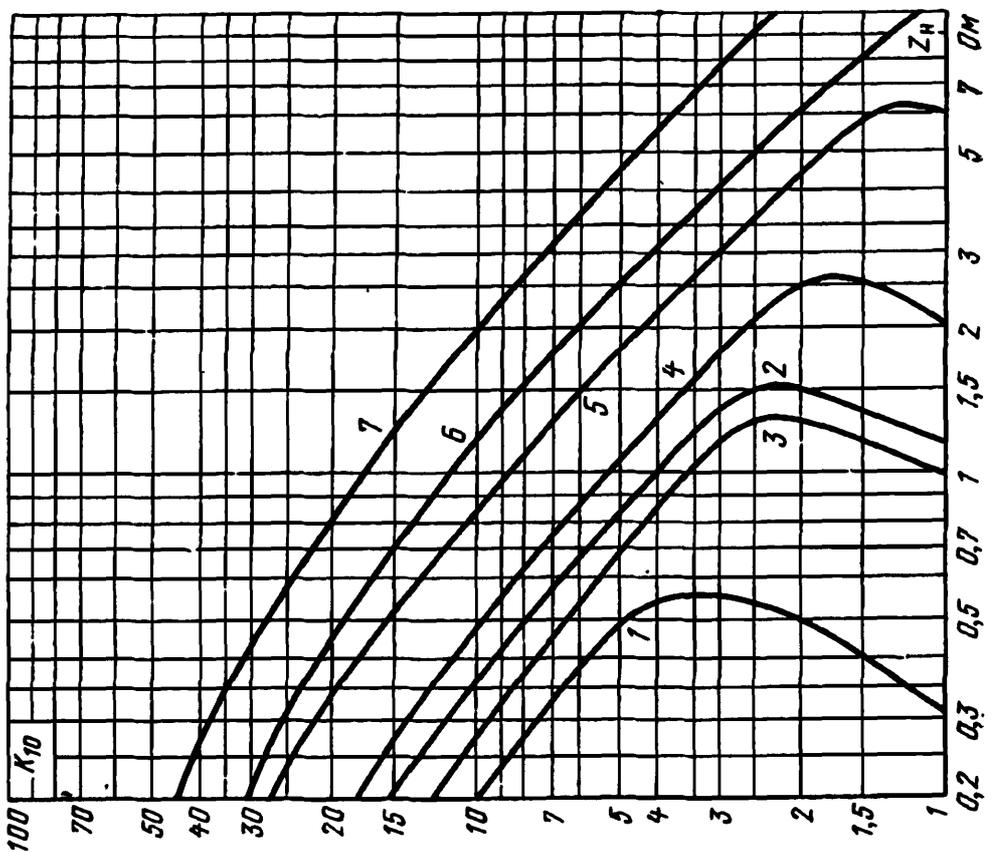


Рис. П2-26,

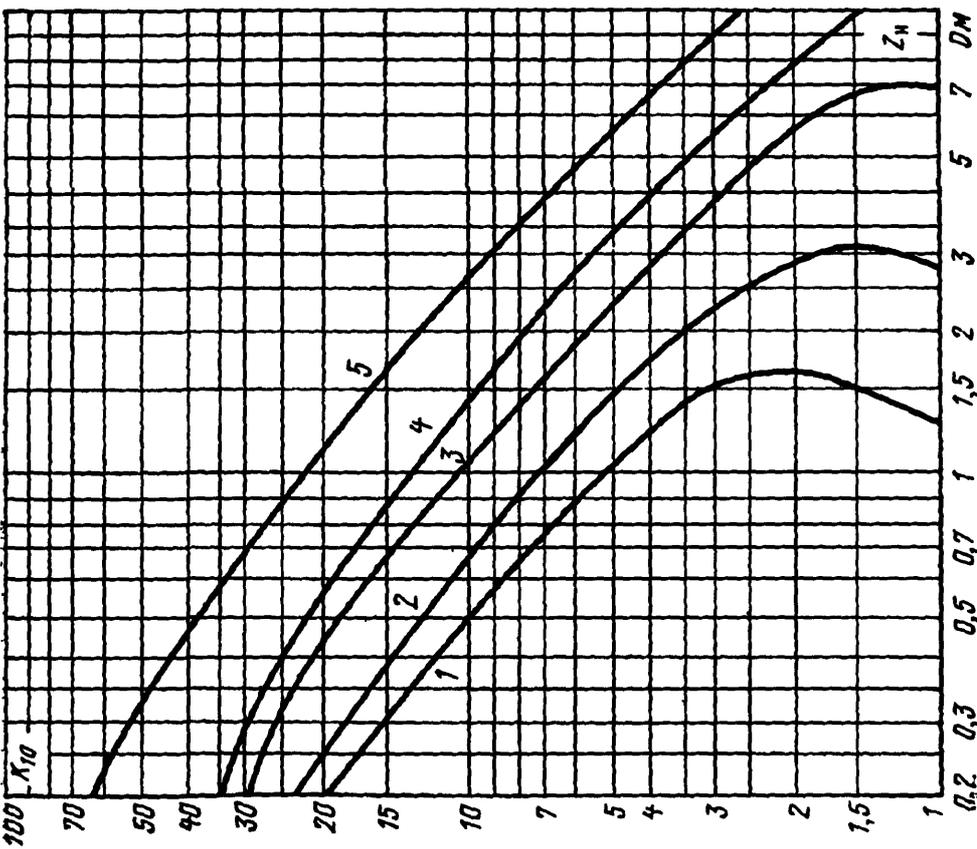


Рис. П2-26. ТДВ-35.  
 1 —  $P_{ном} = 100/5$ ; 2 —  $P_{ном} = 150/5$  (вариант исполнения 150/5);  
 3 —  $P_{ном} = 150/5$  (вариант исполнения 300/5); 4 —  $P_{ном} = 200/5$ ;  
 5 —  $P_{ном} = 300/5$ ; 6 —  $P_{ном} = 400/5$ ; 7 —  $P_{ном} = 600/5$ .

Рис. П2-27, ТВДМ-35, ТВМ-35.  
 1 —  $P_{ном} = 75/5$ ; 2 —  $P_{ном} = 100/5$ ; 3 —  $P_{ном} = 150/5$ ; 4 —  $P_{ном} = 200/5$ ;  
 5 —  $P_{ном} = 300/5$  (вариант исполнения 300/5); 6 —  $P_{ном} = 300/5$  (вариант исполнения 600/5); 7 —  $P_{ном} = 400/5$ ; 8 —  $P_{ном} = 600/5$  (вариант исполнения 600/5); 9 —  $P_{ном} = 600/5$  (вариант исполнения 1500/5); 10 —  $P_{ном} = 750/5$ ; 11 —  $P_{ном} = 1000/5$ ; 12 —  $P_{ном} = 1500/5$ .

Рис. П2-28. ТВДМ-35-1.  
 1 —  $P_{ном} = 150/5$ ; 2 —  $P_{ном} = 200/5$ ; 3 —  $P_{ном} = 300/5$ ; 4 —  $P_{ном} = 400/5$ ; 5 —  $P_{ном} = 600/5$ .

Рис. П2-28.

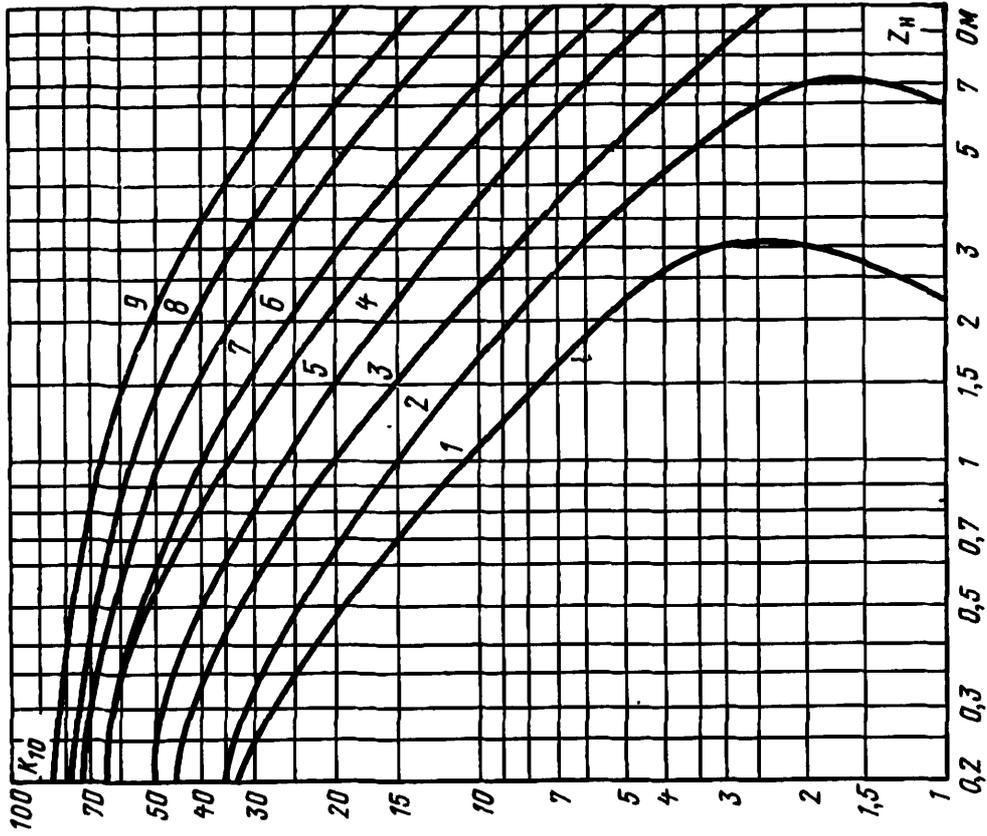


Рис. П2-30.

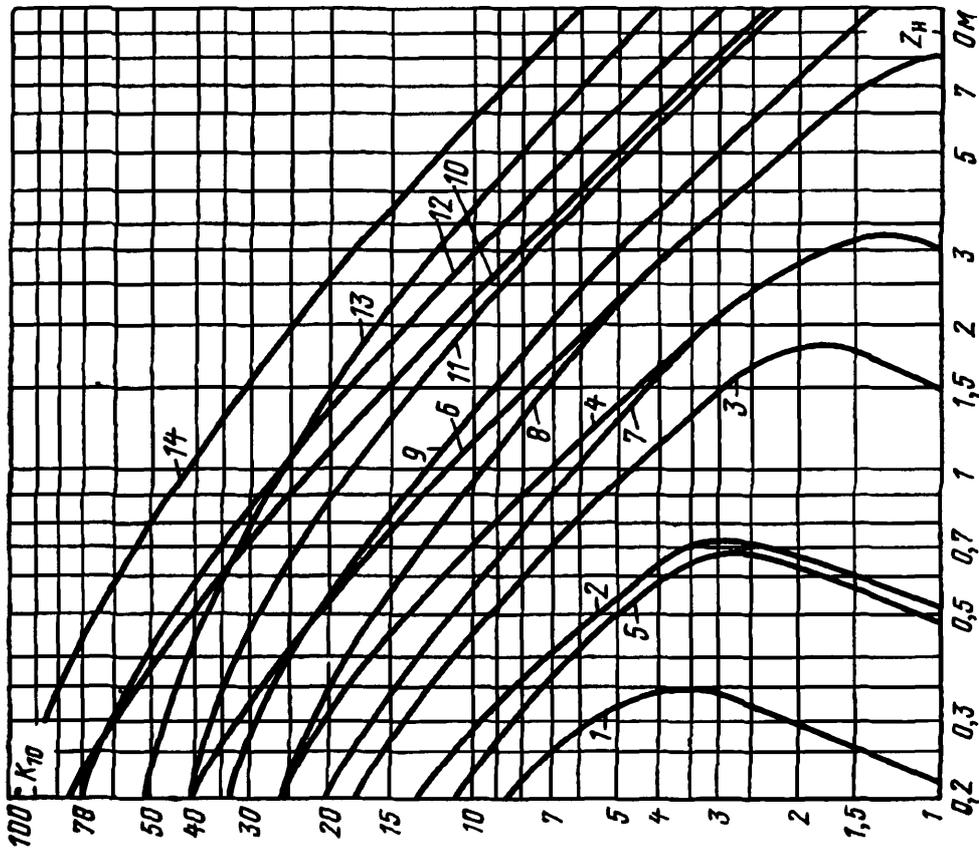


Рис. П2-29.

Рис. П2-29. ТВД-35 МКП.

1 —  $\rho_{\text{ном}} = 75/5$ ; 2 —  $\rho_{\text{ном}} = 100/5$  (вариант исполнения 200/5); 3 —  $\rho_{\text{ном}} = 150/5$ ; 4 —  $\rho_{\text{ном}} = 200/5$  (вариант исполнения 300/5); 5 —  $\rho_{\text{ном}} = 100/5$  (вариант исполнения 300/5); 6 —  $\rho_{\text{ном}} = 300/5$  (вариант исполнения 300/5); 7 —  $\rho_{\text{ном}} = 200/5$  (вариант исполнения 600/5); 8 —  $\rho_{\text{ном}} = 300/5$  (вариант исполнения 600/5); 9 —  $\rho_{\text{ном}} = 400/5$ ; 10 —  $\rho_{\text{ном}} = 600/5$  (вариант исполнения 600/5); 11 —  $\rho_{\text{ном}} = 600/5$  (вариант исполнения 1500/5); 12 —  $\rho_{\text{ном}} = 750/5$ ; 13 —  $\rho_{\text{ном}} = 1000/5$ ; 14 —  $\rho_{\text{ном}} = 1500/5$ .

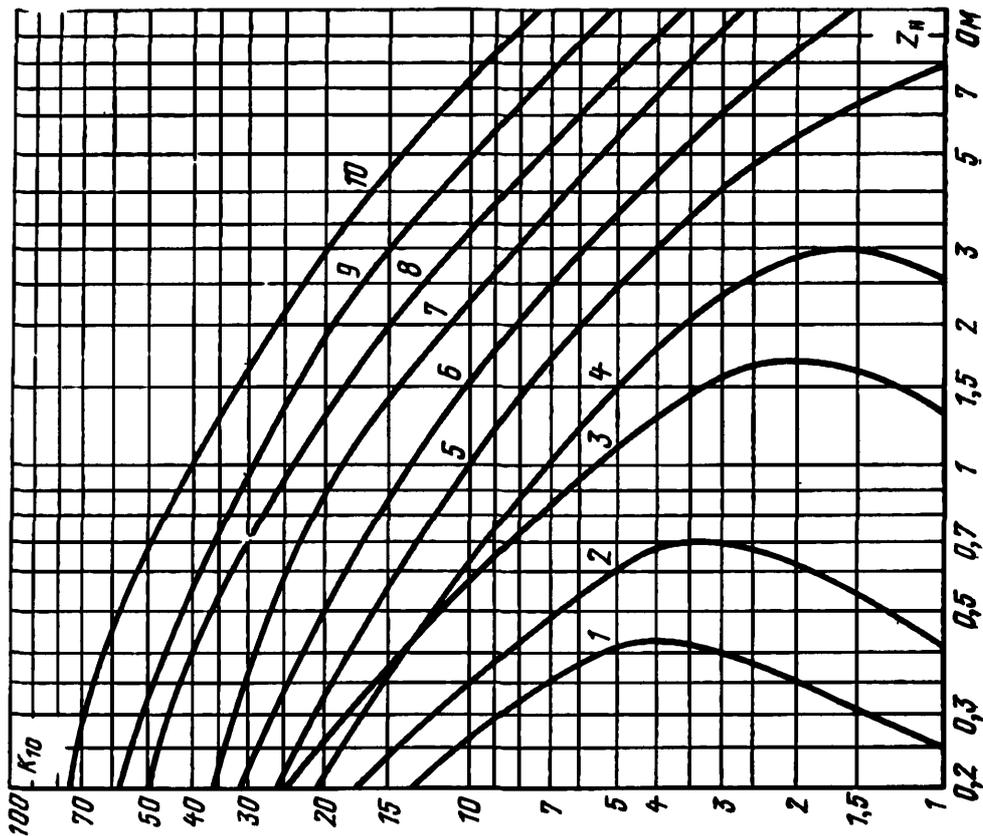


Рис. П2-31.

Рис. П2-30. ТВТ-35М.

1 —  $\rho_{\text{ном}} = 200/5$ ; 2 —  $\rho_{\text{ном}} = 300/5$ ; 3 —  $\rho_{\text{ном}} = 400/5$ ; 4 —  $\rho_{\text{ном}} = 600/5$ ; 5 —  $\rho_{\text{ном}} = 750/5$ ; 6 —  $\rho_{\text{ном}} = 1000/5$ ; 7 —  $\rho_{\text{ном}} = 1500/5$ ; 8 —  $\rho_{\text{ном}} = 2000/5$ ; 9 —  $\rho_{\text{ном}} = 3000/5$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{н}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-31. ТВ-35/10, ТВ-35/25.

1 —  $\rho_{\text{ном}} = 75/5$ ; 2 —  $\rho_{\text{ном}} = 100/5$ ; 3 —  $\rho_{\text{ном}} = 150/5$ ; 4 —  $\rho_{\text{ном}} = 200/5$ ; 5 —  $\rho_{\text{ном}} = 300/5$ ; 6 —  $\rho_{\text{ном}} = 400/5$ ; 7 —  $\rho_{\text{ном}} = 600/5$ ; 8 —  $\rho_{\text{ном}} = 750/5$  ТВ-35/25; 9 —  $\rho_{\text{ном}} = 1000/5$  ТВ-35/25; 10 —  $\rho_{\text{ном}} = 1500/5$  ТВ-35/25.

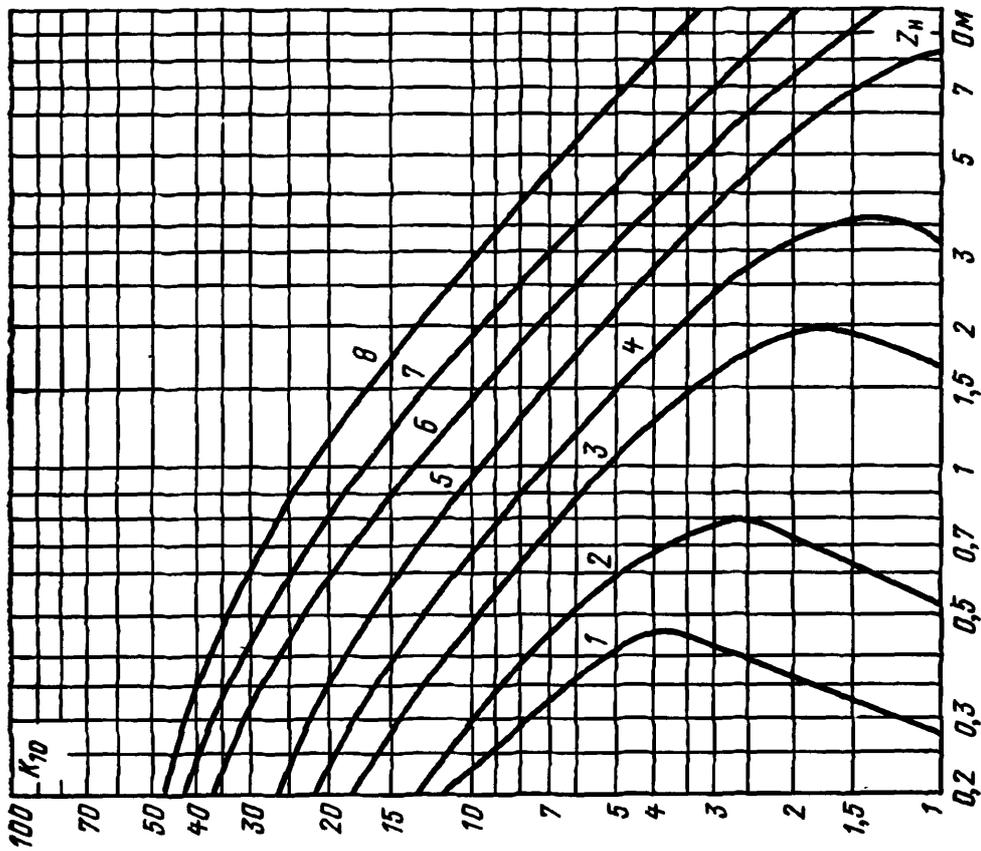


Рис. П2-32. ТВТ-35/10.

1 —  $P_{ном} = 150/5$ ; 2 —  $P_{ном} = 200/5$ ; 3 —  $P_{ном} = 300/5$ ; 4 —  $P_{ном} = 400/5$ ; 5 —  $P_{ном} = 600/5$ ; 6 —  $P_{ном} = 750/5$ ; 7 —  $P_{ном} = 1000/5$ ; 8 —  $P_{ном} = 1500/5$ .

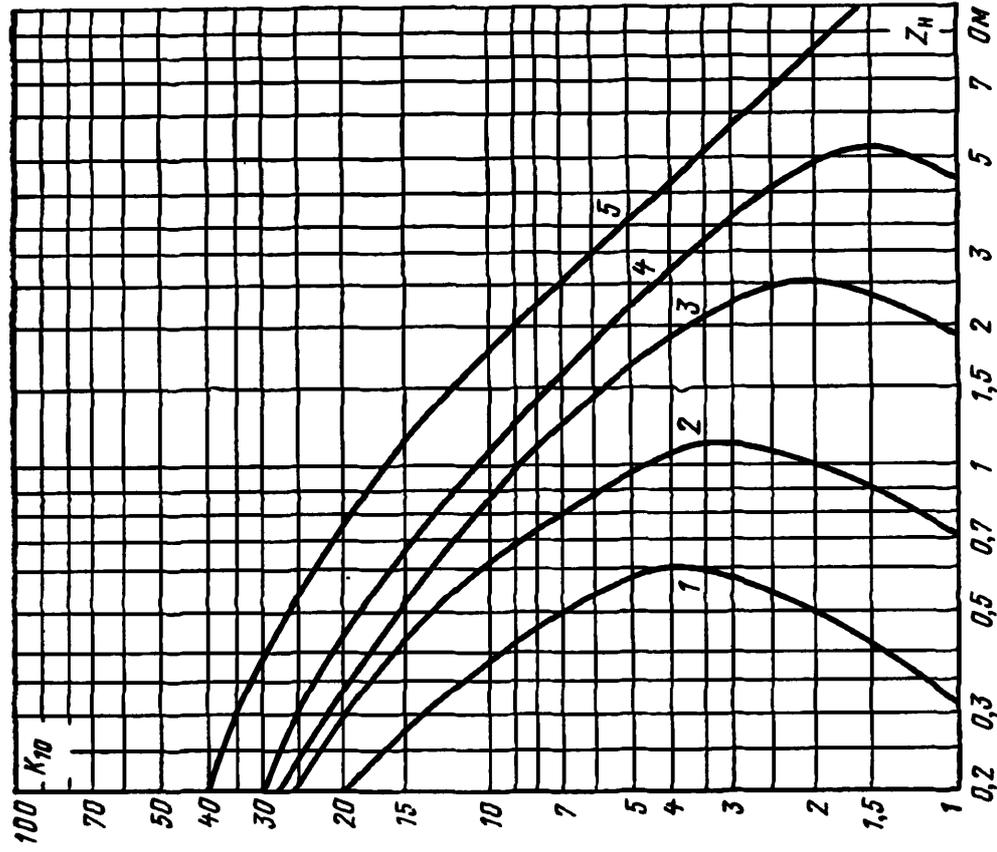


Рис. П2-33. ТВС-35/6,3 (исполнения 150 и 300 А).

1 —  $P_{ном} = 75/5$ ; 2 —  $P_{ном} = 100/5$ ; 3 —  $P_{ном} = 150/5$ ; 4 —  $P_{ном} = 200/5$ ; 5 —  $P_{ном} = 300/5$ .

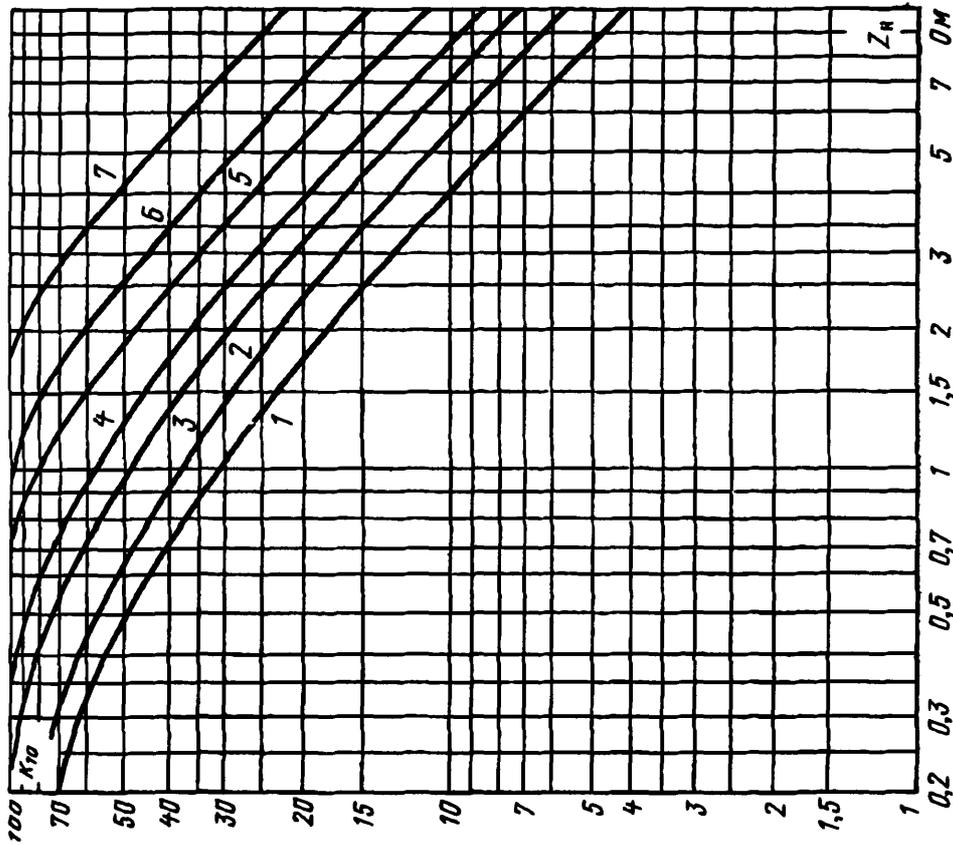


Рис. П2-34. ТВС-35/50.

1 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 800/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$ ; 4 —  $I_{\text{ном}} = 1200/5$ ; 5 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$ ; 6 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$ ; 7 —  $I_{\text{ном}} = 3000/5$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{в}}$  умножаются на 25.

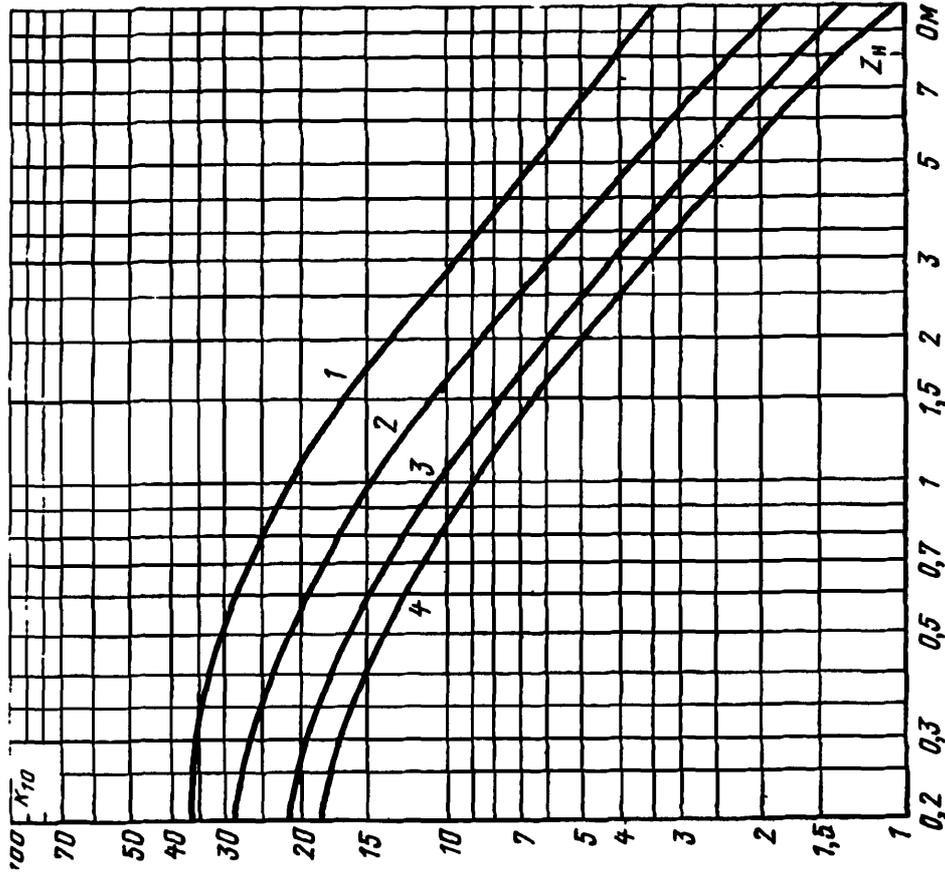


Рис. П2-35. ТФНД-33Т.

1 —  $I_{\text{ном}} = 100/5 + 1200/5$  класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 2 —  $I_{\text{ном}} = 100/5 + 1200/5$  класса 0,5 при первичном токе, соответствующем варианту исполнения; 3 — обмотки класса 0,5 на ответвлениях 75, 150 и 300 А; 4 — обмотки класса 0,5 на ответвлениях 100, 200, 400 и 800 А.

Рис. П2-36. ТФНД-35М.

1 —  $I_{\text{ном}} = 15/5 \div 600/5$  класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 2 —  $I_{\text{ном}} = 15/5 \div 600/5$  класса 0,5; 3 —  $I_{\text{ном}} = 800/5$ ; 1000/5, 2000/5 класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 4 —  $I_{\text{ном}} = 800/5$  класса 0,5; 5 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$ , 2000/5 класса 0,5; 6 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$  класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 7 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$  класса 0,5.

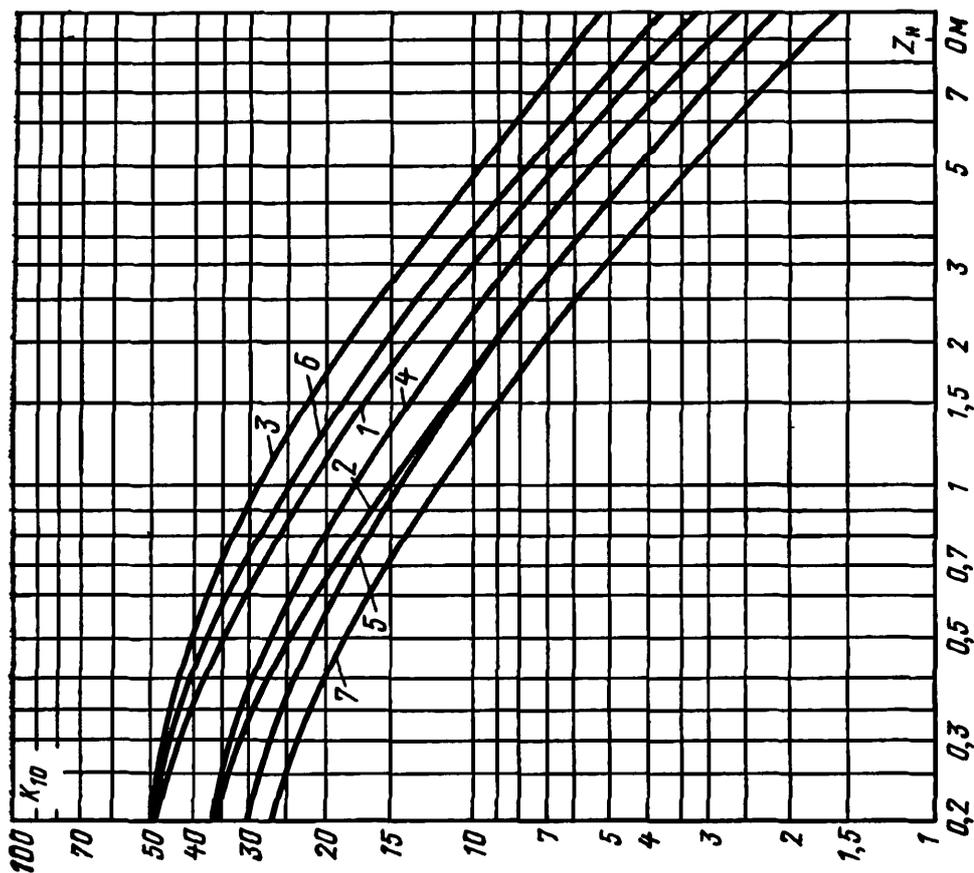


Рис. П2-36,

Рис. П2-37. ТФНР-35.

а: 1 —  $I_{\text{ном}} = 500/5 \div 1000/5$  класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 2 —  $I_{\text{ном}} = 500/5 \div 1000/5$  класса 0,5; 3 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$  класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 4 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$ , 3000/5 класса 0,5; 5 —  $I_{\text{ном}} = 3000/5$  класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; б: 1 —  $I_{\text{ном}} = 1000/1$  класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 2 —  $I_{\text{ном}} = 1000/1$ , 2000/1 класса 0,5; 3 —  $I_{\text{ном}} = 2000/1$  класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 4 —  $I_{\text{ном}} = 3000/1$  класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 5 —  $I_{\text{ном}} = 3000/1$  класса 0,5, при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения Z<sub>H</sub> умножаются на 25.

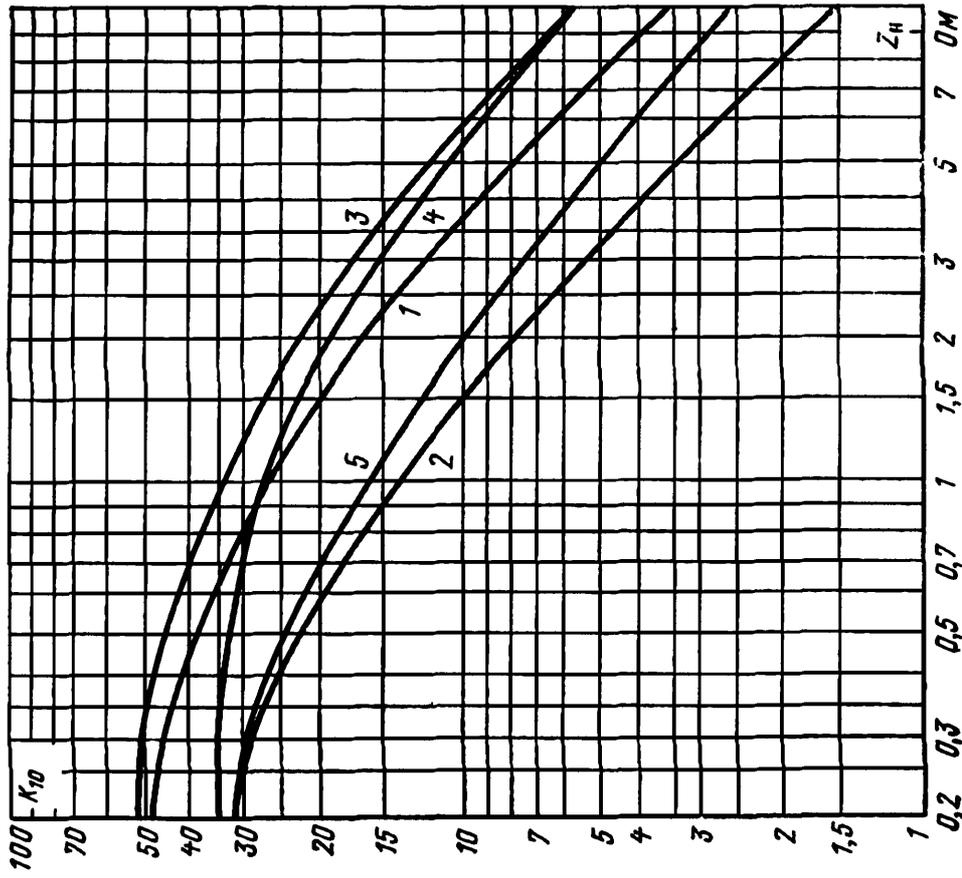


Рис. П2-37б.

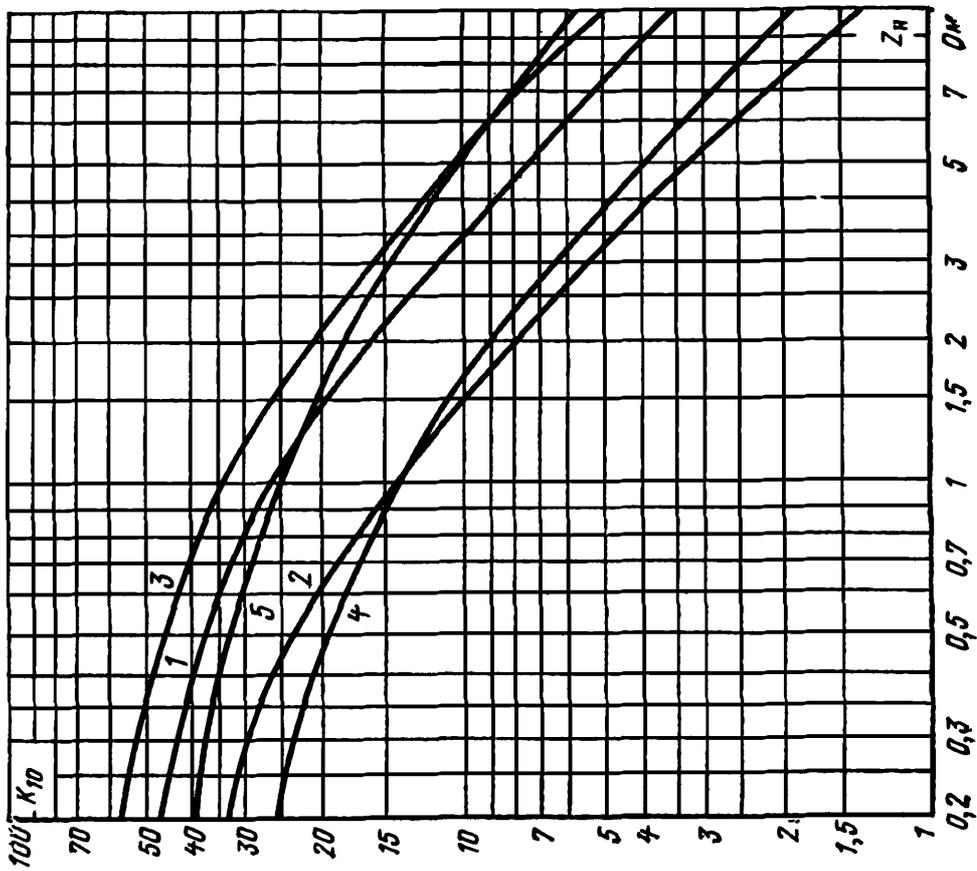


Рис. П2-37а.

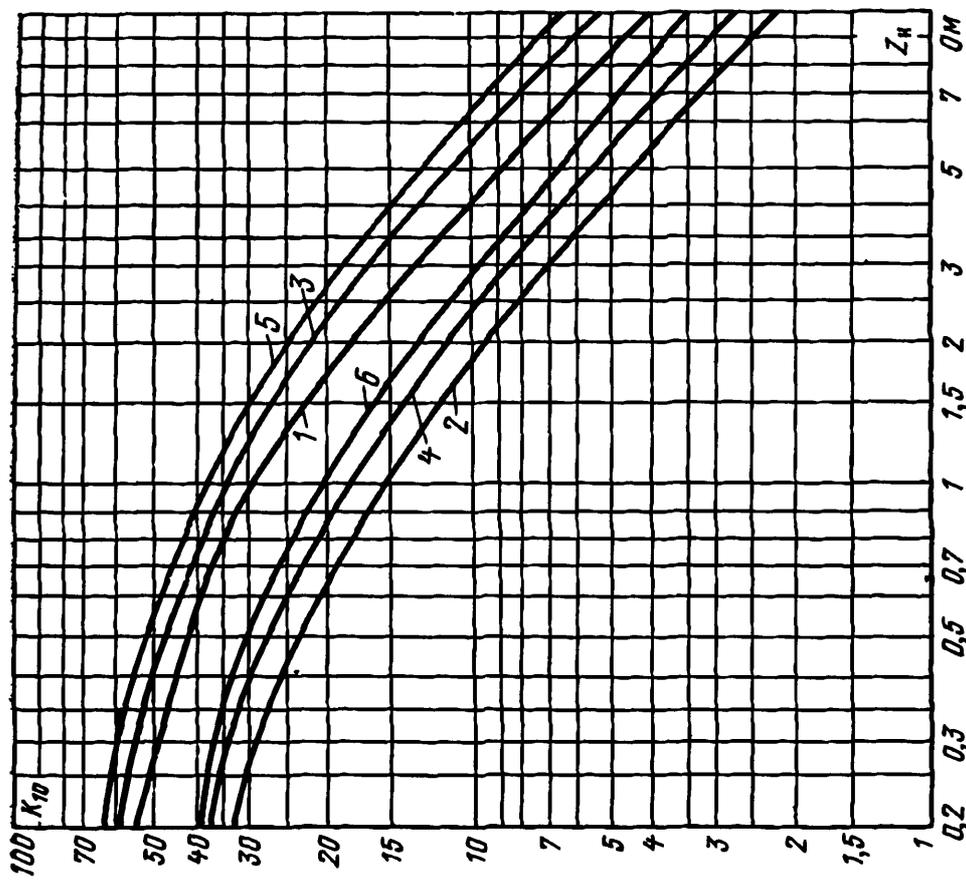


Рис. П2-38. ТФН-35М.

1 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 15/5 \div 600/5$  класса Д; 2 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 15/5 \div 600/5$  класса 0,5;  
 3 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 800/5$  класса Д; 4 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 800/5$  класса 0,5; 5 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 1000/5$  класса Д; 6 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 1000/5$  класса 0,5.

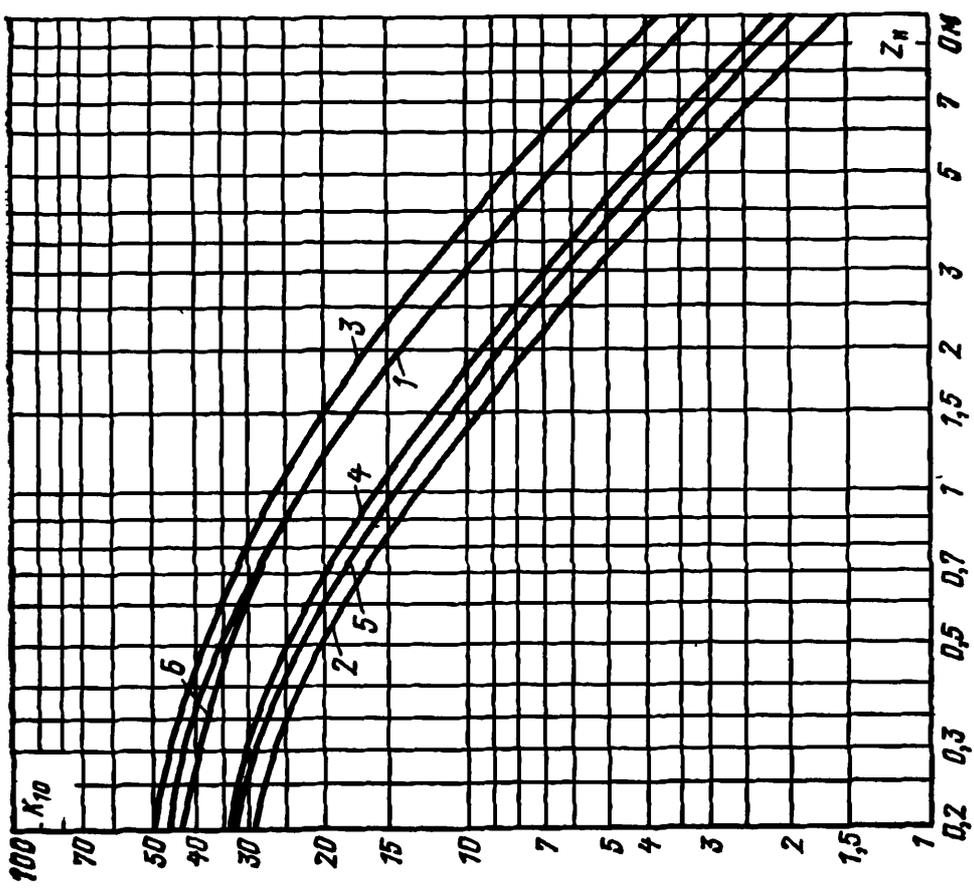


Рис. П2-39. ТФНД-35.

1 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 15/5 \div 600/5$ , 1500/5 класса Д; 2 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 15/5 \div 600/5$  класса 0,5;  
 3 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 800/5$ , 1000/5 класса Д; 4 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 800/5$  класса 0,5;  
 5 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 1500/5$  класса 0,5; 6 —  $\rho_{\text{НОМ}} = 2000/5$  класса 0,5.

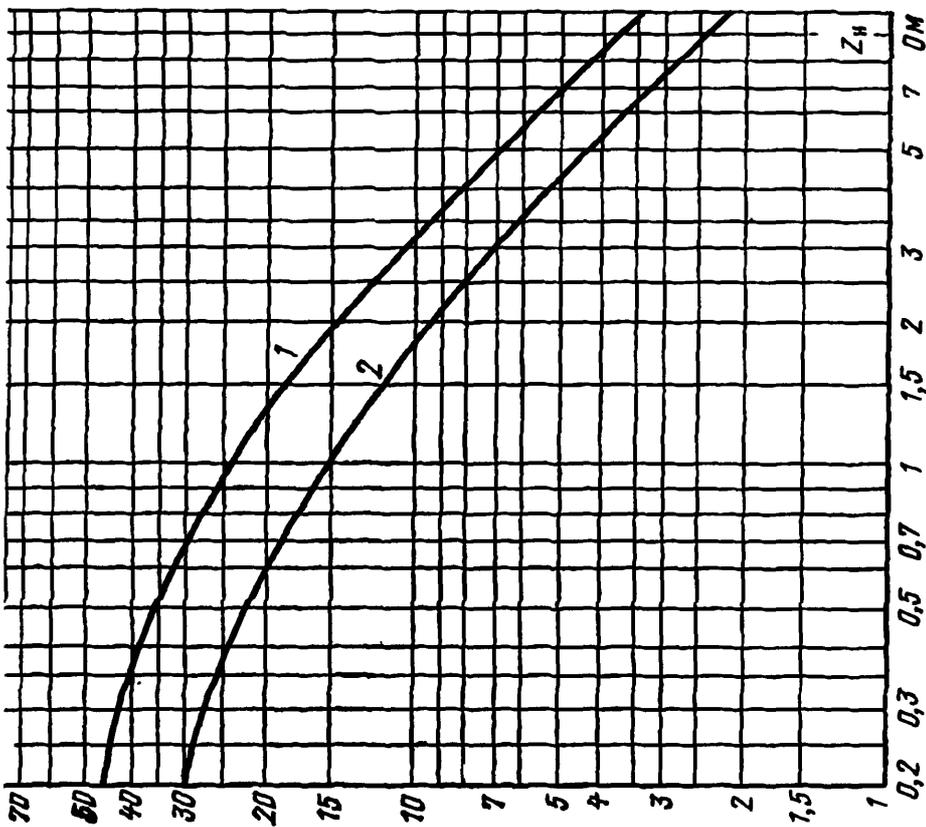


Рис. П2-40. ТФНУД-35М.

1 —  $\eta_{НОМ} = 15/5 + 600/5$  класса P; 2 —  $\eta_{НОМ} = 15/5 - 600/5$  класса 0,5,

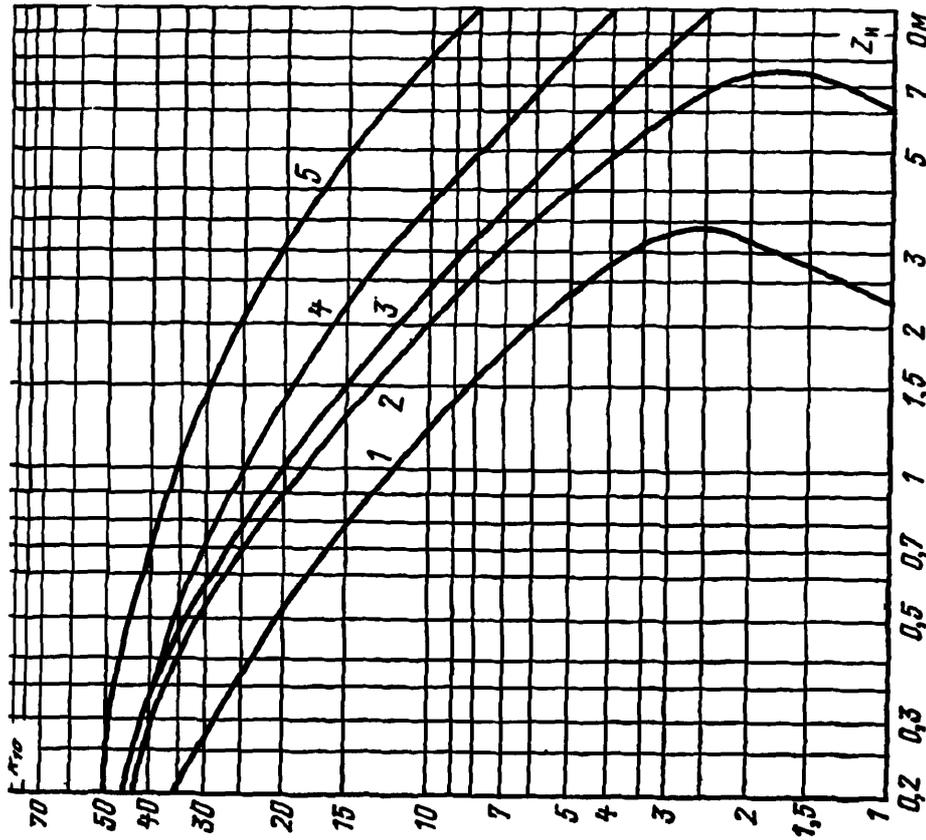


Рис. П2-41. ТВТ-66Г.

1 —  $\eta_{НОМ} = 200/5$ ; 2 —  $\eta_{НОМ} = 300/5$ ; 3 —  $\eta_{НОМ} = 400/5$ ; 4 —  $\eta_{НОМ} = 600/5$ ; 5 —  $\eta_{НОМ} = 1200/5$ .

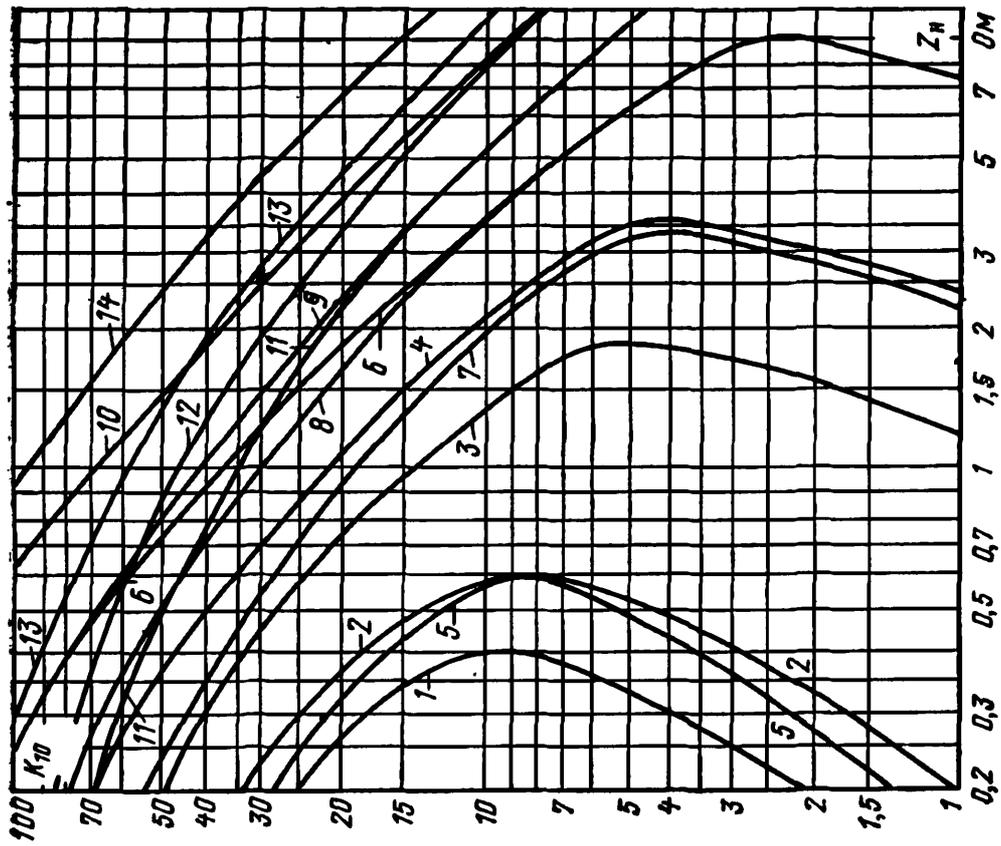


Рис. П2-43.

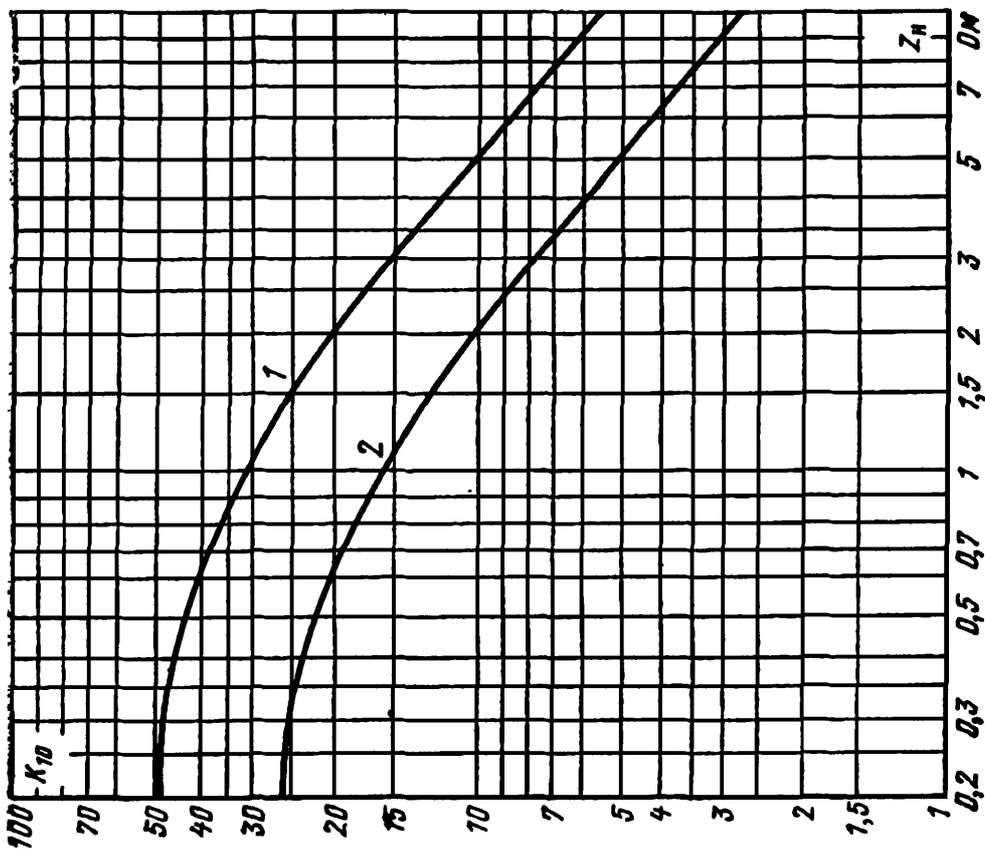


Рис. П2-42.

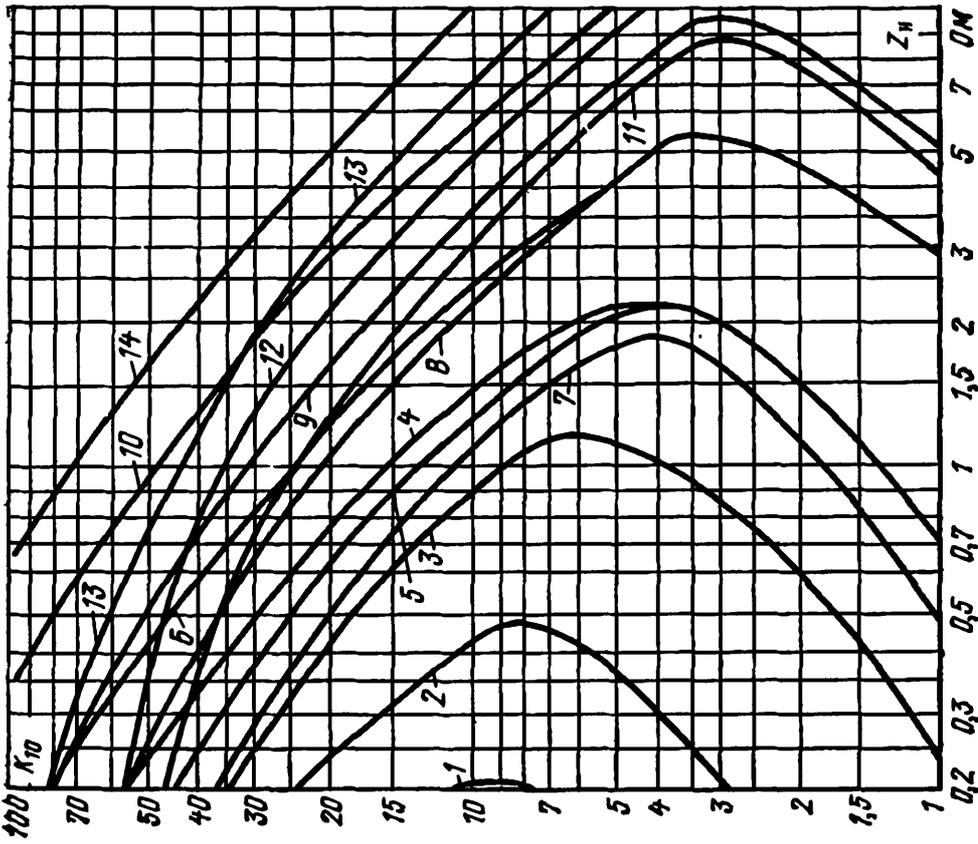


Рис. П2-44.

Рис. П2-42. ТФН-66СТ; ТФНУ-66СТ.

1 —  $\rho_{ном} = 200/5 \div 400/5$  и  $600/5 \div 1200/5$  класса Р; 2 —  $\rho_{ном} = 200/5 \div 400/5$  и  $600/5 \div 1200/5$  класса 0,5.

Рис. П2-43. ТВДМ-110, ТВМ-110.

1 —  $\rho_{ном} = 15/5$ ; 2 —  $\rho_{ном} = 100/5$  (вариант исполнения 200/5); 3 —  $\rho_{ном} = 150/5$ ; 4 —  $\rho_{ном} = 200/5$  (вариант исполнения 200/5); 5 —  $\rho_{ном} = 200/5$  (вариант исполнения 300/5); 6 —  $\rho_{ном} = 300/5$  (вариант исполнения 300/5); 7 —  $\rho_{ном} = 200/5$  (вариант исполнения 600/5); 8 —  $\rho_{ном} = 300/5$  (вариант исполнения 600/5); 9 —  $\rho_{ном} = 400/5$  (вариант исполнения 600/5); 10 —  $\rho_{ном} = 600/5$  (вариант исполнения 600/5); 11 —  $\rho_{ном} = 400/5$  (вариант исполнения 1000/5); 12 —  $\rho_{ном} = 600/5$  (вариант исполнения 1000/5); 13 —  $\rho_{ном} = 750/5$ ; 14 — для  $\rho_{ном} = 1000/5$ .

Рис. П2-44. ТНМ-110, ТНДМ-110.

1 —  $\rho_{ном} = 15/5$ ; 2 —  $\rho_{ном} = 100/5$ ; 3 —  $\rho_{ном} = 150/5$ ; 4 —  $\rho_{ном} = 200/5$  (вариант исполнения 200/5); 5 —  $\rho_{ном} = 200/5$  (вариант исполнения 300/5); 6 —  $\rho_{ном} = 300/5$  (вариант исполнения 300/5); 7 —  $\rho_{ном} = 200/5$  (вариант исполнения 600/5); 8 —  $\rho_{ном} = 300/5$  (вариант исполнения 600/5); 9 —  $\rho_{ном} = 400/5$  (вариант исполнения 600/5); 10 —  $\rho_{ном} = 600/5$  (вариант исполнения 600/5); 11 —  $\rho_{ном} = 400/5$  (вариант исполнения 1000/5); 12 —  $\rho_{ном} = 600/5$  (вариант исполнения 1000/5); 13 —  $\rho_{ном} = 750/5$ ; 14 —  $\rho_{ном} = 1000/5$ .

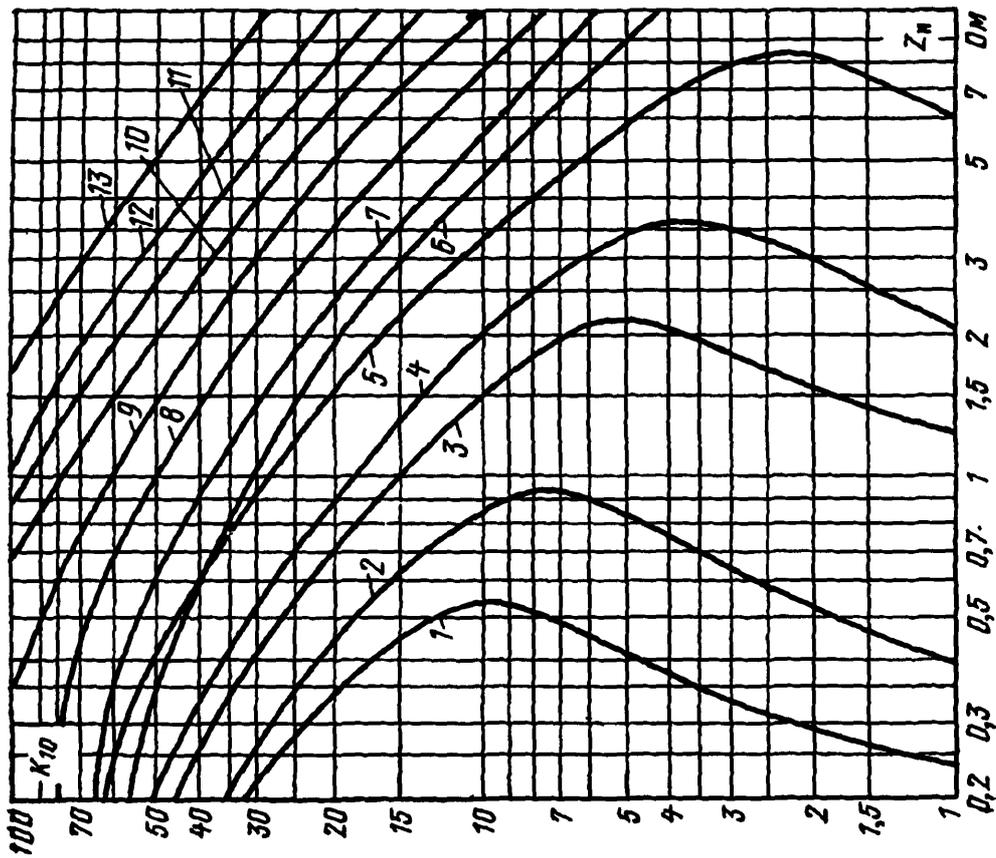


Рис. П2-46.

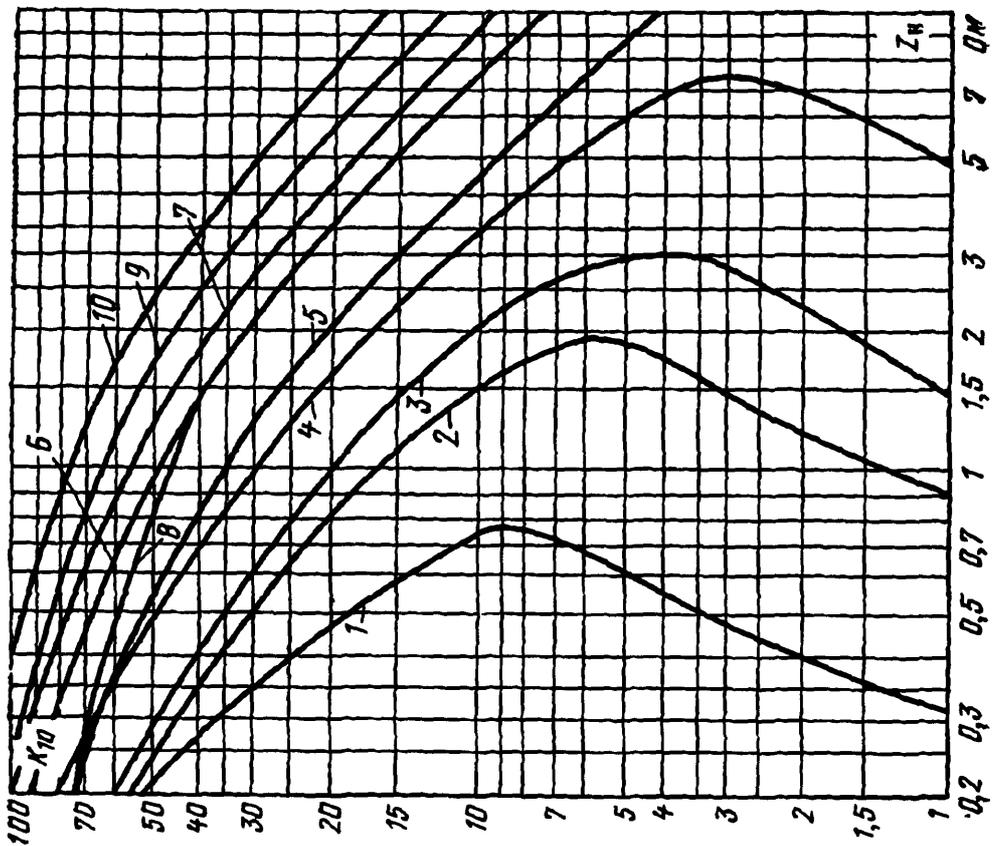


Рис. П2-45.

Рис. П2-46. ТВТ-110.

1 —  $I_{\text{ном}} = 100/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 150/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 200/5$ ; 4 —  $I_{\text{ном}} = 300/5$ ; 5 —  $I_{\text{ном}} = 400/5$ ; 6 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$ ; 7 —  $I_{\text{ном}} = 750/5$ ; 8 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$ ; 9 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$ ; 10 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{д}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-46. ТВ-110/20.

1 —  $I_{\text{ном}} = 75/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 100/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 150/5$ ; 4 —  $I_{\text{ном}} = 200/5$ ; 5 —  $I_{\text{ном}} = 300/5$ ; 6 —  $I_{\text{ном}} = 400/5$ ; 7 —  $I_{\text{ном}} = 500/1$ ; 8 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$  и  $600/1$ ; 9 —  $I_{\text{ном}} = 750/5$  и  $750/1$ ; 10 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$  и  $1000/1$ ; 11 —  $I_{\text{ном}} = 1200/1$ ; 12 —  $I_{\text{ном}} = 1500/1$ ; 13 —  $I_{\text{ном}} = 2000/1$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{д}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-47. ТВ-110/50.

1 —  $I_{\text{ном}} = 75/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 100/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 150/5$ ; 4 —  $I_{\text{ном}} = 200/5$ ; 5 —  $I_{\text{ном}} = 300/5$ ; 6 —  $I_{\text{ном}} = 400/5$ ; 7 —  $I_{\text{ном}} = 500/5$ ; 8 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$ ; 9 —  $I_{\text{ном}} = 750/5$ ; 10 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$ ; 11 —  $I_{\text{ном}} = 1200/1$ ; 12 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$  и  $1500/1$ ; 13 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$  и  $2000/1$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{д}}$  умножаются на 25.

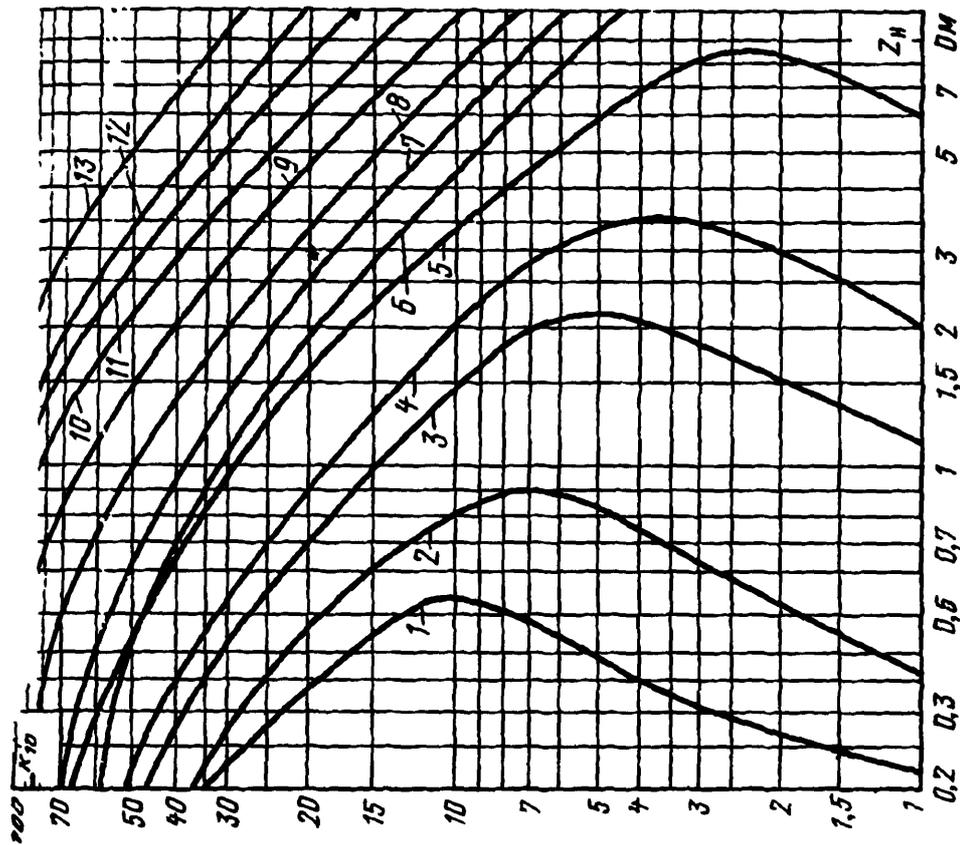


Рис. П2-47.

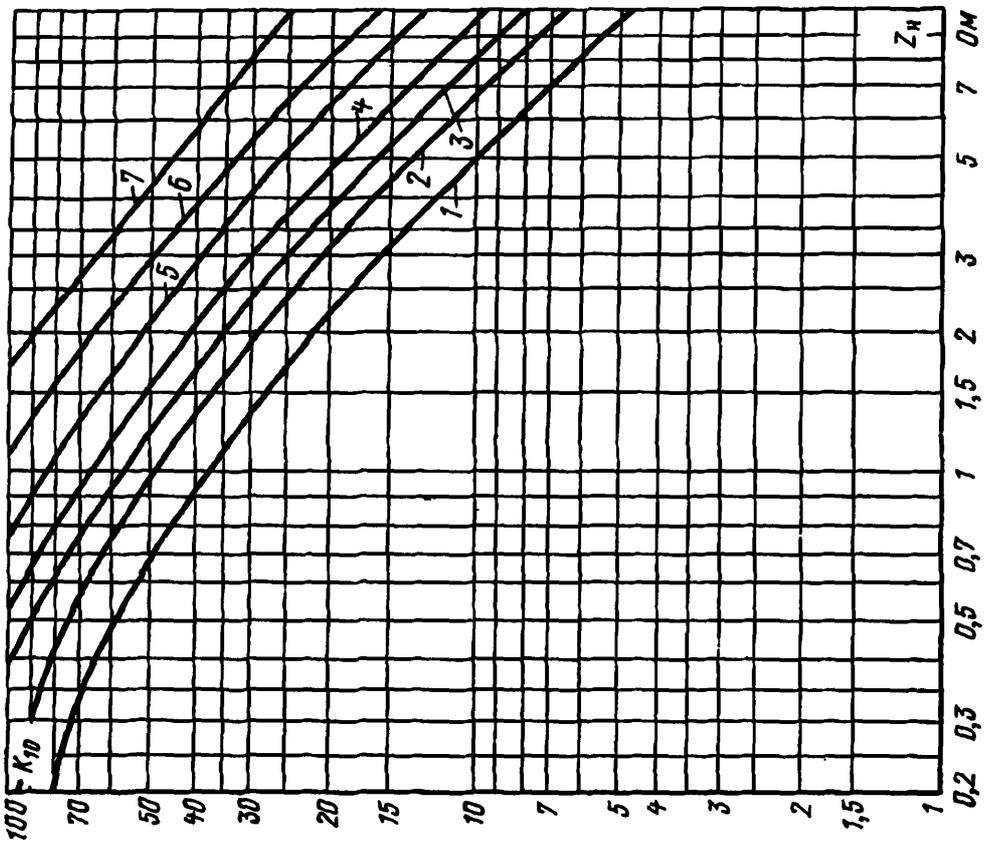
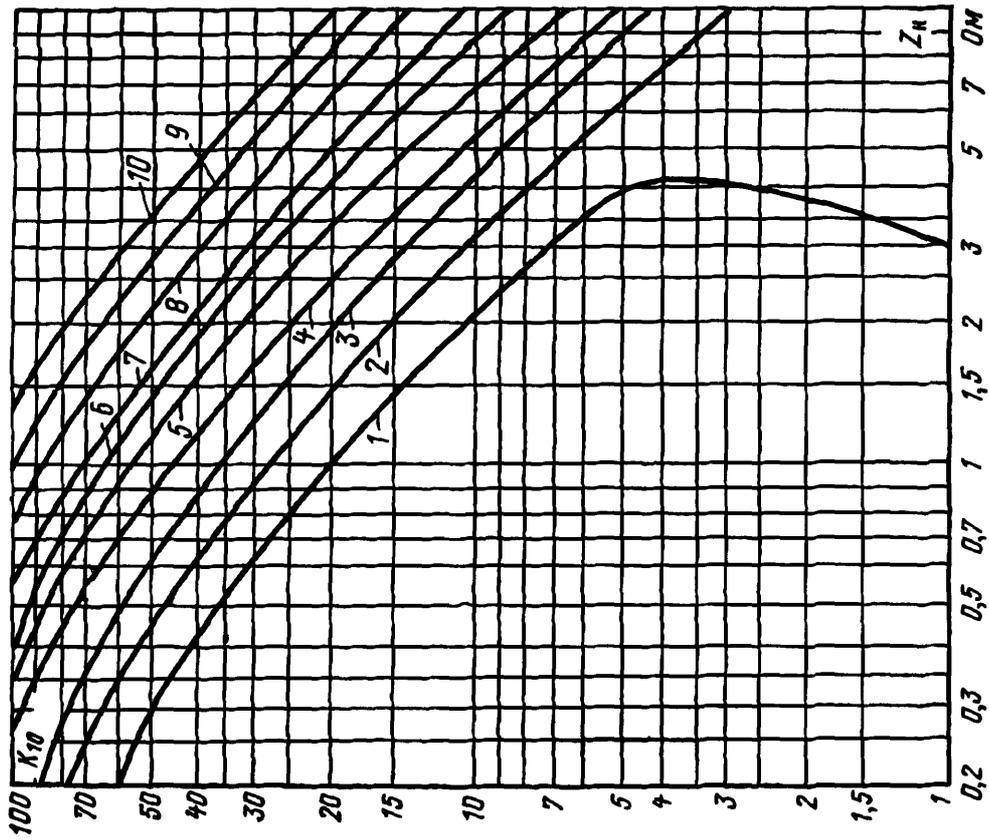


Рис. П2-48. ТВС-110-80.

1 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 800/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$ ; 4 —  $I_{\text{ном}} = 1200/5$ ; 5 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$ ; 6 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$ ; 7 —  $I_{\text{ном}} = 3000/5$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{н}}$  умножаются на 25.

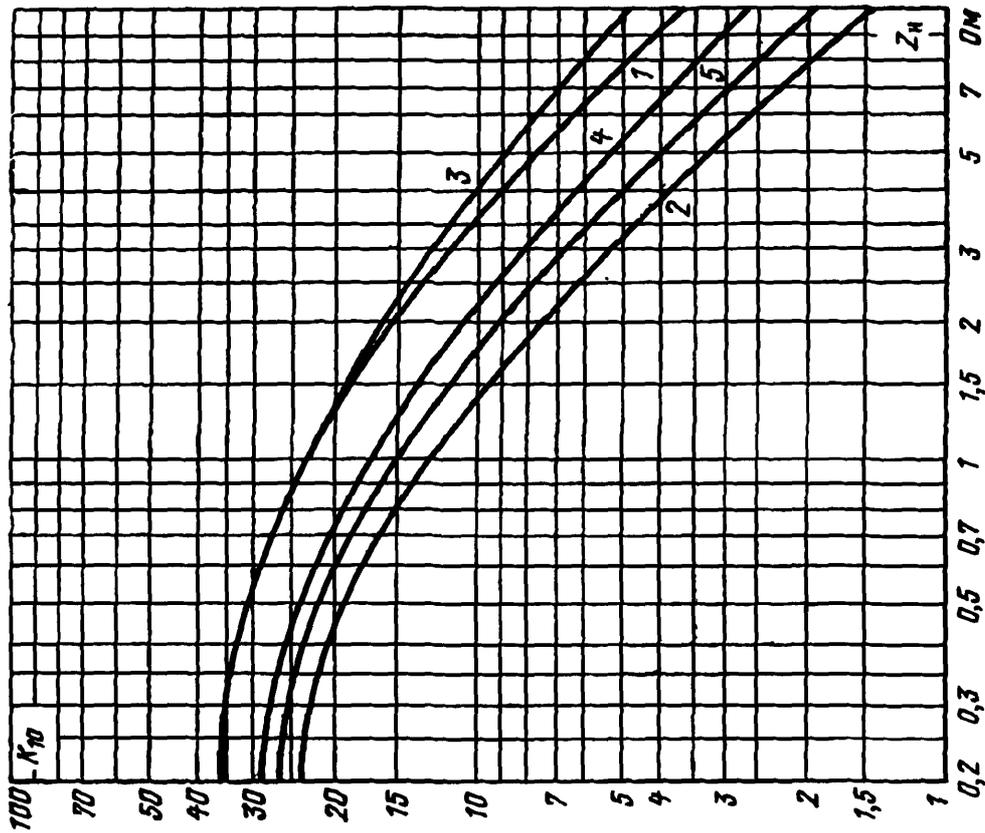


Рис. П2-49. ТВУ-110/50.

1 —  $I_{\text{ном}} = 200/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 300/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 400/5$ ; 4 —  $I_{\text{ном}} = 500/5$  и  $600/1$ ; 5 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$  и  $600/1$ ; 6 —  $I_{\text{ном}} = 750/5$  и  $750/1$ ; 7 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$  и  $1000/1$ ; 8 —  $I_{\text{ном}} = 1200/5$  и  $1200/1$ ; 9 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$  и  $1500/1$ ; 10 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$  и  $2000/1$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{н}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-50. ТФНД-110М (снят с производства).

1 —  $I_{\text{ном}} = 50/5 + 600/5$ ,  $750/5 + 1500/5$  и  $750/1 + 1500/1$  класса Д; 2 —  $I_{\text{ном}} = 50/5 + 600/5$ ,  $600/5 + 1200/5$  и  $600/1 + 1200/1$  класса 0,5; 3 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5 + 2000/5$  и  $1000/1 + 2000/1$  класса Д; 4 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5 + 2000/5$  и  $1000/1 + 2000/1$  класса 0,5; 5 —  $I_{\text{ном}} = 750/5 + 1500/5$  и  $750/1 + 1500/1$  класса 0,5; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{н}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-50.

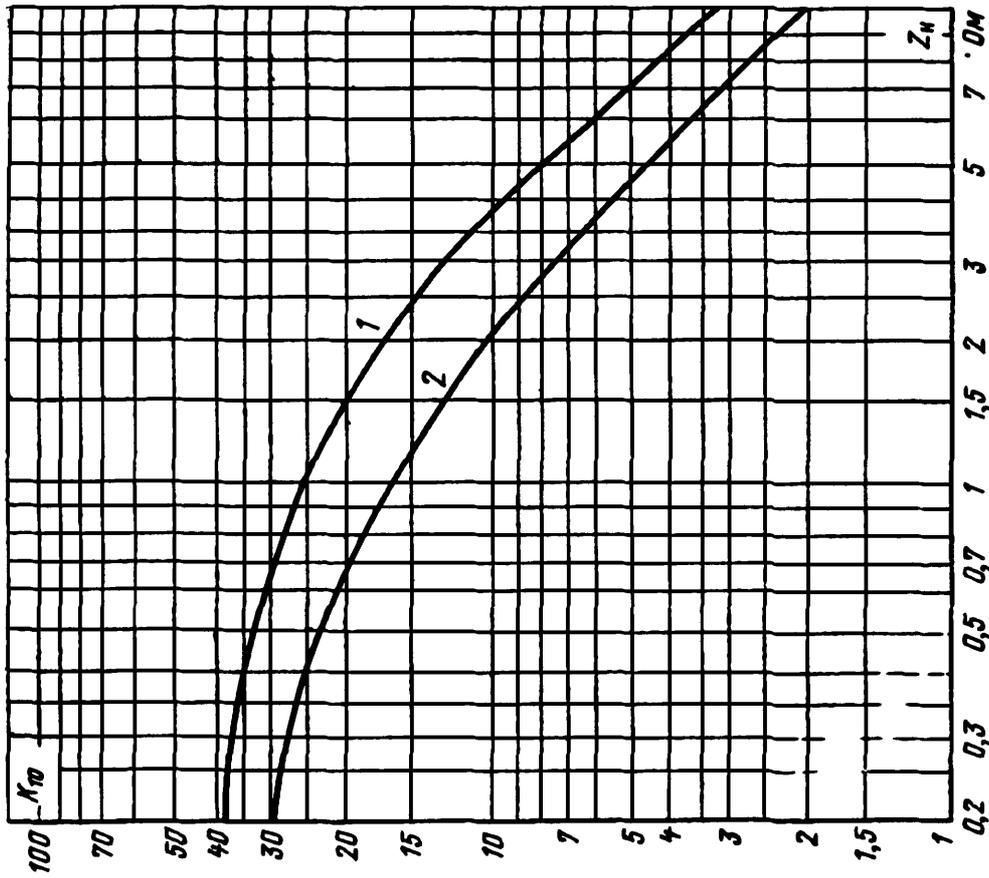


Рис. П2-52.

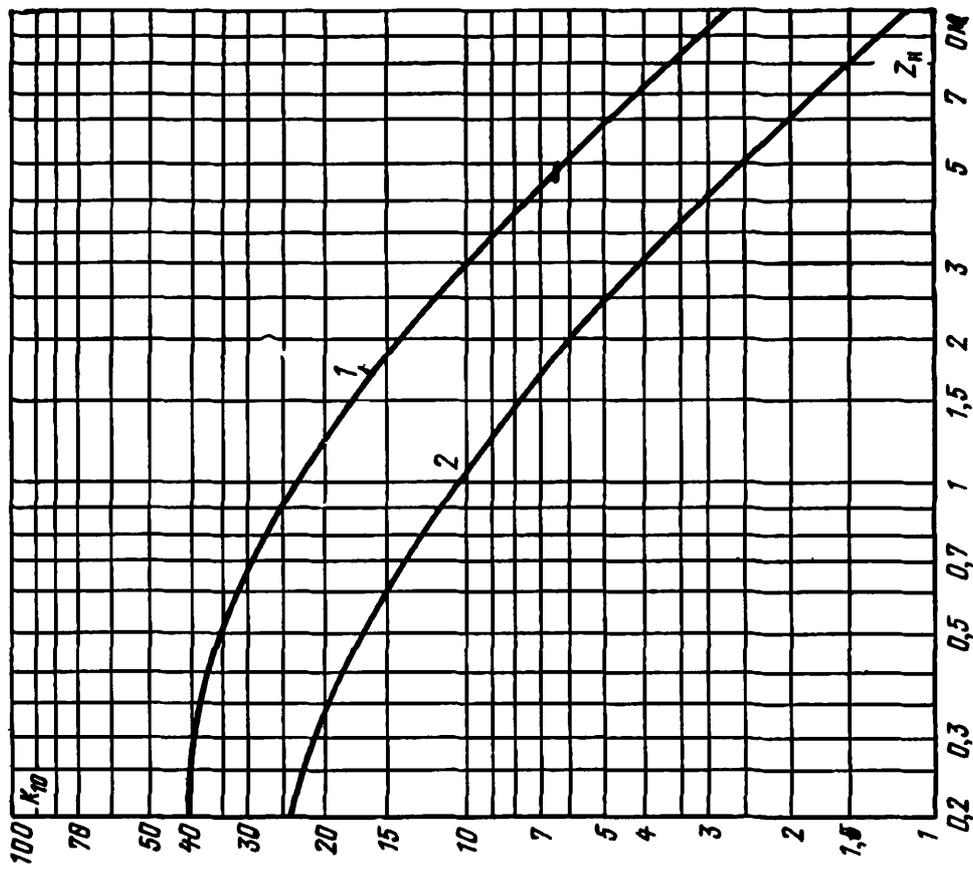


Рис. П2-51.

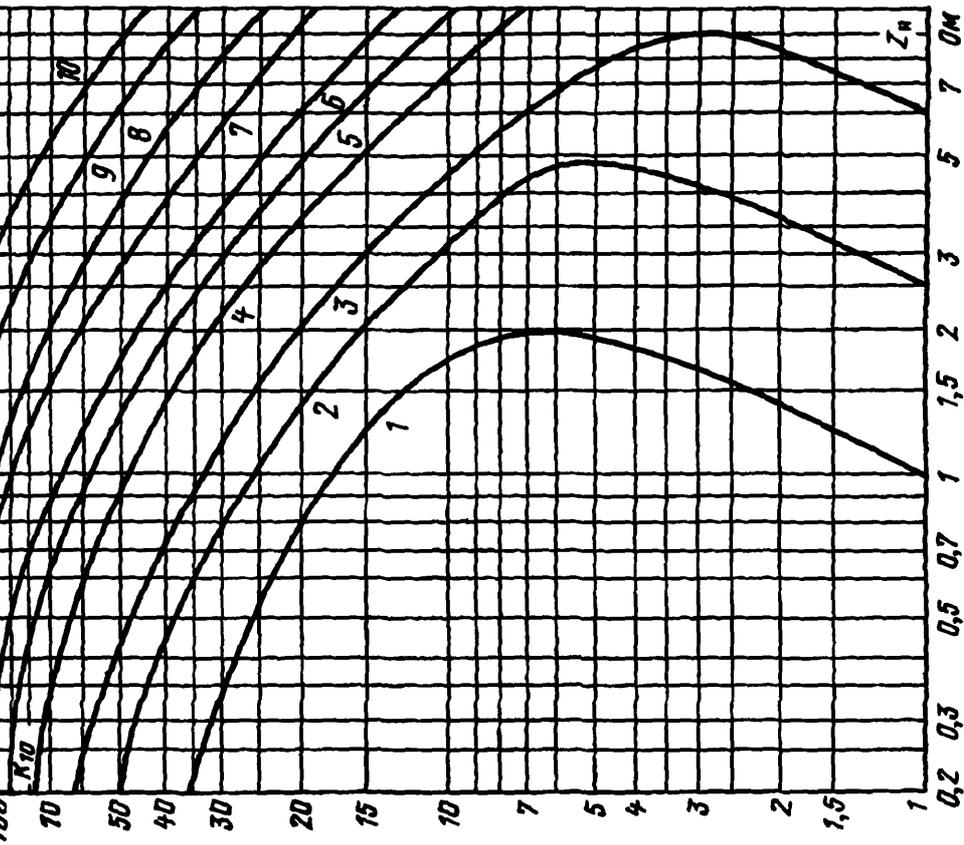


Рис. П2-53.

Рис. П2-51. ТФНД-110М.  
 1 —  $I_{\text{ном}} = 50/5 + 100/5$ , 400/5 + 800/5 класса P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>; 2 —  $I_{\text{ном}} = 50/5 + 100/5$ , 400/5 + 800/5 класса 0,5.

Рис. П2-52. ТФНД-110М-П.  
 1 —  $I_{\text{ном}} = 750/5 + 1500/5$ , 1000/5 + 2000/5 класса P; 2 —  $I_{\text{ном}} = 750/5 + 1500/5$ , 1000/5 + 2000/5 класса 0,5; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{н}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-53. ТВТ-150, ТВТ-220-150, ТВТ-220.  
 1 —  $I_{\text{ном}} = 200/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 300/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 400/5$ ; 4 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$ ; 5 —  $I_{\text{ном}} = 750/5$ ; 6 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$ ; 7 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$ ; 8 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$ ; 9 —  $I_{\text{ном}} = 3000/5$  ТВТ-220; 10 —  $I_{\text{ном}} = 4000/5$  ТВТ-220; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{н}}$  умножаются на 25.

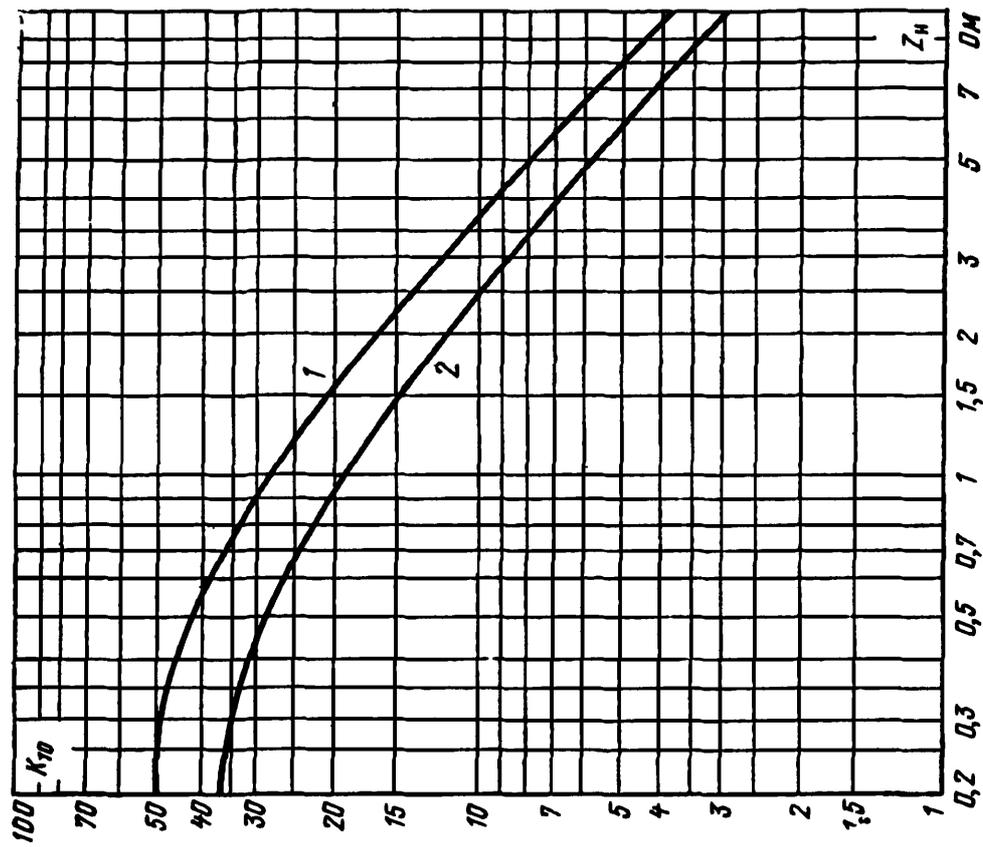


Рис. П2-55.

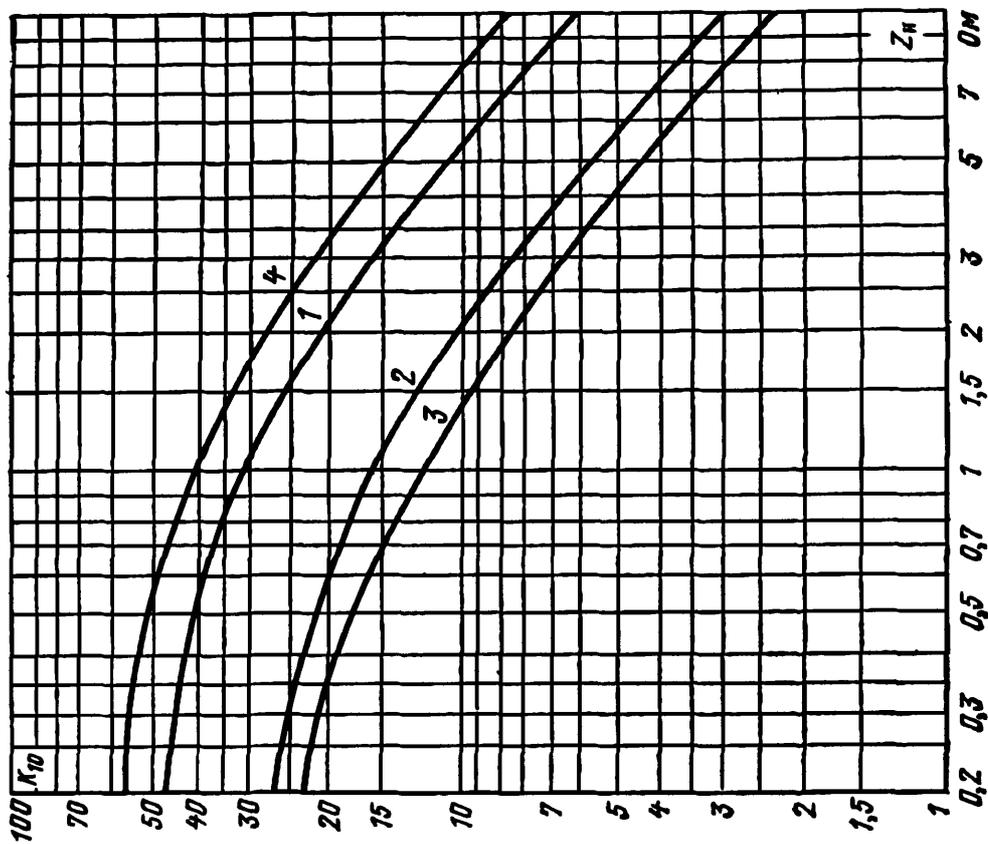


Рис. П2-54.

Рис. П2-54. ТФНУ-132СТ.

1 —  $I_{\text{ном}} = 200/5 + 400/5$ , 300/5 + 600/5, 500/5 + 1000/5; 600/5 + 1200/5 класса Р; 2 —  $I_{\text{ном}} = 200/5 + 400/5$ , 300/5 + 1200/5, 750/5 + 1500/5 класса 0,5; 3 —  $I_{\text{ном}} = 500/5 + 1000/5$  класса 0,5; 4 —  $I_{\text{ном}} = 750/5 + 1500/5$  класса Р; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{в}}$  умножаются на 25.

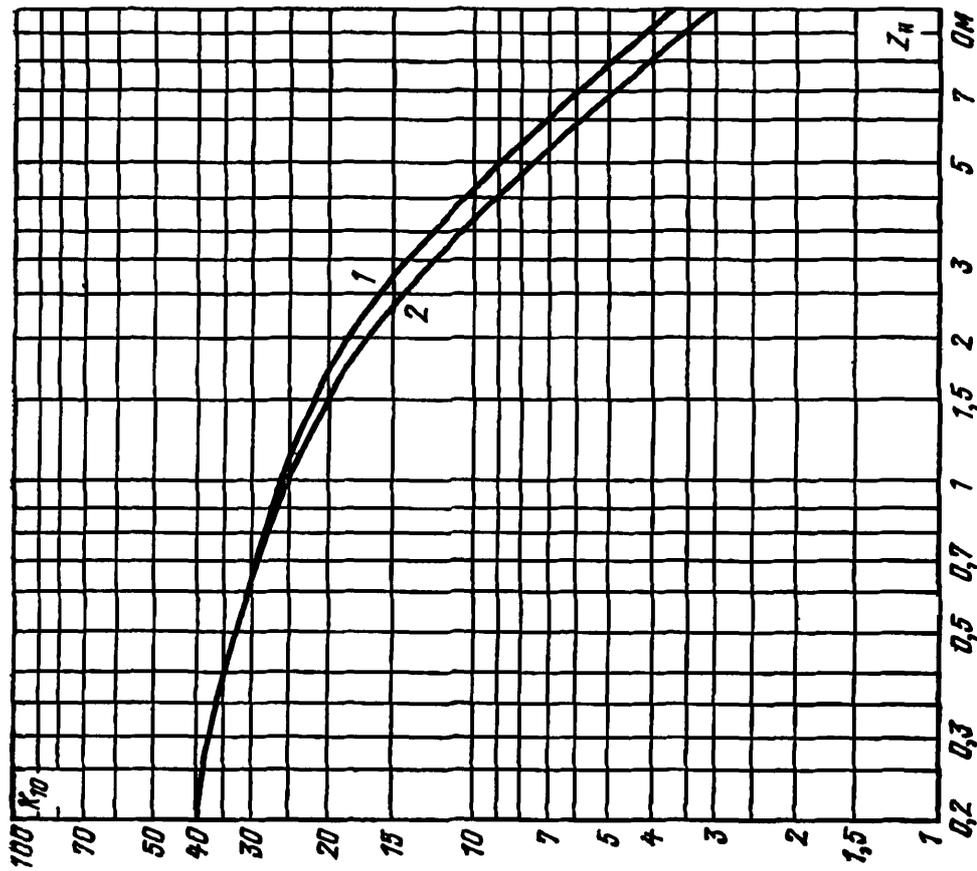


Рис. П2-55. ТФНД-150-1, ТФНД-150-1-ХЛ, ТФНР-150Т.

1 —  $I_{\text{ном}} = 600/5 + 1200/5$  класса Р; 2 —  $I_{\text{ном}} = 600/5 + 1200/5$  класса 0,5; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{в}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-56. ТФНР-150-2000.

1 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5 + 2000/5$  класса Р; 2 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5 + 2000/5$  класса 0,5; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{в}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-56.

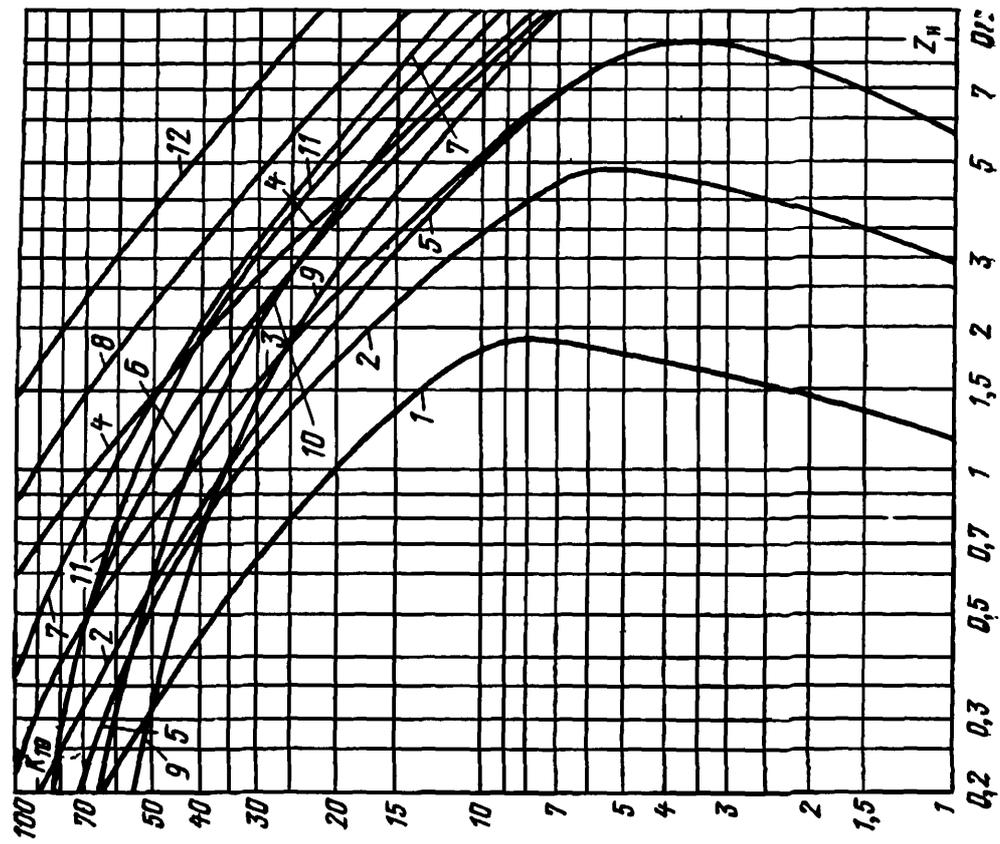


Рис. П2-58.

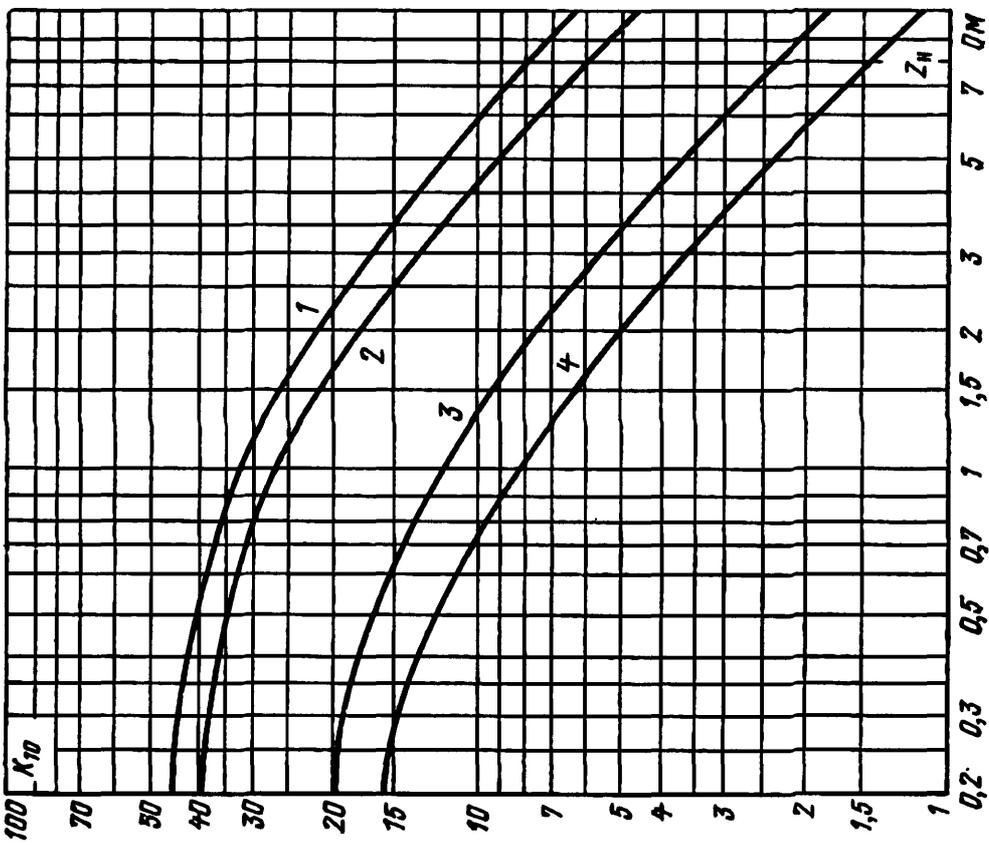


Рис. П2-57.

Рис. П2-57. ТФНД-154.

1 —  $I_{\text{ном}} = 600/5 \div 1200/5$  класса  $D_1$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 600/5 \div 1200/5$  класса  $D_2$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 600/5 \div 1200/5$  класса 0,5; 4 —  $I_{\text{ном}} = 400/5 \div 800/5$  класса 0,5.

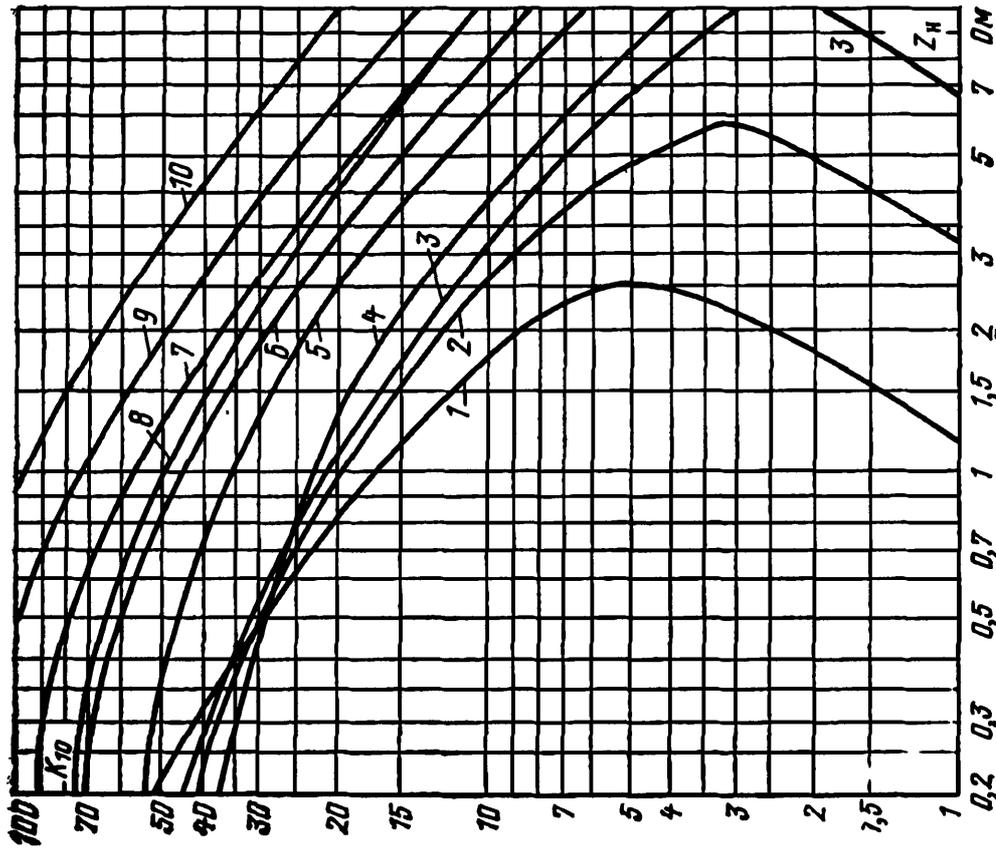


Рис. П2-58. ТВД-220.

1 —  $I_{\text{ном}} = 200/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 300/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 400/5$  (вариант исполнения 600/5); 4 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$  (вариант исполнения 600/5); 5 —  $I_{\text{ном}} = 400/5$  (вариант исполнения 1000/5); 6 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$  (вариант исполнения 1000/5); 7 —  $I_{\text{ном}} = 750/5$  (вариант исполнения 1000/5); 8 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$  (вариант исполнения 1000/5); 9 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$  (вариант исполнения 1500/5); 10 —  $I_{\text{ном}} = 750/5$  (вариант исполнения 1500/5); 11 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$  (вариант исполнения 1500/5); 12 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$ .

Рис. П2-59. ТВ-220/25.

1 —  $I_{\text{ном}} = 200/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 300/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 400/5$  и 400/1; 4 —  $I_{\text{ном}} = 500/5$  и 500/1; 5 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$  и 600/1; 6 —  $I_{\text{ном}} = 750/5$  и 750/1; 7 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$  и 1000/1; 8 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$  и 1000/1; 9 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$  и 1500/1; 10 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$  и 2000/1; при  $I_{\text{2ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{в}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-59.

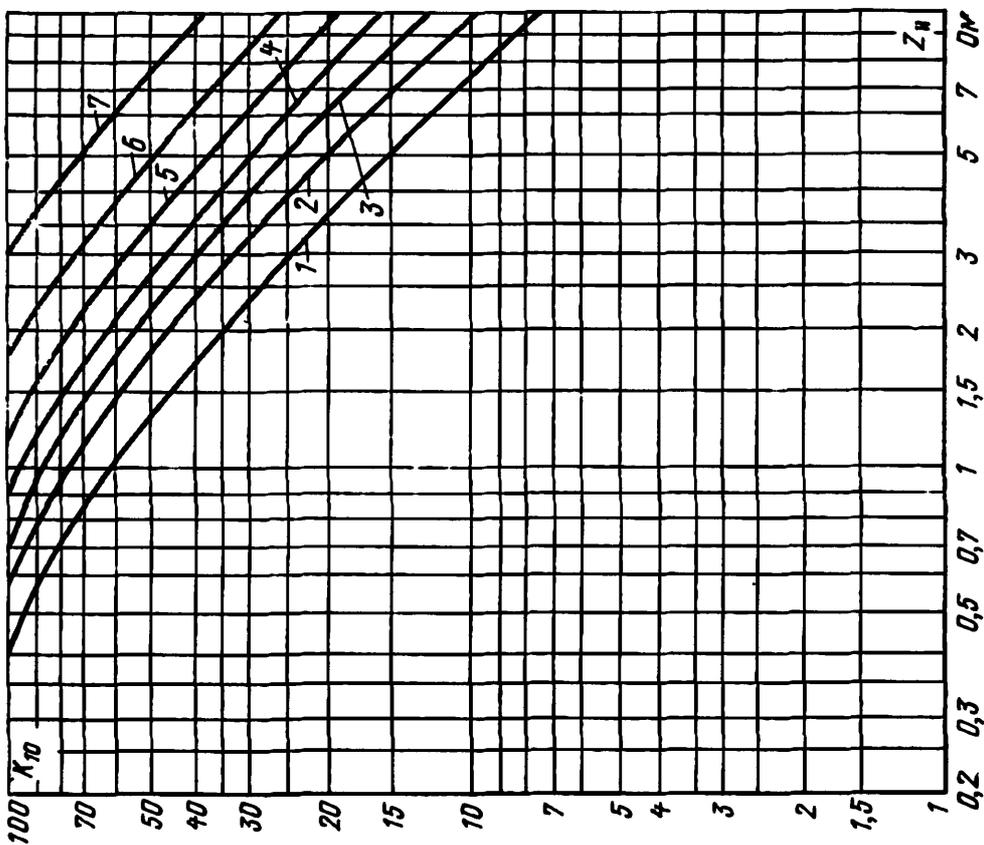


Рис. П2-60. ТВС-220/40.

1 —  $\lambda_{ном} = 600/5$ ; 2 —  $\lambda_{ном} = 800/5$ ; 3 —  $\lambda_{ном} = 1000/5$ ; 4 —  $\lambda_{ном} = 1500/5$ ; 5 —  $\lambda_{ном} = 2000/5$ ; 6 —  $\lambda_{ном} = 3000/5$ ; 7 —  $\lambda_{ном} = 4000/5$ ; при  $\lambda_{ном} = 1$  А значения  $Z_H$  умножаются на 25.

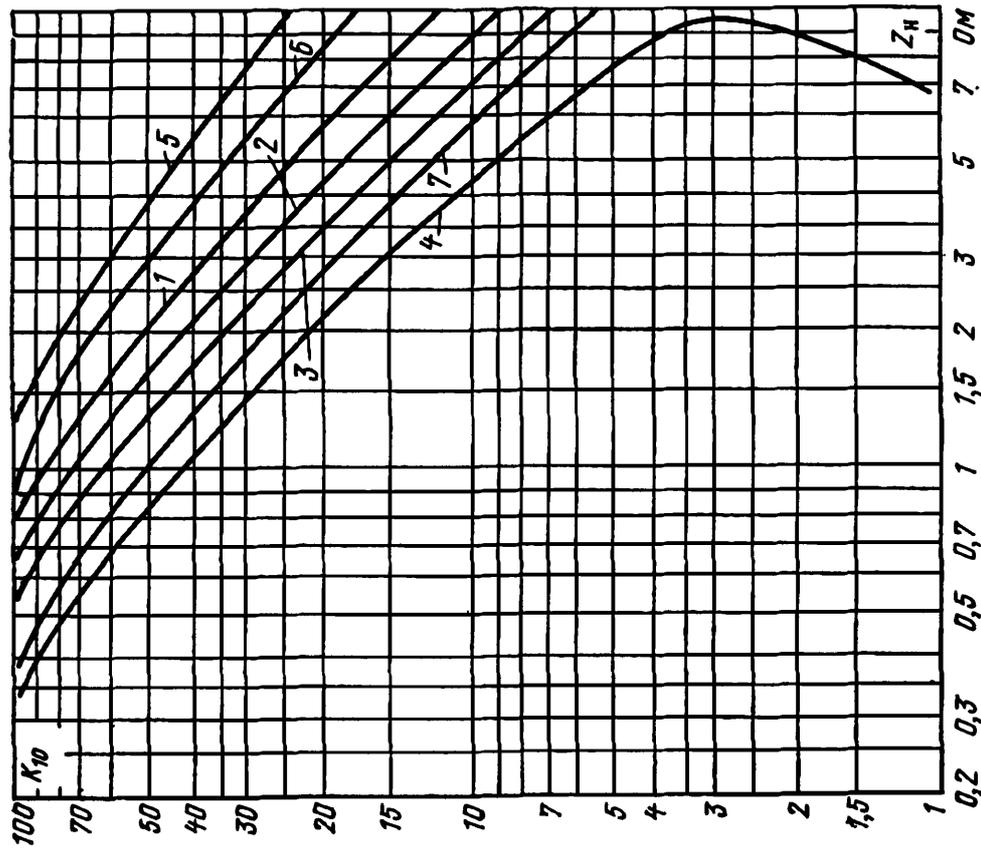


Рис. П2-61. ТДУ-220.

1 —  $\lambda_{ном} = 400/5$ ; 2 —  $\lambda_{ном} = 500/5$ ; 3 —  $\lambda_{ном} = 750/5$ ; 4 —  $\lambda_{ном} = 1000/5$ ; 5 —  $\lambda_{ном} = 1500/5$ ; 6 —  $\lambda_{ном} = 2000/5$ ; 7 —  $\lambda_{ном} = 3000/5$ ; при  $\lambda_{ном} = 1$  А значения  $Z_H$  умножаются на 25.

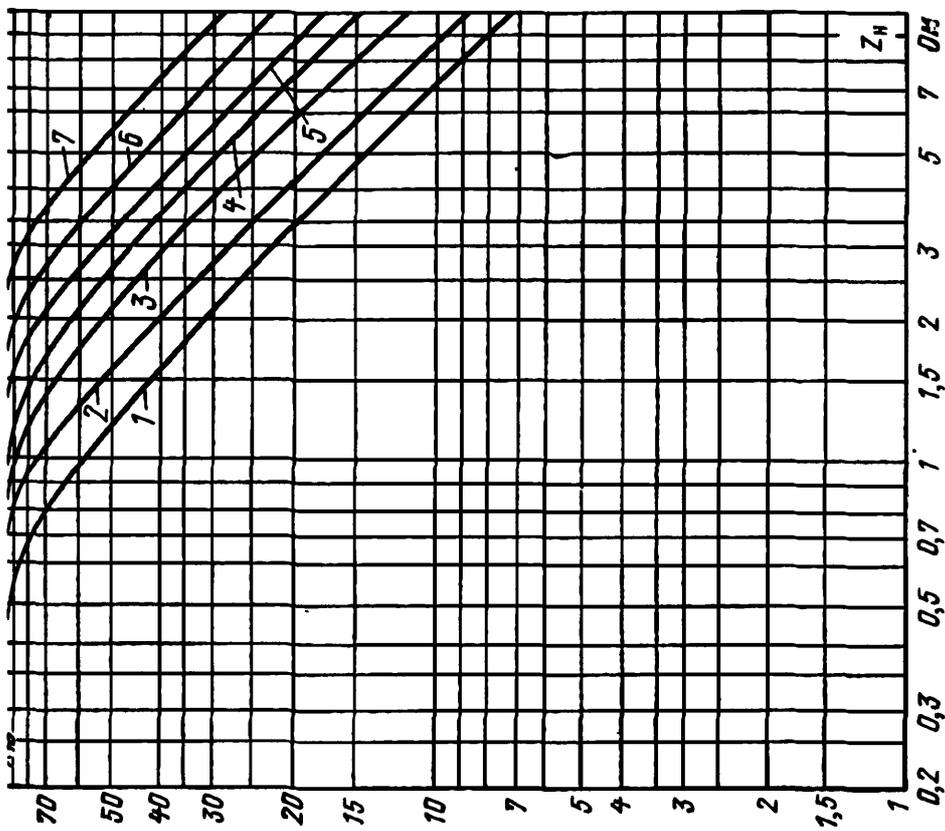


Рис. П2-62. ТВУ-220/40.

1 —  $P_{\text{ном}} = 500/5$ ; 2 —  $P_{\text{ном}} = 600/5$ ; 3 —  $P_{\text{ном}} = 800/5$ ; 4 —  $P_{\text{ном}} = 1000/5$ ; 5 —  $P_{\text{ном}} = 1200/5$ ; 6 —  $P_{\text{ном}} = 1500/5$ ; 7 —  $P_{\text{ном}} = 2000/5$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{в}}$  умножаются на 25.

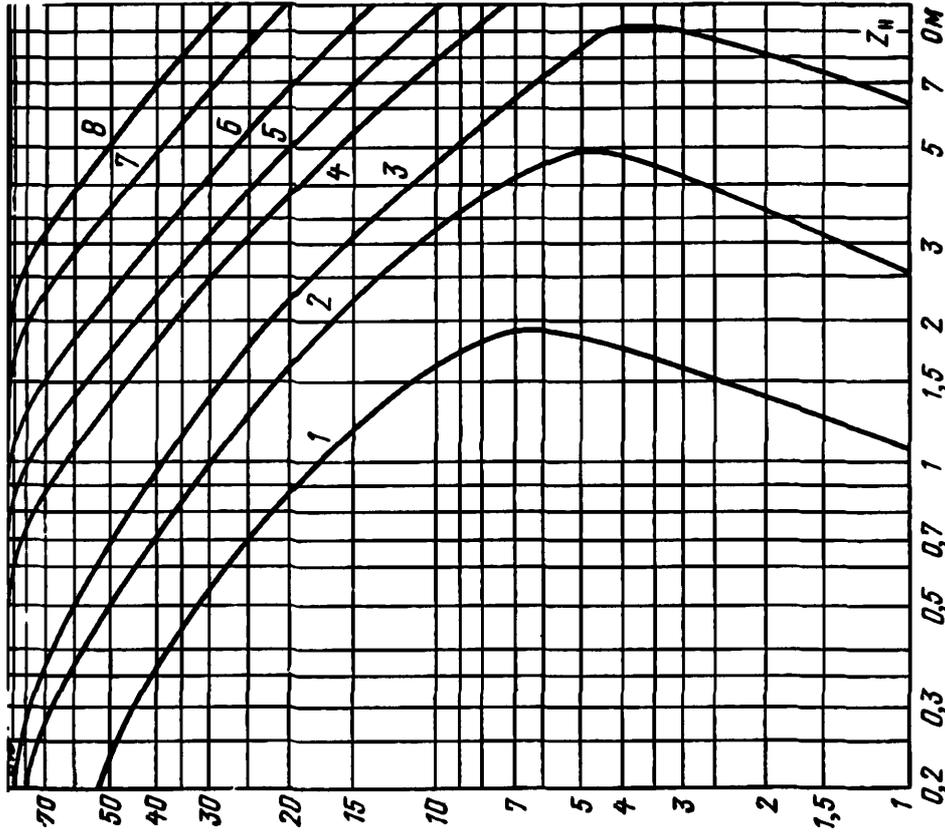


Рис. П2-63. ТВТ-220-154.

1 —  $P_{\text{ном}} = 200/5$ ; 2 —  $P_{\text{ном}} = 300/5$ ; 3 —  $P_{\text{ном}} = 400/5$ ; 4 —  $P_{\text{ном}} = 600/5$ ; 5 —  $P_{\text{ном}} = 750/5$ ; 6 —  $P_{\text{ном}} = 1000/5$ ; 7 —  $P_{\text{ном}} = 1500/5$ ; 8 —  $P_{\text{ном}} = 2000/5$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{в}}$  умножаются на 25.

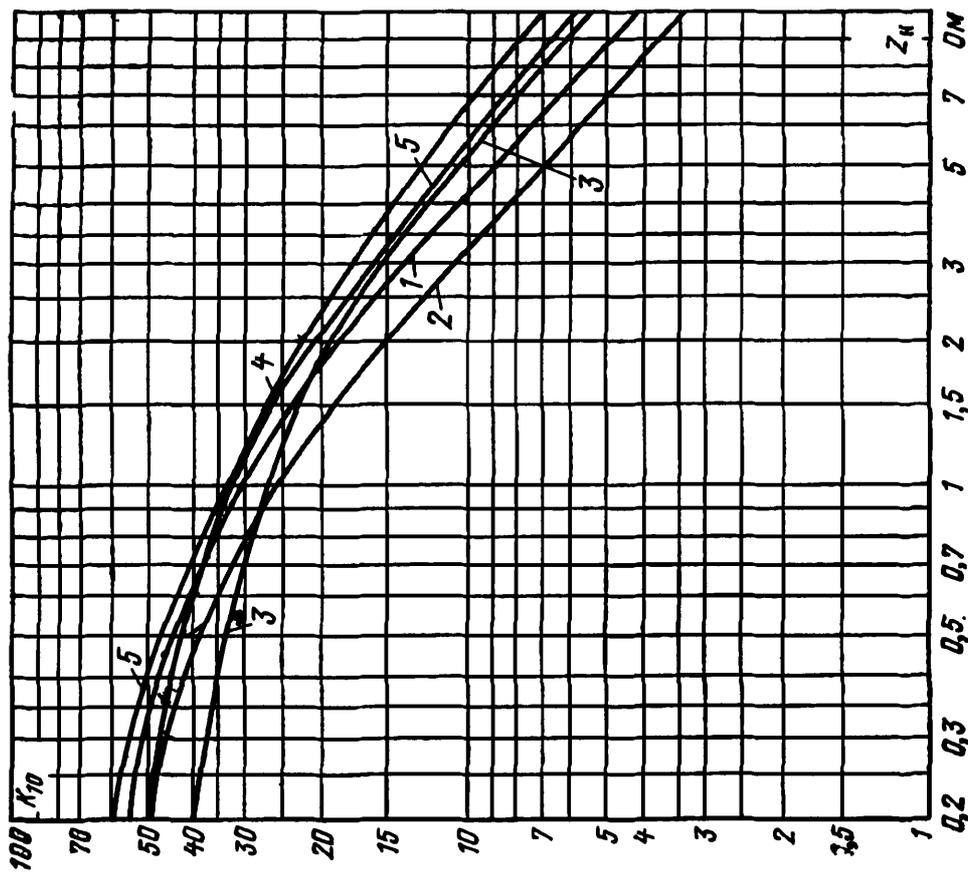


Рис. П2-65.

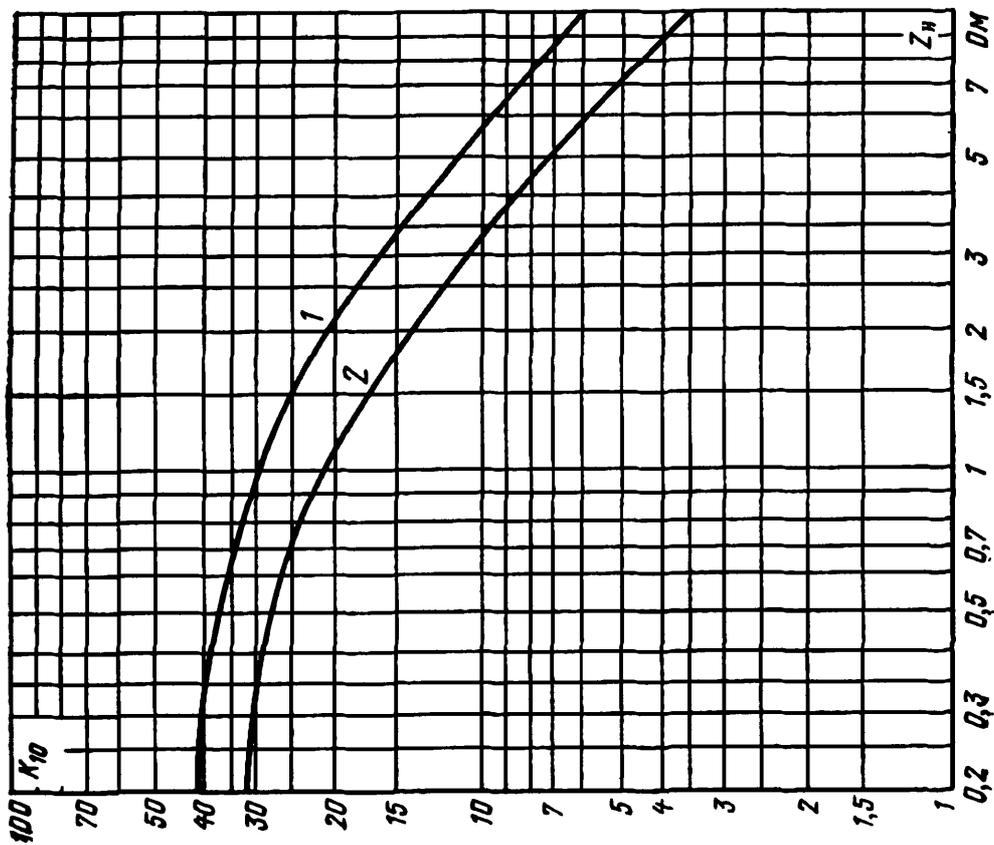


Рис. П2-64.

Рис. П2-64. ТФНУ-220СТ (снят с производства).  
 1 —  $I_{\text{ном}} = 300/5 \div 600/5$ ; 400/5 + 800/5; 600/5 + 1200/5; 750/5 + 1500/5 клас-  
 са Р; 2 —  $I_{\text{ном}} = 300/5 \div 600/5$ ; 400/5 + 800/5; 600/5 + 1200/5; 750/5 +  
 1500/5 класса 0,5; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{н}}$  умножаются на 2,5.

Рис. П2-65. ТФНД-220-1, ТФНД-220-1-ХЛ, ТФНД-220-IV, ТФНД-220-3Г, ТФНД-220.  
 1 —  $I_{\text{ном}} = 300/5 \div 1200/5$  класса Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub> (ТФНД-220),  $I_{\text{ном}} = 300/5 \div 1200/5$  и 300/1 + 1200/1 класса Р<sub>2</sub>, Р<sub>3</sub> (ТФНД-220-1, ТФНД-220-1-ХЛ),  $I_{\text{ном}} = 750/1 \div 1500/1$  класса 0,5, Р<sub>1</sub> (ТФНД-220-3Г);  
 2 —  $I_{\text{ном}} = 300/5 \div 1200/5$  класса 0,5, Д<sub>3</sub> (ТФНД-220),  $I_{\text{ном}} = 300/5 \div 1200/5$  и 300/1 + 600/1 + 1200/1 класса Р<sub>1</sub>, 0,5 (ТФНД-220-1), ТФНД-220-1-ХЛ); 3 —  $I_{\text{ном}} = 500/5 \div 1000/5 \div 2000/5$  и 500/1 + 1000/1 + 2000/1 класса 0,5, Р<sub>3</sub> (ТФНД-220-IV); 4 —  $I_{\text{ном}} = 500/5 \div 1000/5 \div 2000/5$  и 500/1 + 1000/1 + 2000/1 класса Р<sub>1</sub>, Р<sub>2</sub> (ТФНД-220-IV); 5 —  $I_{\text{ном}} = 750/1 \div 1500/1$  класса Р<sub>2</sub>, Р<sub>3</sub> (ТФНД-220-3Г).  
 При  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{н}}$  умножаются на 2,5.

Рис. П2-66. ТФНД-220II (снят с производства).  
 1 —  $I_{\text{ном}} = 500/5 \div 1000/5$  класса Р<sub>3</sub>, 0,5; 2 —  $I_{\text{ном}} = 500/5 \div 1000/5$  класса Р<sub>1</sub>, Р<sub>2</sub> и  $I_{\text{ном}} = 750/5 \div 1500/5$  класса Р<sub>3</sub>, 0,5; 3 —  $I_{\text{ном}} = 750/5 \div 1500/5$  класса Р<sub>1</sub>, Р<sub>2</sub>; 4 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5 \div 2000/5$  класса Р<sub>1</sub>, Р<sub>2</sub>; 5 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5 \div 2000/5$  класса Р<sub>3</sub>, 0,5; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{н}}$  умножаются на 2,5.

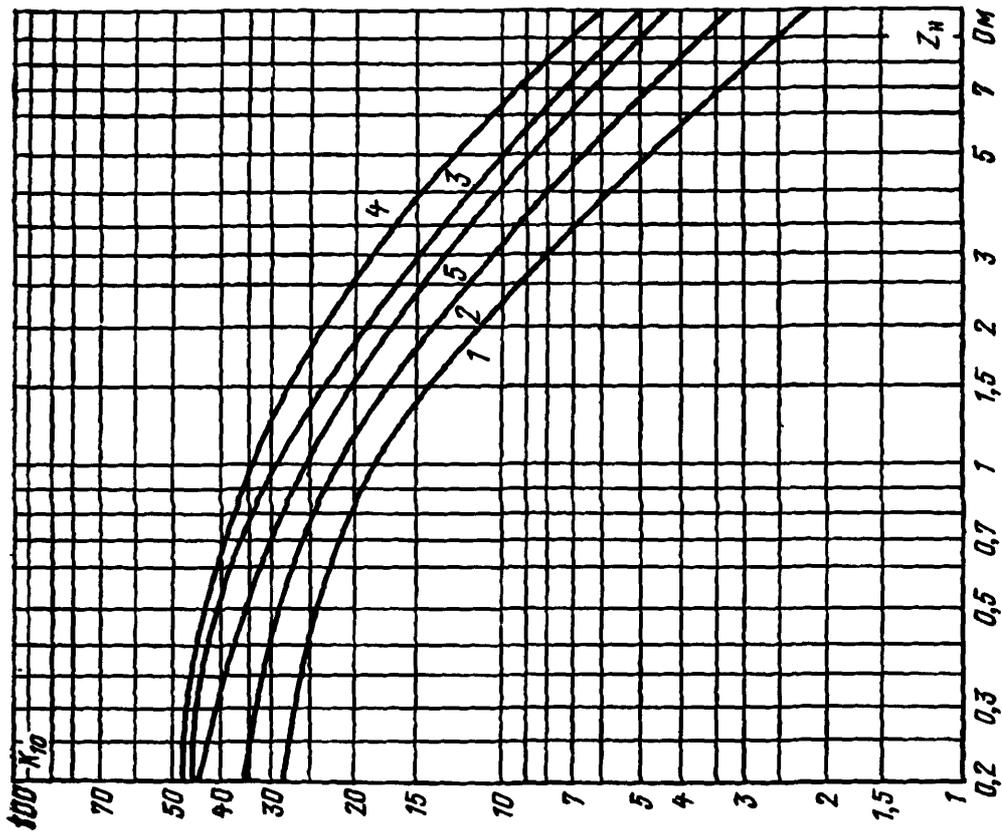


Рис. П2-66.

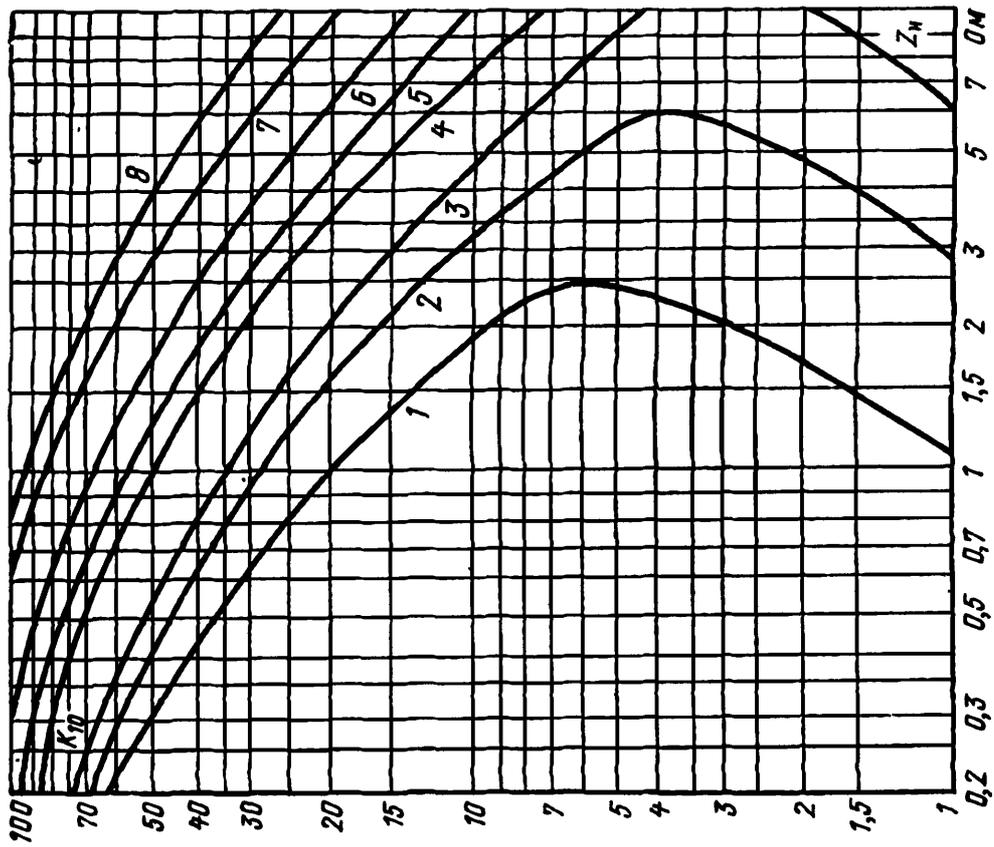


Рис. П2-68

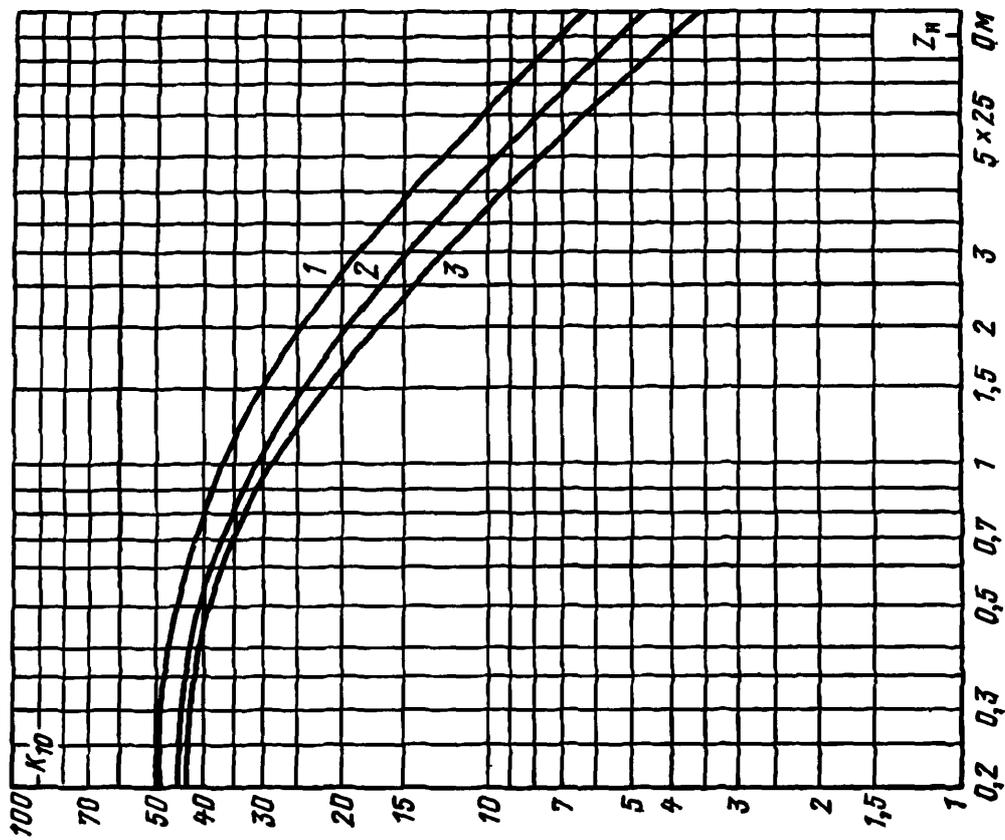


Рис. П2-67.

Рис. П2-67. ТФНД-220-2000 (снят с производства).  
 1 —  $I_{\text{ном}} = 500/1 \div 2000/1$  класса Р; 2 —  $I_{\text{ном}} = 500/1 \div 2000/1$  класса 0,5; 3 —  $I_{\text{ном}} = 400/1 \div 1600/1$  класса Р, 0,5.

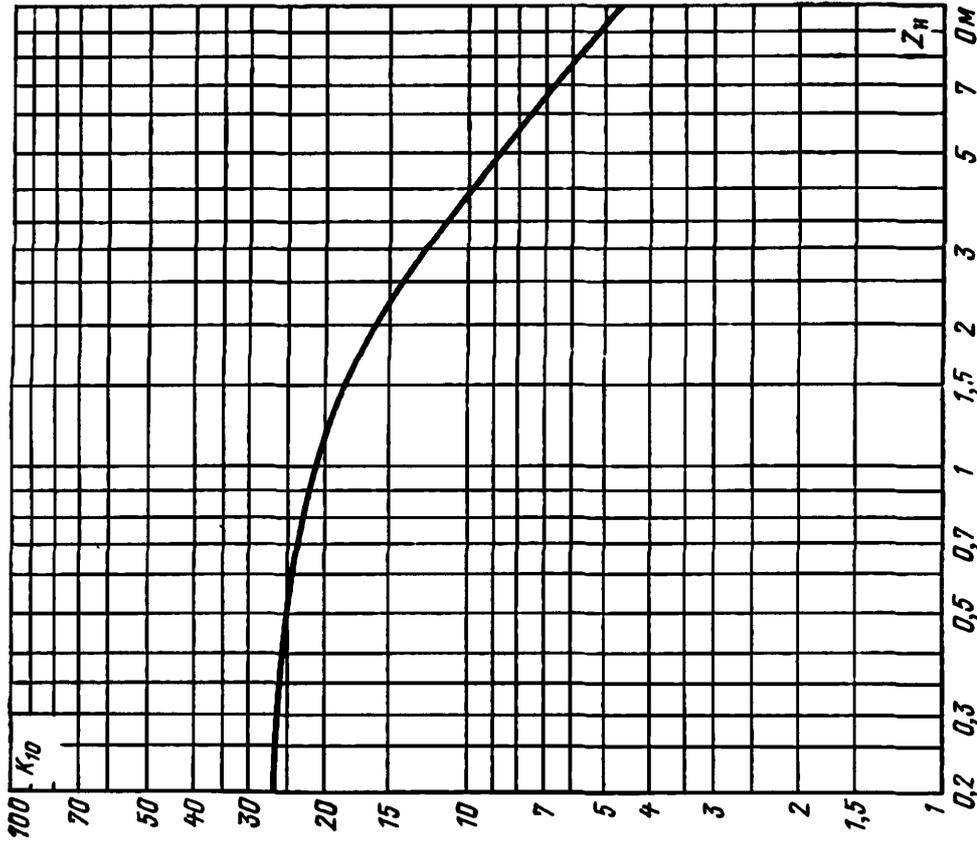


Рис. П2-69.

Рис. П2-68. ТВТ-330.

1 —  $I_{\text{ном}} = 200/5$ ; 2 —  $I_{\text{ном}} = 300/5$ ; 3 —  $I_{\text{ном}} = 400/5$ ; 4 —  $I_{\text{ном}} = 600/5$  (вариант исполнения 600/5); 1500/5 (вариант исполнения 3000/5);  
 5 —  $I_{\text{ном}} = 750/5$  (вариант исполнения 1000/5),  $I_{\text{ном}} = 2000/5$  (вариант исполнения 3000/5); 6 —  $I_{\text{ном}} = 1000/5$  (вариант исполнения 1000/5);  $I_{\text{ном}} = 3000/5$  (вариант исполнения 3000/5); 7 —  $I_{\text{ном}} = 1500/5$  (вариант исполнения 2000/5); 8 —  $I_{\text{ном}} = 2000/5$  (вариант исполнения 2000/5); при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{в}}$  умножаются на 25.

Рис. П2-69. ТКН-330, ТФКН-330.

$I_{\text{ном}} = 500/5 \div 2000/5$ ; при  $I_{2\text{ном}} = 1$  А значения  $Z_{\text{в}}$  умножаются на 25.

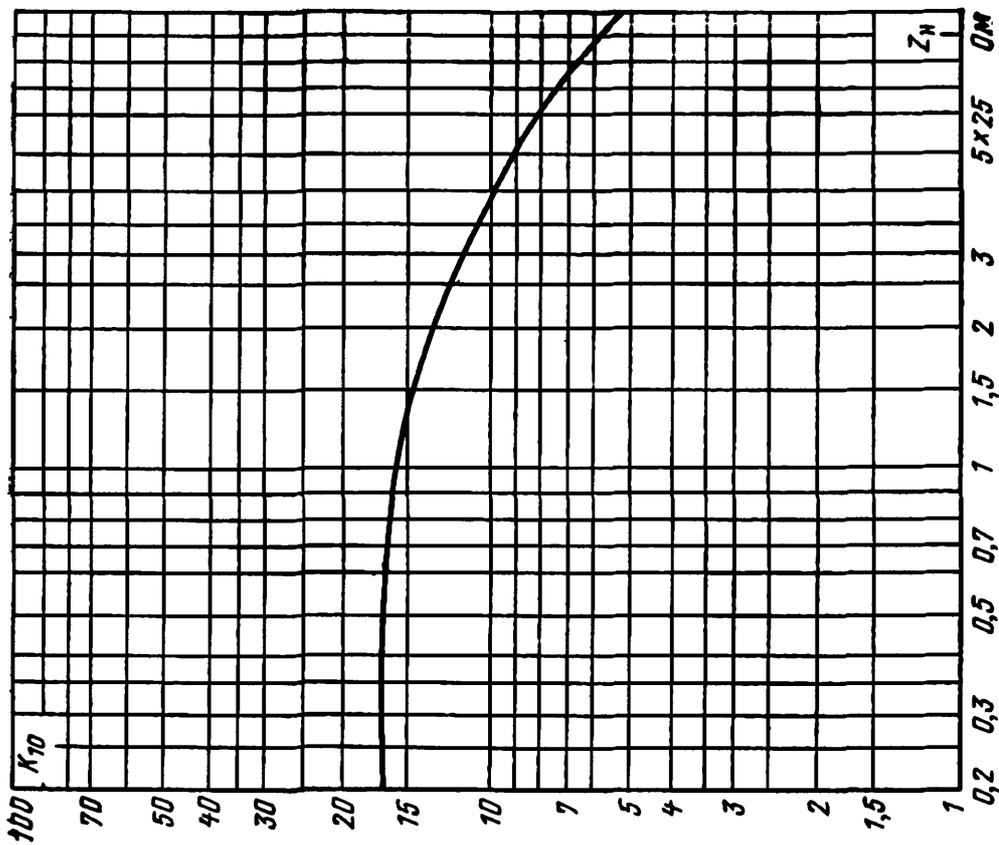


Рис. П2-70. ТРН-330-VI, ТРН-330.

$\lambda_{ном} = 3000/1$  класса P<sub>1</sub>; P<sub>2</sub>: 0,5 (ТРН-330);  $\lambda_{ном} = 3000/1$  клас-  
са P<sub>1</sub>, P<sub>о</sub>, P<sub>о</sub>, P<sub>а</sub>, 0,5; 0,2 (ТРН-330-VI).

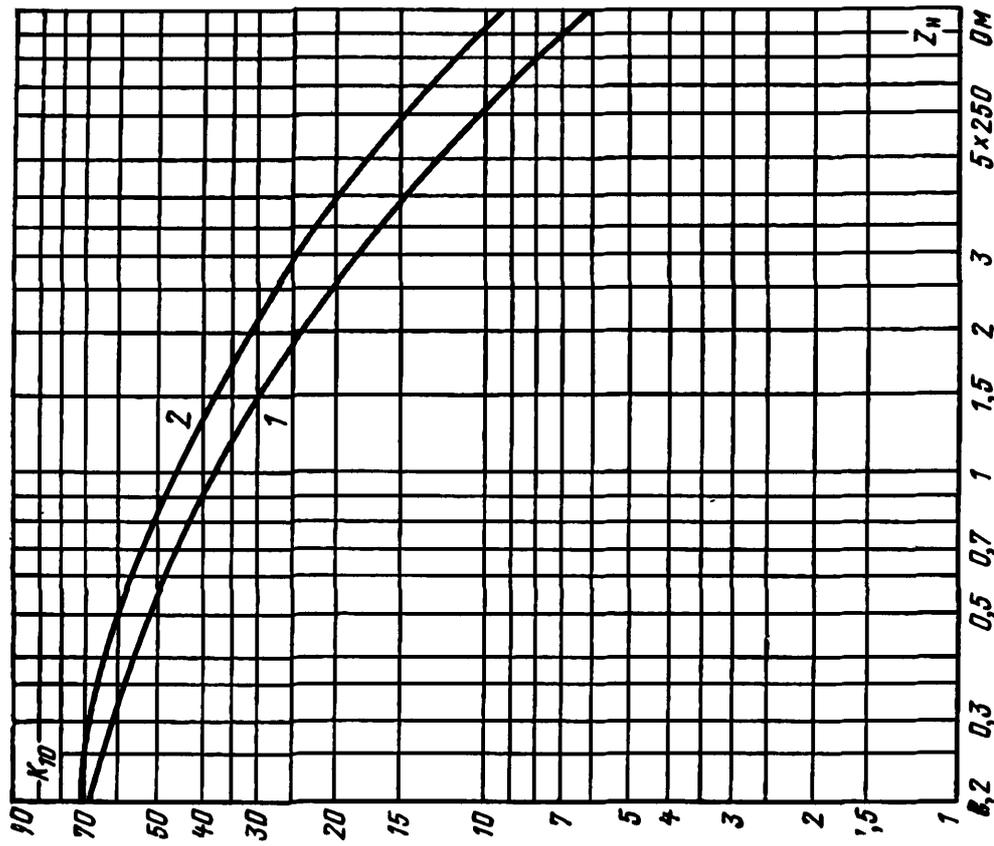


Рис. П2-71. ТВГ-400 и ТВМ-400.

1 —  $\lambda_{ном} = 1000/1$  (ТВГ-400); 2 —  $\lambda_{ном} = 2000/1$  (ТВМ-400).

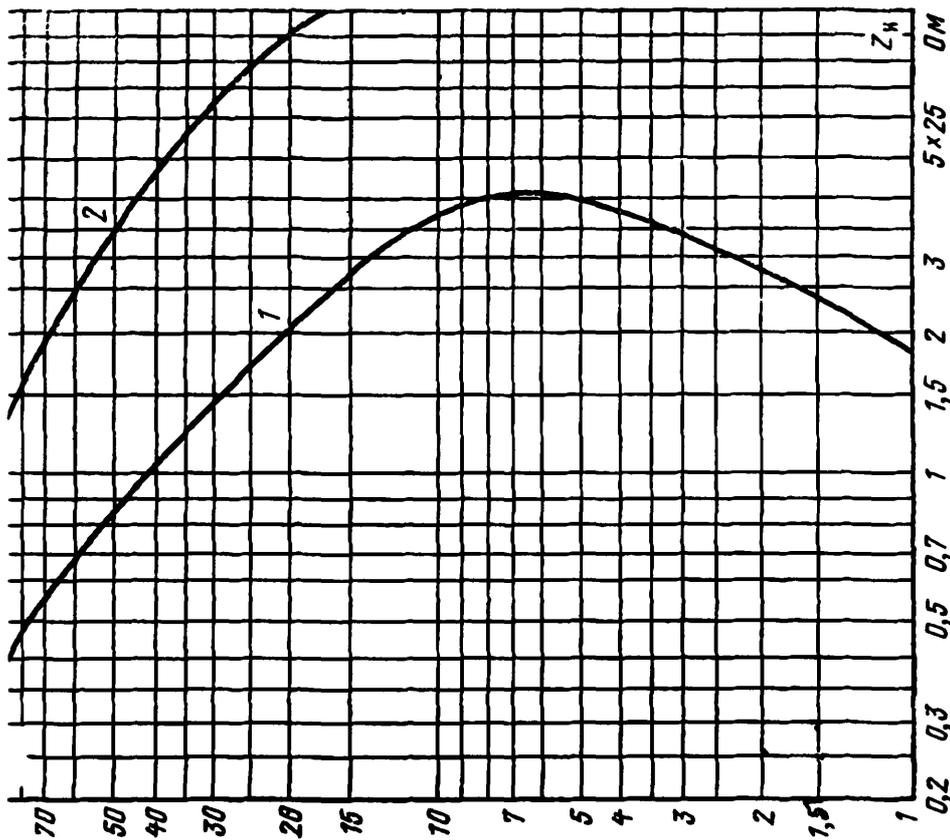


Рис. П-2-73. ТВТ-500-Н.  
 1 —  $n_{НОМ} = 200/l$ ; 2 —  $n_{НОМ} = 750/l$ .

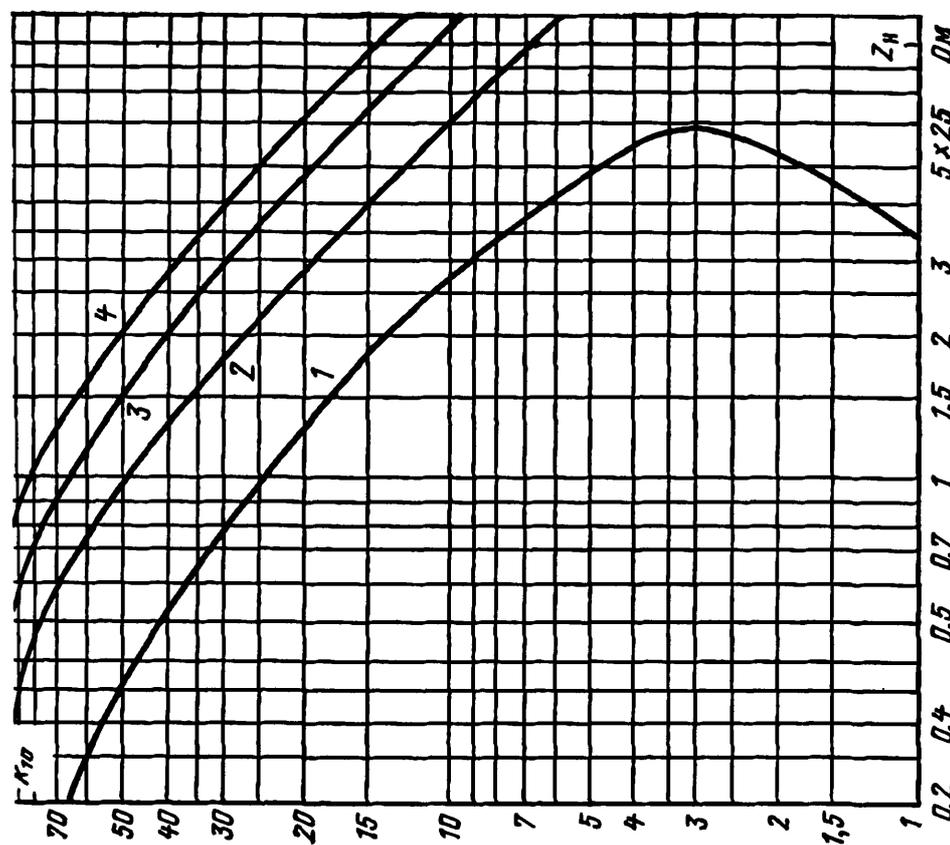


Рис. П-2-72. ТВТ-500 (1500/l), ТВТ-500 (2000/l), ТВТ-500М.  
 1 —  $n_{НОМ} = 500/l$ ; 2 —  $n_{НОМ} = 1000/l$ ; 3 —  $n_{НОМ} = 1500/l$ ; 4 —  $n_{НОМ} = 2000/l$  (ТВТ-500 ТВТ-500М).

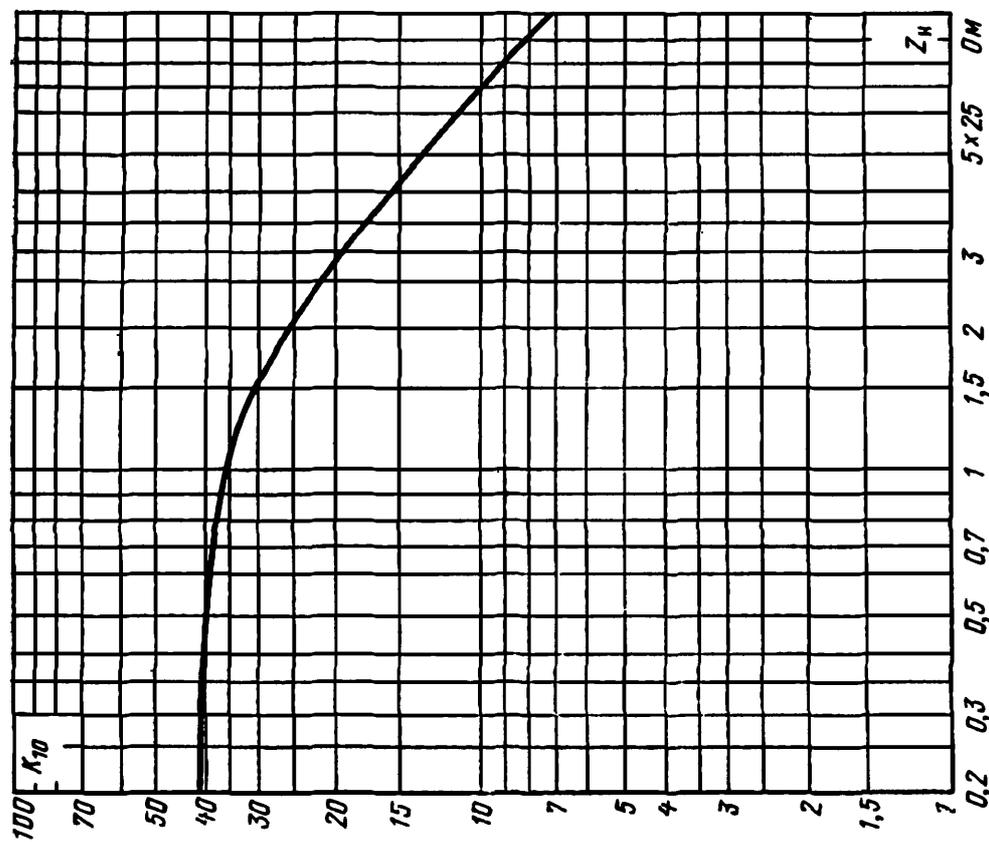


Рис. П2-74. ТРН-500.

$n_{ном} = 1000/1 - 2000/1$  класса Р<sub>1</sub>, Р<sub>2</sub>, Р<sub>3</sub>; 0,5.

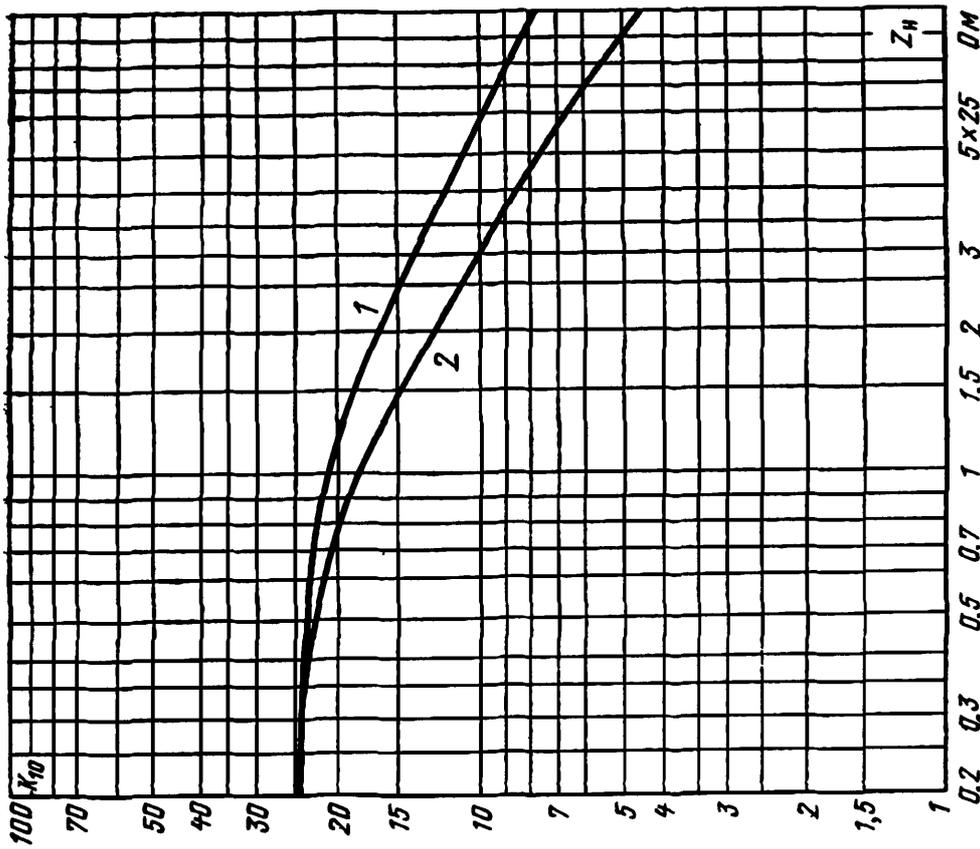


Рис. П2-75. ТФНКД-500, ТФНКД-500Т,  
ТФНКД-50-П.

1 —  $n_{ном} = 500/1 + 1000/1 + 2000/1$ , 1000/1 + 2000/1 класса Р; 2 —  $n_{ном} = 500/1 + 1000/1 + 2000/1$  класса 0,5.

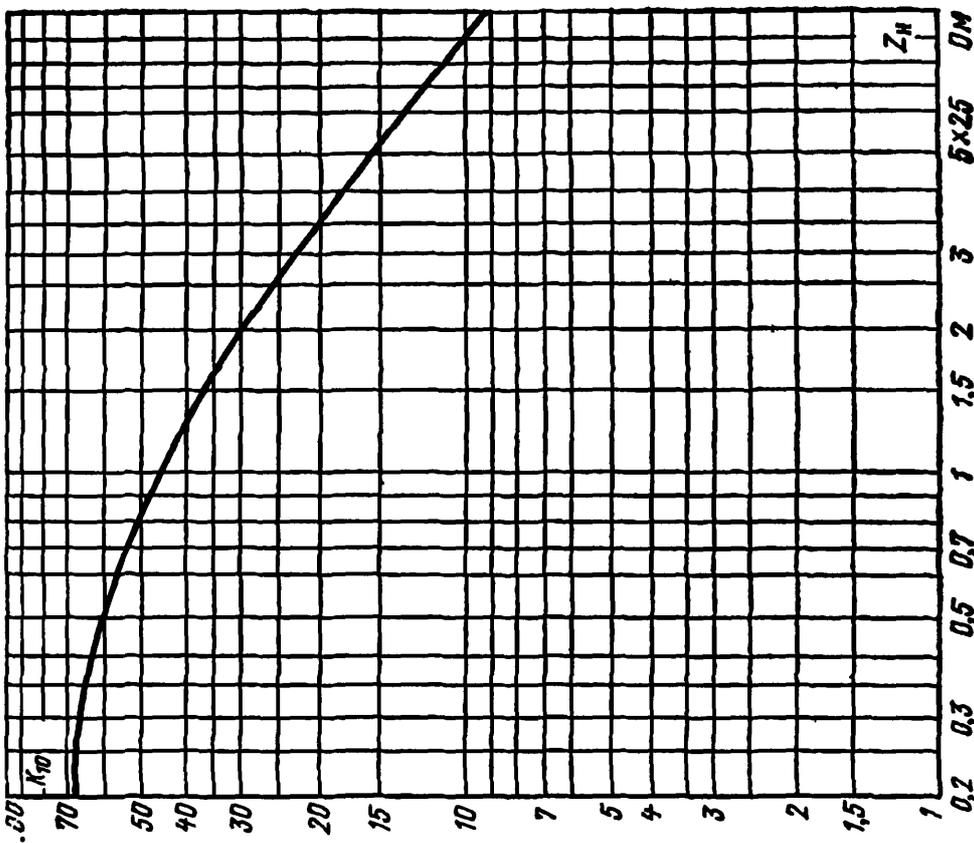


Рис. П2-76. ТВМ-750.  
 $n_{НОМ} = 2000/л.$

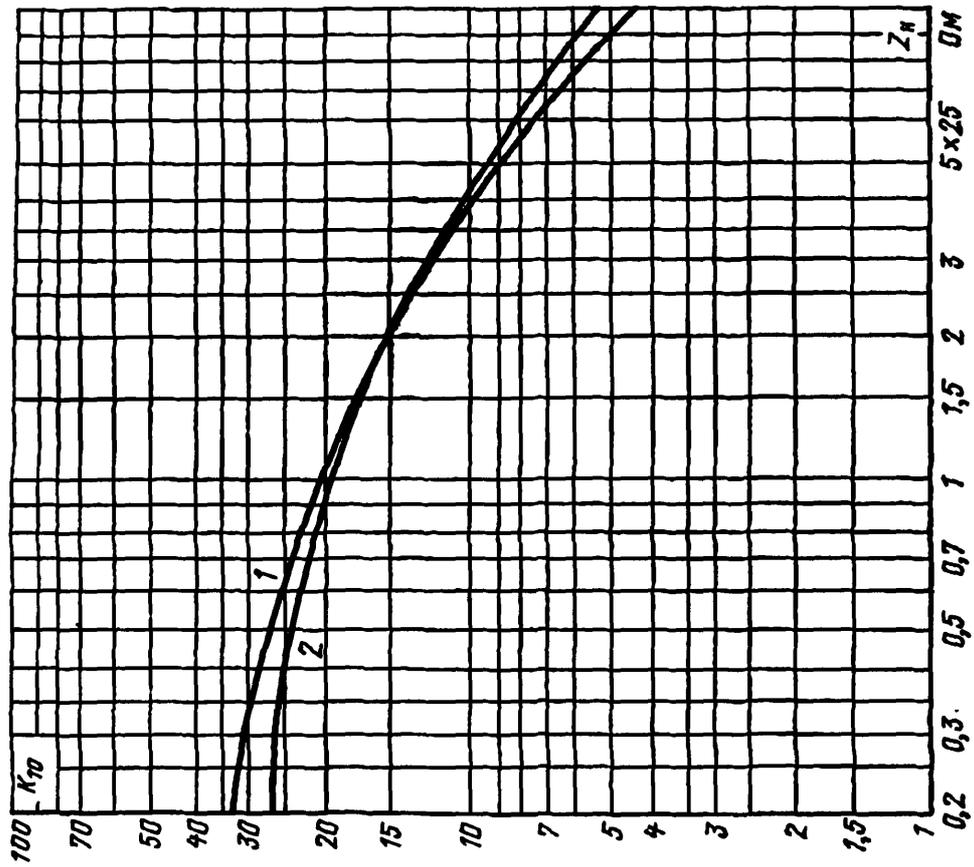


Рис. П2-77. ТРН-750.  
 1 —  $n_{НОМ} = 1000/л \div 2000/л, 1500/л \div 3000/л, 2000/л \div 4000/л$  класса Р1;  
 Р4; 2 —  $n_{НОМ} = 1000/л \div 2000/л, 1500/л \div 3000/л, 2000/л \div 4000/л$  класс-  
 са Р2, Р3, 0,5.

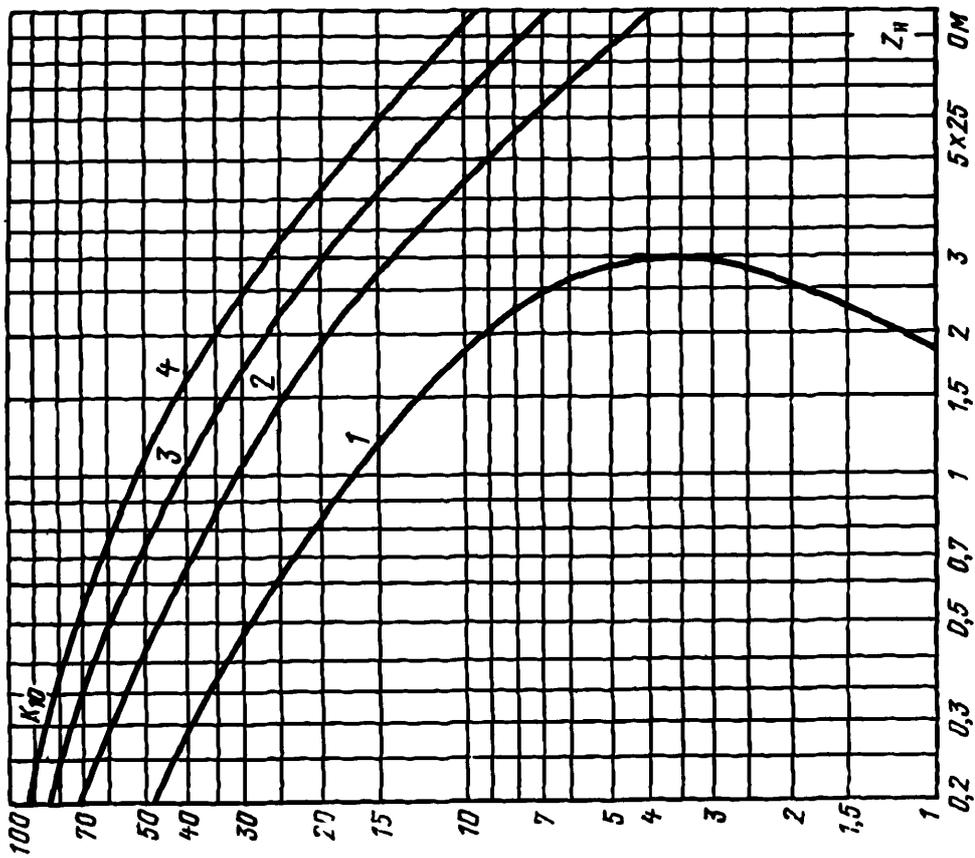


Рис. П2-78. ТВТ-1200.

1 -  $n_{ном} = 500/1$ ; 2 -  $n_{ном} = 1000/1$ ; 3 -  $n_{ном} = 1500/1$ ; 4 -  $n_{ном} = 2000/1$

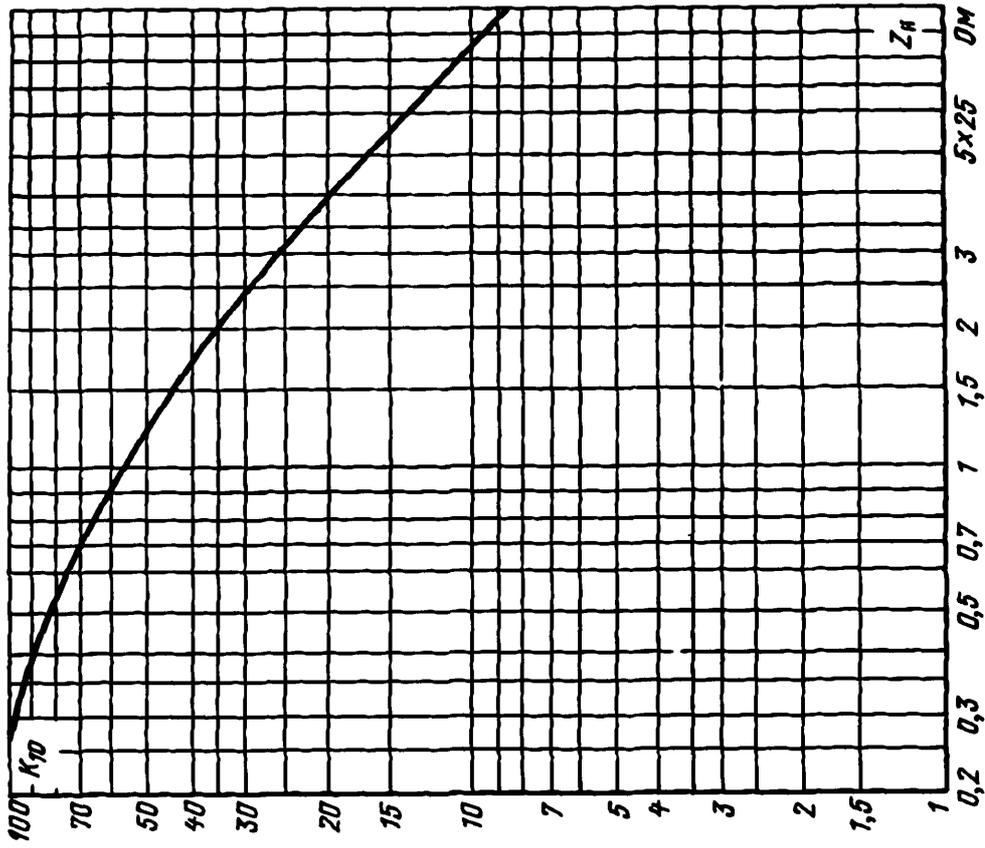


Рис. П2-79. ТВВ-1500.

$n_{ном} = 2000/1$

ПЗ. ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА  $I_{2 \text{ ном}} = 5 \text{ А}$

Тип ТТ, % ржс.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{\text{ном}}$ Ом	$K_{10 \text{ ном}}$	$Q \times 10^{-4}, \text{ м}^2$	$I_{\text{ср}}$ м	$\psi_2$	$R_{2B}$ Ом	$X_{2B}$ Ом	
ТПЛ-10 П2-1	Р; Р/Р; 0,5/Р	5—300	Р	0,6	13	11,9	0,48	119	0,22	0	
		400	0,5	0,4	5	7,5		159	0,18	0,22	
			Р	0,6	13	11,2				0,28	0,1
			0,5	0,4	5	7,0				0,24	0,2
ТПЛ-10К П2-2	0,5/Р; Р/Р	5—60	Р	0,6	12	12,75	0,362	120	0,123	0,02	
		100—300	0,5	0,4	—						
		400	Р	0,6	12						
		600	0,5	0,4	—						
		800	Р	0,6	12						
		1000	0,5	0,4	—						
		1500	Р	0,6	17						
			0,5	0,4	—						
			Р	0,6	17						
			0,5	0,4	—						
ТПЛУ-10 П2-3	Р; Р/Р; 0,5/Р	5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 100	Р	0,6	13	11,9	0,52	120	0,22	0	
			0,5	0,4	5	7,5				0,185	



Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рас.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$w_2$	$R_2$ , в' Ом	$X_2$ , в' Ом
ТЛМ-10 П2-7	300	5—300	P 0,5	0,6 0,4	13 10	14 9,1	0,39	119	0,21 0,18	0,07 0,3
	400	400	P 0,5	0,6 0,4	15 12	14 9,1		159	0,29 0,24	0,35 0,55
ТЛМ-10 П2-6	300	50—300	P 0,5	0,6 0,4	17 10	18,8 9,2	0,434	119	0,21 0,18	0,45 0,44
	800	400—800	P 0,5	0,6 0,4	20 12	18,8 9,2		159	0,32 0,24	0,54 0,56
	1000	1000	P 0,5	0,6 0,4	17 12	12,4 8,4		199	0,27 0,22	0,58 0,82
	1500	1500	P 0,5	0,6 0,4	20 15	12,4 8,4		299	0,43 0,38	0,88 0,95
ТШЛ-10; ТШЛ-10К П2-8	P/P; P/0,5	2000	P 0,5	1,2 0,8	25 20	15,3 7,65	0,817	400	0,42 0,28	0,5 0,3
		3000	P 0,5	1,2 0,8	25 20	15,3 7,65		600	0,54 0,36	0,67 0,52
		4000	P 0,5	1,2 0,8	25 20	15,3 7,65		800	0,72 0,48	1,0 0,54
		5000	P 0,5	1,2 0,8	25 20	15,3 7,65		1000	0,9 0,6	1,03 0,65
ТШЛП-10 П2-9	P/P; 0,5/P	1000	P 0,5	1,2 0,8	25 20	27 13,5	0,637	200	0,3 0,125	0,1 0

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м <sup>2</sup>	$l_{ср}$ , м	$\omega_2$	$R_{2в}$ Ом	$X_{2в}$ Ом
ТШЛП-10к П2-10	Р/Р; 0,5/Р	2000	Р 0,5	1,2 0,8	25 20	27 13,5	0,637	400	0,45 0,2	0,5 0
		Все кром ме 400	0,5 1 3 0,5 1 3	0,6 0,6 1,2 0,6 0,6 1,2	9 6 9 5	10,2 7,3 10,2 5,1	0,44	119 118 118 159 159 157	0,23 0,22 0,39 0,29	0
ТПФМУД-10 П2-12	—	75 100 150 200 300	Д	0,6	17	20,4	0,44	172 170 165 110 150	0,58	0
		Все кром ме 400	0,5 1 3	0,6 0,6 1,2	8 3	10,2 7,3		119 118 118	0,23 0,22	
ТПФМУУ-10 П2-13	—	5—40 200 50—100 150	3	1,2	4 5	20,4	0,44	58 68 73,5	0,17 0,19 0,21	0

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{\text{ном}}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м³	$l_{\text{ср}}$ , м	$\omega_1$	$R_{2 \text{ в'}}$ , Ом	$X_{2 \text{ в'}}$ , Ом				
ТПОФ-10; ТПОФУ-10 П2-14		400	1	2	5	20,2	0,558	79	0,15	0				
		600	3	0,8	3,5	24,2		78	0,15					
		800	0,5	20	119,5	0,24								
			1	5	119	0,18								
			3	3,5	116									
		1000	Д	0,8	25	24,2		160	0,3					
			0,5	18	16,2	0,27								
			1	6	12,1									
		1500	3	2	5	12,1		159						
			Д	0,8	24	24,2		156	0,4					
			0,5	2	5	8,1		200	0,27					
		ТОЛ-10 П2-15	50—300	50; 100; 150;	Р	0,6		18	15		0,361	120	0,166	0
				200; 300	0,5	0,4		13	7,5					
				400	Р	0,6		22	15					
		600	400	600	0,5	0,4		17	7,5		160	0,224		
800	Р			0,6	18	15	120	0,153						
	0,5			0,4	13	7,5	160	0,224						
800	800	800	Р	0,6	22	15	160	0,188						
			0,5	0,4	17	7,5	160	0,229						
			0,5	0,4	17	7,5	160	0,205						

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рас.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ м	$\psi_1$	$R_{2в}$ Ом	$X_{2в}$ Ом
	1000	1000	P	0,6	18	10,5	0,385	200	0,342	
	1500	1500	0,5 P	0,4	14	5,25			0,225	
			P	0,6	29	10,5		300	0,537	
			0,5	0,4	17	5,25			0,363	
ТВТ-10/30 П2-16	2000	800	—	1,2	7,0	15	1,02	157	0,23	0,22
		1000			10			198	0,29	0,24
		1500			14			299	0,435	0,85
		2000			11			399	0,58	0,84
П2-17	4000	2000			16			400	0,58	0,84
		3000			12			600	0,87	1,27
		4000						800	1,15	1,62
ТВТ-10/50 П2-18	5000	3000	—	1,2	16	15	1,02	600	0,87	1,01
		4000			12			800	1,15	1,5
		5000			10			1000	1,45	1,56
ТВ-10/20 П2-16	2000	800	—	1,2	7	9,0	0,78	160	0,23	0,22
		1000			10			200	0,29	0,24
		1500			13			300	0,435	0,85
		2000			10			400	0,58	0,84

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$l_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{\text{ном}}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{\text{ср}}$ , м	$w_2$	$R_2$ в, Ом	$X_2$ в, Ом
ТВ-10/50 П2-17	4000	2000	—	1,2	10	9,0	0,78	400	0,58	0,84
		3000							0,87	1,27
		4000							1,15	1,62
ТВ-10/60 П2-18	5000	3000	—	1,2	16	15	1,02	600	0,87	1,01
		4000							1,15	1,5
		5000							1,45	1,56
ТВТ-10 П2-19	400 5000 6000 12 000	400	—	1,2	—	10,8	0,6	78	0,014	—
		5000							8,1	0,5
		6000							12	1,14
		12 000							24	31,5
ТШВ-15 П2-20	P/0,5	6000	P 0,5 P 0,5	1,2	15	8,0	1,8	1200	—	—
		8000							1600	—
ТШЛ-20-1; ТШЛ-20Б-1 П2-21	—	6000	P/0,5	1,2	16	6,85	1,64	1200	—	—
		8000							1600	—
		10 000							2000	—
ТШЛ-20-11; ТШЛ-20Б-11 П2-21	—	12 000	—	1,2	20	8,0	1,9	2400	—	—

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$QX \cdot 10^{-4}, м^2$	$l'_{ср}$ м	$\omega_a$	$R_{2в}$ Ом	$X_{2в}$ Ом
ТШЛ-20Б-III П2-21		18 000	—	1,2	8	6,75	2,6	3600	—	—
ТПОЛ-20; ТПОЛ-35 П2-22	P/1; P/P	400	P	0,6	13	21,3	0,44	80	0,17	0
	P/0,5; P/P	600	P	0,8	11	17		79,5	0,15	—
	P/0,5; P/P	800	0,5		18	21,3		120	0,25	0,04
	P/0,5; P/P	1000	P	1,2	15	17		119,5	0,22	0,03
	P/0,5; P/P	1500	0,5	0,8	16	21,3		160	0,33	0,2
				P	2,0	18	12,8		159,5	0,24
ТШБ-24		24 000	P	2,0	5,0	6,65	3,56	4800	—	—
		12 000	P <sub>1</sub> , P <sub>2</sub> , P <sub>3</sub>	1,2	2,0	3,6	1,54	2400	—	—
		1500	P <sub>1</sub> ; P <sub>2</sub>	0,8	7,0	13,5	0,722	300	0,39	—
ТШЛО-20		1500	P	0,8	5	6,4	0,48	300	0,22	—
ТШФА-10; ТШФА-20; ТШФ-20 П2-23		2000	Д	1,2	30	19,1	1,02	399	0,65	0
			0,5	2	20	10,2	1,07	399	0,5	
			3		5	5,1		393	0,34	

Тип ТТ, № ржс.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м <sup>2</sup>	$l_{ср}$ , м	$\omega_1$	$R_{2в}$ , Ом	$X_{2в}$ , Ом
		3000	Д 0,5	1,2	40	19,1	1,02	599	0,98	
		4000	Д 0,5	2	14	5,1		599	0,56	
		5000	Д 0,5	1,2	7	5,1	1,07	594	0,53	
		6000	Д 0,5		30	12,7		798	0,85	
			Д 0,5		18	7,6	1,07	798	0,7	
			Д 0,5		23	7,6		998	0,86	
			Д 0,5	2		7,6	1,085	998	0,86	
			Д 0,5		10	6,35		1196	1,0	
			Д 0,5			4,25		1196	0,9	
ТПОФ-20	—	400	Д 1	0,8	20	33	0,77	80	0,2	0
П2-24		600	Д 0,5	2	6	33		79,5		
		800	Д 0,5	0,8	28			77	0,3	
		1000	Д 0,5	2	6	22		120	0,24	
			Д 0,5	0,8	35	33		119,5	0,38	
			Д 0,5	2	20	22		117	0,33	
			Д 0,5	0,8	4	11		160	0,26	
			Д 0,5	2	35	33		156	0,47	
			Д 0,5	0,8	20	16		200	0,36	
			Д 0,5	2	5	11		199	0,33	
			Д 0,5	0,8	20	22		197	0,58	
			Д 0,5		10	11		300	0,49	

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$\omega_3$	$R_2$ , в. Ом	$X_2$ , в. Ом		
ТМГД-35; ТМГ-35 П2-25	300	100	—	0,4	8	47	0,565	19	—	—		
		150		0,4	13							
		200		1,2	7							
		300		0,4	30							
		200		0,8	11							
	600	300	1,2	11								
		400	0,4	30								
		600	0,8	30								
		80										
		120										
ТДВ-35 П2-26	150	50	—	—	—	31	0,434	8	0,03	0,05		
		75		0,8	13						0,04	0,05
		100		1,2	18						0,05	0,062
		150		0,8	29						0,08	0,1
		100		1,2	18						0,05	0,08
	300	150	1,6	28	0,08	0,15						
		200	3	38	0,1	0,15						
		300	1,6	59	0,16	0,1						
		200	3	38	0,1	0,1						
		300	4	59	0,16	0,2						
	600	400	3	79	0,2	0,1						
		600	3	119	0,3	0,1						
		75	—	14	0,02	0,1						
		100	0,8	19	0,02	0,15						
		150	2	29	0,04	0,1						
ТВДМ-35; ТВМ-35 П2-27	200	200	—	—	—	28	0,57	14	0,02	0,1		
		150	—	—	—	—	—	19	0,02	0,15		
		200	—	—	—	—	—	29	0,04	0,1		
			3					39	0,05			

Приложение ПЗ

Тип ТТ, № рас.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$\omega_3$	$R_3$ в. Ом	$X_2$ в. Ом	
ТВДМ-35-1 П2-28	300	100		0,8	—			19	0,036	0,15	
		150		2,0	—			29	0,04		
		200			3	3		39	0,05	0,1	
		300		2,0	5,5	3		60	0,07	0,2	
		200			3	5,5		39	0,05	0,3	
	600	300		2	7	7		60	0,07	0,09	
		400		3	8	8		79	0,095	0,4	
		600		3	8	8		120	0,142	0,09	
		750			10	10		120	0,225	0,26	
		1000			12	12		150	0,285	0,59	
	1500	1500			18	18		200	0,376	0,1	
								300	0,570		
		200	75	—	0,8	—	29,7	0,58	14	0,017	—
		300	100			5			19	0,034	—
		600	150			7			29	0,049	0,29
	200				5			39	0,068	0,11	
	300	100			7			19	0,034	—	
	600	150			5			29	0,049	0,3	
	200	200			7			39	0,068	0,1	
	300	300			10			60	0,098	0,12	
	600	200			7			39	0,068	0,1	
		300			10			60	0,098	0,12	
		400			13			79	0,136	0,26	
		600			20			120	0,196	0,03	

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м³	$l_{ср}$ , м	$w_2$	$R_{2в}$ , Ом	$X_{2в}$ , Ом	
ТВД-35МКП П2-29	200	75	—	0,8	—	28	0,5	14	0,02	0,1	
		100		2				19	0,026	0,15	
		150		0,8				29	0,04	0,1	
	300	200		2				39	0,05	0,147	
		100		2				19	0,026	0,155	
		150		2				29	0,04	0,15	
	600	200		0,8				39	0,05	0,11	
		300		2				60	0,05	0,11	
		200		0,8				39	0,05	0,2	
		300		2				60	0,07	0,3	
		400		2				79	0,095	0,31	
		600		1,2				120	0,142	0,1	
	1500	600		1,2				16	0,195	0,4	
		750		3				10	0,245	0,12	
		1000		3				12	0,326	0,6	
1500		3	17	0,495	0,12						
ТВТ-35М П2-30		300	100	—	0,6	—	46,8	0,88	18	0,053	—
			150		29				0,08	—	
	600	200	9		39				0,105	0,15	
		300	8		59				0,158	0,3	
	1000	400	20		80				0,21	0,4	
		600	15		119				0,316	0,32	
	3000	750	20		149				0,39	0,47	
		1000	1,2		199				0,53	1,1	
		1500	1,6		300				0,78	1,0	
		2000	1,2		400				1,05	1,06	
	3000	1,2	600		1,58				1,58		

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}, M^2$	$l_{ср}, M$	$\omega_2$	$R_2$ в, Ом	$X_2$ в, Ом
ТВТ-35М*	300	$\left. \begin{matrix} 100 \\ 150 \\ 200 \\ 300 \\ 400 \\ 600 \\ 750 \\ 1000 \\ 1500 \\ 2000 \\ 3000 \end{matrix} \right\}$	—	15	—	46,8	0,88	100	0,91	—
	600			30	9			150	1,37	—
	1000			20	8			200	1,8	6,4
	3000			30	20			300	2,5	11
ТВТ-35С	4000	$\left. \begin{matrix} 1000 \\ 2000 \\ 3000 \\ 4000 \end{matrix} \right\}$	—	1,2	20	46,8	1,21	199	0,53	0,54
	4000			30	20			400	1,05	1,16
				30	20			600	1,58	1,86
				30	24			800	2,1	2,1
ТВТ-35С*	4000	$\left. \begin{matrix} 1000 \\ 2000 \\ 3000 \\ 4000 \end{matrix} \right\}$	—	30	20	46,8	1,55	1000	9,1	17,2
	4000			30	20			2000	18	39
				30	24			3000	27	56
				30	24			4000	36	67
ТВ-35/10 П2-31	150	$\left. \begin{matrix} 50 \\ 75 \\ 100 \\ 150 \end{matrix} \right\}$	—	0,8	—	28	0,59	8	0,02	0,07
	150			0,8	—			14	0,02	0,3
				1,2	2			18	0,04	0,18
				1,2	2			28	0,05	0,2

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$w_s$	$R_{2в}$ Ом	$X_{2в}$ Ом	
ТБТ-35/10 П2-32	300	100		0,8	—			18	0,04	0,18	
		150		1,2	2			28	0,05	0,2	
		200		1,6	2			38	0,1	0,36	
		300		1,2	7			59	0,15	0,34	
		200		1,6	2			38	0,1	0,36	
		300		1,2	7			59	0,15	0,4	
		400		1,6	8			79	0,2	0,49	
		600		1,2	14			119	0,3	0,43	
	200	75			0,8	—	15	1,02	14	0,02	—
		100			0,8	—			19	0,026	—
		150			1,2	5			29	0,05	0,23
		200			1,6	8			39	0,1	0,42
		100			0,8	—			19	0,026	—
		150			1,2	5			29	0,05	0,23
300	100			1,6	9			39	0,1	0,42	
	150			1,2	25			29	0,15	0,25	
	200			1,6	9			39	0,1	0,36	
	300			1,2	25			60	0,15	0,25	
600	200			1,6	12			60	0,1	0,36	
	300			1,2	30			39	0,15	0,25	
	400			1,6	17			60	0,2	0,25	
	600			1,2	30			80	0,3	0,26	
1500	600			1,6	17			119	0,3	0,1	
	600			1,2	17			119	0,3	0,1	
	750			1,6	14			150	0,245	0,04	
	1000			1,2	10			200	0,326	0,14	
		1500			47			300	0,495	0,25	

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$\omega$ ,	$R_3$ в', Ом	$X_2$ в', Ом	
ТВ-35/25 П2-31	200	75	—	0,8	—	28	0,59	14	0,02	0,1	
		100		1,2					18	0,04	0,15
		150		1,6					28	0,05	0,15
		200		0,8					38	0,1	0,1
		100		1,2					18	0,04	0,1
		150		1,6					28	0,05	0,15
		200		1,2					38	0,1	0,15
	300	200	1,2	5	16	59	0,1	0,1	0,15	0,1	
		300	1,6	8	16	38	—	0,1	0,15	0,15	
		200	1,2	16	12	59	0,2	0,2	0,3	0,3	
		300	1,6	30	119	79	0,3	0,3	0,4	0,4	
		600	1,2	17	20	119	0,3	0,3	0,4	0,4	
		1500	1,2	22	150	150	0,245	0,245	0,6	0,6	
		1500	1,2	16	200	200	0,326	0,326	0,6	0,6	
ТВС-35/6,3 П2-33	150	75	—	0,8	5	38,2	0,47	14	0,019	0,06	
		100		7				19	0,025	0,1	
		150		6				29	0,04	0,06	
	300	100		7				19	0,025	0,1	
		150		6				29	0,04	0,1	
		200		8				40	0,053	0,15	
300	1,2	10	60	0,08	0,2	0,2	0,2				

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ , Ом	$K_{г\theta}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$I_{ср}$ , м	$\psi_2$	$R_2$ в, Ом	$X_2$ в, Ом									
	400	150		1,2	6			30	—	—									
		200						40											
		300						60											
		400						80											
ТВС-35/50 П2-34	1200	600	—	1,2	25	38,2	0,755	120	0,1	0,36									
		800			30			160			0,14								
		1000			36			200			0,177								
		1200			41			240			0,21								
		1000			36			200			0,177								
		1200			41			240			0,21								
		1500			33			300			0,1								
		2000			25			400			0,13								
		1200			41			240			0,21								
		1500			33			300			0,1								
		2000			25			400			0,13								
		3000			16			600			0,18								
ТВС-35/50* П2-34	1200	600		30	25	38,2	0,755	600	2,0	9,4									
		800			30			800			2,67								
		1000			36			1000			3,3								
		1200			41			1200			4,0								
		1000			36			1000			3,3								
		1200			41			1200			4,0								
		1500			33			1500			5,1								
		2000			25			2000			6,6								
		2000			2000			600				30	25	38,2	0,755	600	2,0	9,4	
								800					30			800			2,67
								1000					36			1000			3,3
								1200					41			1200			4,0
1000	36		1000	3,3															
1200	41		1200	4,0															

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$w_2$	$R_{2в}$ , Ом	$X_{2в}$ , Ом	
ТФНД-33Т П2-35	3000	1200			41			1200	4,0	17,5	
		1500			33			1500	5,1	9,7	
		2000			25			2000	6,6	10,7	
		3000			16			3000	10	8,3	
	100	100		$P_1, P_2$ 0,5	1,2	20	19,8	0,8	240	0,4	0,45
		150	75			12	10,1	0,4	180	0,3	—
			150		$P_1, P_2$ 0,5		8	19,8	0,8	240	0,4
		200	100				12	10,1	0,44	160	0,27
	200			$P_1, P_2$ 0,5		8	19,8	0,8	240	0,4	0,45
	300	150				20	19,8	0,8	180	0,3	—
		300		$P_1, P_2$ 0,5		12	10,1	0,44	240	0,4	0,45
	400	200				8	19,8	0,8	160	0,27	—
		400		$P_1, P_2$ 0,5		20	19,8	0,8	240	0,4	0,45
	600	300				12	10,1	0,44	180	0,3	—
		600		$P_1, P_2$ 0,5		8	19,8	0,8	240	0,4	0,45
	1200	400				20	19,8	0,8	160	0,27	—
1200			$P_1, P_2$ 0,5		12	10,1	0,44	240	0,4	0,45	
	800				8	19,8	0,8	160	0,27	—	

Тип ТТ, № ржс.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}, \text{м}^2$	$l_{ср}$ м	$w_2$	$R_{2в}$ Ом	$X_{2в}$ Ом
ТФНД-35М П2-36	15—600	—	$P_1', P_2$ 0,5	0,8	30	19,2	0,82	239	0,45	0
	800		$P_1', P_2$ 0,5	1,2	14	12,8	0,45	319	0,42	0
	1000		$P_1', P_2$ 0,5	1,2	33	25,3	0,79		0,64	0,85
	1500		$P_1', P_2$ 0,5	0,8	16	12,8	0,45	399	0,53	0,4
	2000		$P_1', P_2$ 0,5	1,2	38	19,2	0,86		0,65	0,7
				$P_1', P_2$ 0,5	1,2	13	8	0,48	299	0,62
ТФНР-35 П2-37	500—1000	500—1000	$P_1', P_2$ 0,5	2,0	20	28,35	0,88	200	0,39	0,5
	2000	2000	$P_1', P_2$ 0,5	1,2	12	11,8	0,463	400	0,323	0
	3000	3000	$P_1', P_2$ 0,5	2,0	18	20,25	0,816		0,65	0,27
			$P_1', P_2$ 0,5	1,2	15	8,45	0,48	600	0,6	0,5
			$P_1', P_2$ 0,5	2,0	20	15,75	0,864		1,03	1,3
			$P_1', P_2$ 0,5	1,2	12	6,75	0,518		1,08	0
ТФНР-35* П2-37	1000	1000	$P_1', P_2$ 0,5	50	20	27	0,85	995	4,9	12,5
	2000	2000	$P_1', P_2$ 0,5	30	12	11,8	0,46	997	4,6	2,35
	3000	3000	$P_1', P_2$ 0,5	50	20	24,75	0,93	1996	11,1	27
			$P_1', P_2$ 0,5	30	12	6,7	0,52	1997	10,85	0
			$P_1', P_2$ 0,5	50	20	19,3	0,997	2997	16,75	57
			$P_1', P_2$ 0,5	30	12	6,75	0,58		18,72	0

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-3}, м^3$	$l_{ср}$ м	$\omega_2$	$R_2$ в Ом	$X_2$ в Ом
ТФН-35М П2-38	—	15—600	Д	1,2	26	25,5	0,77	239	0,49	0,31
		800	0,5	2	9	12,8	0,455	319	0,43	0,39
		1000	0,5	1,2	30	25,5	0,77	399	0,65	0,29
			0,5	2	11	12,8	0,455	399	0,58	0,49
			0,5	1,2	35	25,5	0,77	399	0,85	0,49
			0,5	2	13	12,8	0,455	399	0,71	0,37
ТФНД-35 П2-39	—	15—600	Д	4	8	18,7	0,8	239	0,415	0,3
		800	0,5	2,4	6	9,50	0,44	319	0,396	0
		1500	0,5	4	9,5	18,7	0,8	299	0,55	0,5
		1000—2000	0,5	2,4	8	9,56	0,44	399	0,487	0
			0,5	4	8	18,7	0,8	399	0,52	0,5
			0,5	2,4	7,5	9,56	0,44	399	0,487	0
			0,5	4	9,5	17	0,85	399	0,65	0,5
			0,5	2,4	12	12,75	0,503	399	0,695	0
ТФНУД-35М П2-40	15—600	15—600	Р	0,8	30	19,2	0,82	239	0,45	—
			Р	0,8	30	12,8	0,45		0,47	
			0,5	1,2	14					
ТВТ-66Т П2-41	600	200	—	0,6	15	51,3	0,97	40	0,155	0,2
		300						60	0,23	0,03
		400						80	0,385	0,2
		600						120	0,7	0,5
		400						80	0,29	0,35
		600						120	0,59	0,635
	1200			2	20			240	1,48	0,64

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$QX \cdot 10^{-4}, M^2$	$l_{ср}$ , м	$\omega_1$	$R_{2в}$ , Ом	$X_{2в}$ , Ом			
ТФН-66СТ П2-42	—	200—400	$P_1; P_2$ $P_3; 0,5$	1,2	30	26,8 12,75	0,975 0,628	239	0,31 0,27	0,38 0,1			
											30 12		
ТФНУ-66СТ П2-42	—	600—1200	$P_1; P_2$ $P_3; 0,5$	1,2	30	31,4 13,6	1,23 0,816	239	0,31 0,27	0,78 0,27			
											30 12		
ТВДМ-110; ТВМ-110; ТНДМ-110; ТНМ-110 П2-43, П2-44	200	75	—	0,6	—	89**	1,50	15	0,03	0,15			
		100		1	18						0,043	18	0,15
		150									29	0,065	29
		200		2	38						0,085	38	0,1
		100		0,6	18						0,043	18	0,2
		150		2	29						0,065	29	0,15
		200			38						0,086	38	0,15
		300		600	69						0,128	69	0,3
		200			37						0,096	37	0,1
		300			68						0,128	68	0,3
400	79	0,171	79		0,1								
600	1000	119	1,2	119	0,1								
400		2	0,26	119	0,6								
600		1,2	0,171	77	0,6								
750		2,4	0,26	118	0,8								
1000	3	0,33	148	0,7									
		200	0,41	200	0,19								
ТВТ-110 П2-45	300	100	—	0,6	12	86	1,62	18	0,056	0,21			
		150		15	29						0,084		
		200		28	39						0,11		
		300		20	59						0,167		

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рас.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{\text{ном}}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м <sup>2</sup>	$l_{\text{ср}}$ , м	$\omega_2$	$R_2$ в', Ом	$X_2$ в', Ом	
ТБТ-110* П2-45	600	200		0,8	20			39	0,11	0,39	
		300		1,0				59	0,167	0,44	
		400		1,6				79	0,222	0,37	
		600		2,0				119	0,334	0,68	
		400		1,2	24	57,6	1,95	79	0,222	0	
		600		1,6				119	0,334		
	1000	750			1,6				150	0,42	0,66
		1000			1,2	24			200	0,56	0,66
		1000			1,2				200	0,56	
		1500			1,6				300	0,675	1,0
		1500			1,6				400	0,9	1,3
		2000									
300	600	100		15	12			100	0,96	0	
		150			15	86	1,62	150	1,42	3,97	
		200			28			200	1,9	12	
		300		30	20			300	2,8	12	
		200		20	20			200	1,9	12	
		300		25				300	2,8	12	
	1000	400		40				400	3,8	11,8	
		600		50				600	5,6	19,3	
		400		30	24	57,6	1,95	400	3,8	0	
		600		40				600	5,6	0	
		750			40			750	7,2	0	
		1000			30	24		1000	9,6	23,2	
2000	1000			30			1000		23,2		
	1500			40			1500	11,8	30,4		
	1500			40			2000	15,5	38,6		
	2000										
	2000										
	2000										

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$\omega_s$	$R_{2в}$ , Ом	$X_{2в}$ , Ом
ТВ-110/20; ТВ-110/20ХЛ ПТ2-46	200	75	—	0,6	—	80	1,38	15	0,068	0,14
		100		0,8	—			20	1,14	0,38
		150		—	—			30	—	—
		200		10	10			38	0,16	0,27
		100		—	—			20	0,14	0,34
		150		10	10			30	0,16	0,43
	300	200	10	10	38	0,16	0,43			
		300	6,5	6,5	58	—	—			
		200	10	10	38	—	—			
		300	0,8	0,8	58	—	—			
		400	1,2	1,2	78	0,4	0,6			
		600	0,6	0,6	119	—	—			
600	400	1,2	1,2	78	—	—				
	600	0,6	0,6	119	—	—				
	750	0,8	0,8	149	—	—				
	1000	1,2	1,2	198	—	—				
	1000	75	—	0,6	—	80	1,38	13	0,068	0,1
		100		0,8	5			18	0,14	0,2
150		10		10	30			—	—	
200		20		20	38			0,28	0,4	
100		0,8		0,8	18			0,14	0,2	
150		10		10	30			—	—	
ТВ-110/50 ПТ2-47	200	200	—	1,2	20	80	1,38	39	0,28	0,4
		300		20	59			—	—	
		300		20	—			—	—	

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рас.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$\psi_3$	$R_2$ , в. Ом	$X_2$ , в. Ом				
ТВ-110/50* П2-47	600	200	—	0,8	20			39	0,28	0,4				
		300		1,2	20			59	0,4	0,78				
		400		0,6	27			78	0,445	0,6				
	600	40			119			0,445	0,6					
	1000	500		1,2	25			100	120	0,6	0,6	0,4	1,2	
		600		0,6	40			150	150	0,4	0,57			
		750		0,8	50			200	200					
	2000	1000		1,2	45			100	100					
		500		0,8	25			200	200					
		1000		1,2	45			300	300					
1500		1,6	33	400	400									
ТВ-110/50* П2-47	1000	500	—	30	25	80	1,38	495	5,34	17				
		600		40	25			595						
		750		50	30			745						
		1000			45			998	5,34	17				
		1000		50	45			998	17,5	23				
	1200			40	1198									
	2000	1500			33			1500	1500					
		2000			25			2000	2000					
		600		1,2	30			65,4	1,63			120	0,16	0,13
		800										160	0,21	0,4
1000		200	0,265			0,4								
1200	240	0,32	0,5											

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рас.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$\psi$ , %	$R_{эв}$ , Ом	$X_{эв}$ , Ом	
ТВС-110/80* П2-48	2000	1000	—					200	0,265	0,4	
		1200						240	0,32	0,5	
		1500						300	0,14	0,7	
		2000						400	0,2		
		1200						240	0,32	0,5	
		1500						300	0,14	0,7	
	3000	2000						40	40	0,2	
		3000						27	27	0,29	1,0
		600						50	50	3,0	4,6
		800						40	40	4,0	16,5
		1000						50	50	5,0	
		1200								6,0	21
2000	1000			5,0	16,5						
	1200			6,0							
	1500			8,0	21						
	2000	40	40	10	19,5						
	1200	50	50	6,0	21						
	1500	40	40	8,0	19,5						
3000	2000	27	27	10	21						
	1200			6,0	21						
	1500			8,0	19,5						
	2000			10	21						
	3000			15,2	38						
	600										
ТВУ-110/50 П2-49	600	200	—	0,6	34	80,3	1,38	39	0,051	0,2	
		300						60	0,078	0,45	
		400						80	0,104	0,52	
		600						120	0,156	0,4	

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$QX \cdot 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$w_2$	$R_{гв}$ , Ом	$X_{гв}$ , Ом					
ТВУ-110/50* П2-49	1000	500		0,4	77				0,13	0,25					
		600		1	58				0,156	0,4					
		750		2	37				0,19	0,7					
		1000			50				0,26	0,82					
		1000			50				0,26	0,82					
	2000	1200		42	33	0,31	1,2		0,39	0,9					
		1500		33	25	0,39	0,9		0,52	1,16					
		2000		25											
		500		25	50	80,3	1,38	497							
		600		30	48			597							
ТФНД-110М П2-50	1000	750	—	50	37										
		1000													
		1000													
		1200													
		1500													
	2000	2000		50	44	1000									
		1500			42	1000									
		1500			33	1200									
		1500			25	1500									
		2000				2000									
ТФНД-110М П2-50	600	50—600	Д 0,5 Д 0,5 0,5 Д 0,5	1,2	20	19,1	0,9	239	0,48	0					
		1000—2000									7,65	0,645			
	2000	750—1500									16,8	1,24	399	0,8	1,2
		750—1500									9	0,83	399	0,6	0,4
	1500	750—1500									9	0,83	299	0,5	0
		600—1200									16,8	1,24	299	0,6	0,6
	1200	600—1200									9	0,83	239	0,4	0

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ м	$\omega_2$	$R_2$ в. Ом	$X_2$ в. Ом
ТФНД-110М* П2-50	2000	1000—2000	Д 0,5	100	10	16,8	1,24	1994	11	30
	1500	750—1500	0,5		6	9	0,83	1994	8,8	10
	1200	600—1200	Д 0,5		5	9	0,83	1499	6,3	0
ТФНД-110М П2-51	—	50—100	Р <sub>1'</sub> , Р <sub>2</sub> 0,5	0,8	30	19,1	0,9	239	0,45	0
	—	400—800	Р <sub>1'</sub> , Р <sub>2</sub> 0,5	1,2	10	7,65	0,65		0,33	
	—	—	Р <sub>1'</sub> , Р <sub>2</sub> 0,5	1,2	20	17,5	0,935	319	0,52	0,39
ТФНД-110М-11 П2-52	—	750—1500	Р <sub>1'</sub> , Р <sub>2</sub> 0,5	0,8	30	21	1,24	299	0,46	0,7
	—	1000—2000	Р <sub>1'</sub> , Р <sub>2</sub> 0,5		20	11,2	0,83		0,38	0,26
	—	—	Р <sub>1'</sub> , Р <sub>2</sub> 0,5		30	21	1,24	399	0,68	1,25
ТФНД-110М-11* П2-52	—	750—1500	Р <sub>1'</sub> , Р <sub>2</sub> 0,5	20	30	21	1,24	1500	5,5	22,5
	—	1000—2000	Р <sub>1'</sub> , Р <sub>2</sub> 0,5		20	11,2	0,83		9,5	9,7
	—	—	Р <sub>1'</sub> , Р <sub>2</sub> 0,5		30	21	1,24	2000	7,4	36,8
ТВТ-150; ТВТ-220-150; ТВТ-220 П2-53	600	200 300 400 600	—	0,4 0,8 1,2	24	94,5	2,5	38 58 78 119	0,12 0,18 0,24 0,36	0,77 0,69 0,93 0,84

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № ряс.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10 ном}$	$Q \times 10^{-4}, м^2$	$l_{ср}, м$	$\omega_2$	$R_2, в. Ом$	$X_2, в. Ом$
ТБТ-150*; ТБТ-220-150*; ТБТ-220* П2-53	1000	400	—	1,2				78	0,24	0,93
		600		1,0				119	0,36	0,84
		750		1,2				149	0,46	0,83
		1000		1,6				200	0,61	1,3
		750		1,2				149	0,46	0,83
		1000		1,6				200	0,61	1,3
	600	1500		2,0				300	0,91	1,59
		2000		2,4				400	1,21	1,96
		200		10				200	2,1	24,2
		300		20				300	3,1	21,06
		400		30				400	4,15	26,8
		600						600	6,2	24,05
ТФНУ-132СТ П2-51	1000	400	—	30	24	94,5	2,5	400	4,15	26,8
		600		25				600	6,2	24,05
		750		30				750	8,0	24,4
		1000		40				1000	10,5	35,9
		750		30				750	8,0	24,4
		1000		40				1000	10,5	35,9
	2000	1500		50				1500	15,6	44,5
		2000		60				2000	21	55,6
		200—400		1,2				30	1,23	0,87
		300—600		0,5				12	0,816	0,29
				1,2				30	1,23	0,87
				0,5				12	0,816	0,27

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$\omega_3$	$R_{2в}$ , Ом	$X_{2в}$ , Ом		
ТФНУ-132СТ* П2-51		500—1000	$P_1, P_2$ 0,5	1,2	30	33,4	1,23	199	0,31	0,54		
		600—1200	$P_1, P_2$ 0,5	1,2	12	13,6	0,816	239	0,26	0,35		
		750—1500	$P_1, P_2$ 0,5	1,2	12	31,4	1,23	299	0,31	0,87		
			200—400	$P_1, P_2$ 0,5	30	30	31,4	1,23	1195	5,9	2,3	
			300—600	$P_1, P_2$ 0,5	30	12	13,6	0,816	1195	4,85	8,7	
			500—1000	$P_1, P_2$ 0,5	30	12	31,4	1,23	995	6,9	22,3	
				600—1200	$P_1, P_2$ 0,5	30	30	13,6	0,816	995	5,8	8,7
				750—1500	$P_1, P_2$ 0,5	30	12	33,4	1,23	1195	5,9	15,2
					$P_1, P_2$ 0,5	30	12	13,6	0,816	1495	4,85	8,24
ТФНД-150-1 П2-55	—	600—1200	P 0,5	2 1,6	15 8	21,6 18	1,22 0,8	240	0,32 0,34	0,12 0,53		
		ТФНД-150-1* П2-55	P 0,5	50 40	15 8	21,6 18	1,22 0,8	1200	4,4 4,7	8,51 17,1		
ТФНР-150-2000 П2-56	—	1000—2000	$P_1, P_2$ $P_3$ 0,5	1,6	25	17,35	1,22	400	0,56	0,93		
				1,4 1,2	30	14,4	0,82		0,65	0,32		

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м <sup>2</sup>	$l_{ср}$ , м	$\omega_3$	$R_{2в}$ , Ом	$X_{2в}$ , Ом
ТФНР-150-2000* П2-56	—	1000—2000	$P_1, P_2$ $P_3$ 0,5	40 35 30	25 30	17,35 14,4	1,22 0,82	2000	7,7 9	0 17,4
		600—1200	$D_1$	4	13	18,7***	1,195	479 958***	0,82 3,3***	0,98 1,41***
ТФНД-154 П2-57	—	600—1200	$D_3$	4	11	14***	—	479 958***	0,76 3,0***	0,58 1,0***
		600—1200 400—800	0,5	4 2,4	4	5,1	0,892	479 318	0,57 0,42	0,5 0,4
ТФНД-150-1-ХЛ; ТФНР-150Г П2-55	—	600—1200	$P_1, P_2$ $P_3$ 0,5	1,2 30	30 25 8 30 25 8	21,6 18 21,6 18	1,22 0,8 1,22 0,8	240 1200	0,32 0,34 4,4 4,7	0,12 0,53 8,51 17,1
		200 300 400 600 400 600 750 1000	—	0,4 0,8 1,2 0,8 1,2 0,8 0,8 1,2	42 38 36 80 40 55 70 80	93,6	2,56	38 58 78 110 78 119 149 200	0,11 0,165 0,22 0,33 0,22 0,33 0,41 0,56	0,2 0,25 0,3 0,1 0,6 0,8 0,7 0

Тип ТТ. № рас.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$\psi_2$	$R_{2в}$ Ом	$X_{2в}$ Ом	
	1500	600		0,8	37			118	0,33	1,38	
		750		1,2	38			148	0,41	1,6	
		1000		0,8	80			199	0,55	1,7	
		1500		2,0	80			300	0,83	0	
ТВТ-220	4000	1000		1,2	30	87	1,93	200	0,61	0,71	
		2000		2,0				400	1,22	1,72	
		3000		2,4				600	1,82	3,1	
		4000		3,0				800	2,44	3,04	
ТВТ-220*	4000	1000		30	30	87	1,93	1000	10,4	22,9	
		2000		50				2000	21	51,1	
		3000		60				3000	31	65,7	
		4000		75				4000	42	91	
ТВ-220/25 П2-59	600	200	—	1,6	—	80	2,11	38	0,077	0,2	
		300		0,8	20			58	0,245	0,5	
		400		1,6	20			78	0,4	0,9	
	1000	600		2	18			119	0,4	0,9	
		400		1,6	20			78	0,4	0,9	
		600		2	18			119			
	2000	750		1,2	32			148			
		1000		2	25			198			
		500		1,2	13			99			1,6
		1000			25			198			
		1500			16			299			
		2000			12			400			

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_{1 \text{ ном}}$	Класс обмотки	$Z_{\text{ном}} \text{ Ом}$	$K_{10 \text{ ном}}$	$Q \times 10^{-4}, \text{ м}^2$	$l_{\text{ср}}, \text{ м}$	$\psi_2$	$R_{2 \text{ в}} \text{ Ом}$	$X_{2 \text{ в}}, \text{ Ом}$								
ТВ-220/25* П2-59	1000	400	—	40	15	80	2,11	400	8	20								
		600		22														
		750		25														
		1000		19														
		500		25														
2000	1000	30	16	16,5	32													
	1500	12																
	2000																	
ТВС-220/40 П2-60	1200	600	—	0,6	50	77,8	2,19	120	0,156	—								
		800		0,8														
		1000		1,2														
		1200																
		1000																
		1200																
		1500																
		2000																
		1200																
		1500																
		2000																
		3000																
		ТВС-220/40* П2-60		1200				600			—	15	50	77,8	2,19	600	4,6	
								800				20						
								1000				30						
1200																		

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ , м	$\psi_2$	$R_{2в}$ , Ом	$X_{2в}$ , Ом
ТДУ-220* П2-61	2000	1000	—	40	60	80	2,11	995	7,7	0
		1200							9,2	
		1500							11,5	
		2000							15,4	
		3000							23,0	
	3000	1200							9,2	
		1500							11,5	
		2000							15,4	
		3000							23,0	
		1000							14,1	
ТДУ-220 П2-61	1000	1000	—	40	60	80	2,11	199	0,495	
		750							0,33	
		600							0,231	
		400							0,153	
		2000							1,43	
	2000	1500							1,6	
		1000							2,0	
		500							1,6	
		1000							1,6	
		500							1,2	

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{cp}$ , м	$\psi_2$	$R_2$ , в. Ом	$X_2$ , в. Ом
ТВУ-220/40 П2-62	2000	500	—	1,2	35	98	2,00	100	0,087	—
		600		0,8	55				0,11	
		800		1,2	50				0,14	
		1000		1,6	40				0,17	
		1200		2	33				0,21	
		1500			26				0,26	
		2000			20				0,35	
ТВУ-220/40* П2-62	2000	500	—	30	35	98	2,00	500	2,6	
		600		20	55			600	3,1	
		800		30	50			800	4,2	
		1000		40	40			1000	5,2	
		1200		50	33			1200	6,2	
		1500			26			1500	7,8	
		2000			20			2000	10,2	
ТВТ-220-154 П2-63	2000	200	—	0,4	36	94,5	2,50	38	0,121	0,3
		300		0,8	36			58	0,182	0,4
		400		1,2	35			78	0,242	0,3
		600		1,2	55			119	0,364	0,12
		750		1,6	55			149	0,455	0,09
		1000		2,4	48			199	0,606	0,11
		1500		2,4	65			299	0,91	0
2000	4	56	400	1,21						

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м²	$l_{ср}$ м	$w_1$	$R_2$ в. Ом	$X_2$ в. Ом
ТВТ-220-154* П2-63	2000	200	—	10	36	94,5	2,50	200	1,69	7,5
		300		20	36			300	2,53	10
		400		30	35			400	3,38	7,5
		600		30	55			600	5,06	2,47
		750		40	55			750	6,6	2,58
		1000		60	48			1000	8,8	2,45
		1500		60	65			1500	13,8	2,45
		2000		100	56			2000	18,5	2,45
ТФНУ-220СТ П2-64	2000	300—600	$P_{11}, P_{22}$ 0,5	2	20	28,8	1,53	239	0,3	0,71
		400—800	$P_{11}, P_{22}$ 0,5	1,2	16			319	0,28	0,18
		600—1200	$P_{11}, P_{22}$ 0,5	2	20			239	0,4	1,4
		750—1500	$P_{11}, P_{22}$ 0,5	1,2	16			239	0,37	0,8
			$P_{11}, P_{22}$ 0,5	2	20			299	0,3	0,71
			$P_{11}, P_{22}$ 0,5	1,2	16			299	0,28	0,18
			$P_{11}, P_{22}$ 0,5	2	20			299	0,38	1,3
			$P_{11}, P_{22}$ 0,5	1,2	16			299	0,35	0,71
ТФНУ-220СТ* П2-64	2000	300—600	$P_{11}, P_{22}$ 0,5	50	20	28,8	1,53	1195	4,2	21
		400—800	$P_{11}, P_{22}$ 0,5	30	16			1500	3,9	8,8
		600—1200	$P_{11}, P_{22}$ 0,5	50	20			1500	5,5	39
		750—1500	$P_{11}, P_{22}$ 0,5	30	16			1195	5,1	—
			$P_{11}, P_{22}$ 0,5	50	20			1195	4,2	21
			$P_{11}, P_{22}$ 0,5	30	16			1495	3,9	8,8
			$P_{11}, P_{22}$ 0,5	50	20			1495	5,3	34,6
			$P_{11}, P_{22}$ 0,5	30	16			1495	4,8	21

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10 ном}$	$Q \times 10^{-4}, м^2$	$l_{ср}, м$	$\omega_2$	$R_2 в, Ом$	$X_2 в, Ом$
ТФНД-220-I; ТФНД-220-I-ХЛ П2-65	300—1200	300—600— 1200	$P_1; 0,5$ $P_2; P_3$	1,2 2	15 10	21,5 30,5	1,06 1,55	240	0,42 0,51	0,35 0,05
		300—600— 1200	$P_1; 0,5$ $P_2; P_3$	30 50	15 10	21,5 30,5	1,06 1,55	1200	7,0 6,0	0,54 10,7
ТФНД-220-I* ТФНД-220-I-ХЛ* П2-65	300—1200	500—1000	$0,5; P_3$ $P_1; P_2$	1,2 2	20 25	21,5 30,5	1,06 1,55	400	0,7 0,85	1,1 1,4
		2000	$0,5; P_3$ $P_1; P_2$	30 50	20 25	21,5 30,5	1,06 1,55	2000	10 11,5	34 41
ТФНД-220-IV П2-65	500—2000	750—1500	$0,5; P_3$ $P_1; P_2$	30 50	12 16	21,5 30,5	1,06 1,55	1500	7,5 8,8	16 22
		750—1500	$P_1; P_2$ $P_3; 0,5$	1,2 30	30 27	21,7 15	1,59 1,18	199	0,41 0,35	—
ТФНД-220-3Г П2-65	750—1500	500—1000	$P_1; P_2$ $P_3; 0,5$	1,2 30	30 27	21,7 15	1,59 1,18	995	5,37 4,9	—
		750—1500	$P_1; P_2$ $P_3; 0,5$	1,2 30	30 27	21,7 15	1,59 1,18	299	0,6 0,5	—
ТФНД-220-II	—	1000—2000	$P_1; P_2$ $P_3; 0,5$	1,2 30	30 27	21,7 15	1,59 1,18	399	0,8 0,69	—
		1000—2000	$P_1; P_2$ $P_3; 0,5$	1,2 30	30 27	21,7 15	1,59 1,18	399	0,8 0,69	—

Тип ТЭ, № рис.	Вариант исполнения	$l_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ , Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}$ , м <sup>2</sup>	$l_{ср}$ , м	$\psi_2$	$R_{2в}$ , Ом	$X_{2в}$ , Ом	
ТФНД-220-II*	—	750—1500	$P_1, P_2$ $P_3; 0,5$	30	25	21,7	1,59	1497	8,6	—	
		1000—2000	$P_1, P_2$ $P_3; 0,5$	30	20	15	1,18	1900	7,3	—	
ТФНД-220-2000* П2-67	750—1500	500—1000— 2000	$P_1, P_2, P_3$ 0,5	30	30	21,7	1,59	1900	11,5	—	
		400—800— 1600	$P_1, P_2$ $P_3; 0,5$	30	27	15	1,17	1594	9,8	—	
ГРН-220*	1000 1500 2000 3000	—	$P_1, P_2$ $P_3; 0,2$	50	6	9,04	1,3	1000	4,9	—	
			$P_1, P_2$ $P_3; 0,2$	30	5	7,02	1,33	1500	5,1	—	
			$P_1, P_2$ $P_3; 0,2$	50	9	9,04	1,3	7,02	1,33	2000	7,3
			$P_1, P_2$ $P_3; 0,2$	30	7	7,02	1,33	9,04	1,33	3000	7,33
ТФНД-220 П2-65	3000	300—600— 1200	$P_1, P_2$ $P_3; 0,2$	50	11	9,04	1,3	239	9,7	0,5	
			$P_1, P_2$ $P_3; 0,2$	30	9	7,02	1,33	0,99	0,4	0	
			$P_1, P_2$ $P_3; 0,2$	50	16	9,04	1,3	14,7	0,4	0,4	
			$P_1, P_2$ $P_3; 0,2$	30	12	7,02	1,33	14,9	0,4	0,4	

Продолжение ПЗ

Тип ТТ, № рас.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}, \text{ м}^2$	$l_{ср}, \text{ м}$	$w_1$	$R_2 \text{ в. Ом}$	$X_2 \text{ в. Ом}$
ТФКН-220-II*	1200	300--600-- 1200	$P_1, 0,5$ $P_2, P_3$	30 50	30	21,6 35,1	1,0	1200	8,5 9,8	—
		200 300 400 600 400 600 750 1000 750 1000 1500 2000 1500 2000 3000	—	0,8 1,2 1,2 1,6 2,0 2,4 1,6 2,4 3,0 4,0 1,2 1,6 2,0	25 25 30	94,5	2,09	38 58 78 119 78 119 149 200 149 199 299 400 299 400 600	0,13 0,2 0,275 0,41 0,275 0,41 0,53 0,69 0,53 0,69 1,05 1,33 0,45 0,65 1,2	0,5 0,58 0,75 0,68 0,75 0,68 0,98 1,24 0,98 1,24 1,45 1,86 0,13 0,53 0,66
ТВТ-330 П2-68	600	200 300 400 600		20 30	25	94,5		200 300 400 600	2,0 3,05 4,1 6,1	17,6 18,8 23 21
		1000 2000 3000								
ТВТ-330* П2-69	600	200 300 400 600								

Тип ТТ, № рис.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10 ном}$	$Q \times 10^{-4}, м^2$	$l_{ср}, м$	$\psi_2$	$R_{2 в.} Ом$	$X_{2 в.} Ом$
	1000	400		40	30			400	4,1	23
		600		50				600	6,1	21
		750		60				750	7,4	23
	1000	40		1000				9,4	36	
	2000	750		60				750	7,4	23
		1000		75				1000	9,4	36
		1500		100				1500	14,9	—
	3000	2000		30				2000	19	56
		1500		40				1500	5,2	11
		2000		50				2000	6,9	22
3000		2	3000	10,5	35					
ТКН-330; ТКН-330* П2-69	2000	500—1000— 2000	—	2	20	22,3	1,09	400	0,8	—
		500—1000— 2000		50		1995	11,5			
ТФКН-330 П2-69	500—2000	500—1000— 2000	$P_1; P_2;$ $P_3; 0,5$	2	20	15,3	0,958	400	0,6	0,76
		500—1000— 2000		50		2000	8,5			
ТРН-330-VI* П2-70	3000	1500—3000	0,2; 0,5 $P_1; P_4;$ $P_3; P_3;$	30 40	20	9,4 8,66 9,56	1,92 1,95	3000	9,1 8,4 9,3	43 36 44

Продолжение П

Тип ТТ, № ржс.	Вариант исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}, \text{м}^2$	$I_{ср}$ , м	$\psi_2$	$R_2$ в, Ом	$X_2$ в, Ом
ТВТ-400*, П2-71	1000	1000	—	45	20	45	2,54	1000	9,1	20
	2000	2000	—	50	14	32	2,38	2000	16,5	30
ТВТ-500* П2-72	1500 2000	500	—	30	14	43,4	2,67	490	2,5	9,97
		1000	—	40	20			1000	5,0	9,95
		1500	—	30	25			1500	7,5	14
		500	—	30	25			490	2,5	9,97
		1000	—	50	30			1000	5,0	9,95
		1500	—	100	35			1500	7,5	14
2000	—	—	30	2000	10,0	16,2				
ТВТ-500М* П2-72	—	500	—	30	25	43,4	2,67	490	3,1	9,45
		1000	—	50	30			1000	6,3	8,63
		1500	—	100	35			1500	9,3	12,3
		2000	—	—	30			2000	12,6	13,6
ТВТ-500-П* П2-73	—	200	—	30	8	157,5	2,54	200	1,73	18,1
		750	—	60	20			750	6,5	26,1
ТРН-500* П2-74	—	1000—2000	0,5 $P_1$ $P_2; P_3$	30	18	72,6 21,4 21,6	1,78 1,78 1,82	1995	13,7	—
				75	18			1990	9,5	—
				75	18			1990	9,0	—

Тип ТТ, № рис.	Версия исполнения	$I_1$ ном	Класс обмотки	$Z_{ном}$ Ом	$K_{10}$ ном	$Q \times 10^{-4}, \text{м}^2$	$I_{ср}, \text{м}$	$\omega_2$	$R_2 \text{ в}, \text{Ом}$	$X_2 \text{ в}, \text{Ом}$
ТФНКД-500*; ТФНКД-500Т* П2-75	2000	500—1000— 2000	P <sub>1</sub> ; P <sub>2</sub> ; P <sub>3</sub> 0,5	75	12	21,6	1,36	1185	6,35	18
ТФНКД-500-П1* П2-75	2000	500—1000— 2000	P <sub>1</sub> ; P <sub>2</sub> ; P <sub>3</sub> 0,5	75	18	36,5	1,38	1185	6,35	55
ТВМ-750*, П2-76	2000	2000	—	75	10	32	2,76	1000	13,5	33,5
ТРН-750* П2-77	1000—2000 1500—3000; 2000—4000	2000	0,5 P <sub>1</sub> ; P <sub>4</sub> P <sub>2</sub> ; P <sub>3</sub>	75	12	22,5	1,98	1994	9,65	60
							2,04	1990	8,34	42
							1,98	1992	9,65	60
ТВТ-1200* П2-78	2000	500	—	20	20	32,4	3,4	490	3,4	9,8
		1000						990	6,7	5,07
		1500						1485	10	16
		2000						1982	13,5	4,59
ТВВ-1500*, П2-79	2000	2000	—	50	14	28,7	2,58	2000	4,0	11,2

\* Для ТТ с  $I_2$  ном = 1 А.

\*\*  $\omega_2 = 89$  для ТВДМ-110 и ТВМ-110;  $\omega_2 = 86,5$  для ТНДМ-110 и ТНМ-110.

\*\*\* Для ТТ с  $I_2$  ном = 2,5 А.

Примечание. Данные для ТТ с  $I_2$  ном = 5 А.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем. М.: Энергия, 1976.
2. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока. М.—Л.: Энергия, 1964.
3. ГОСТ 7746-68. Трансформаторы тока.
4. Международная электротехническая комиссия. Рекомендация МЭК. Публикация 185. 1-е изд. 1966. Трансформаторы тока. Информэлектро, 1969.
5. Дроздов А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. М.: Энергия, 1965.
6. Никитский В. З. Новый способ снятия вольт-амперных характеристик трансформаторов тока. — Электрические станции, 1964, № 10, с. 75—80.
7. Метод расчета токовой и угловой погрешностей трансформаторов тока при глубоком насыщении сердечника./ Дмитриев К. С., Казанский В. Е., Королев Е. П., Либерзон Э. М.—Электричество, 1967, № 12, с. 39—43.
8. Казанский В. Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. — 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1969.
9. Подгорный Э. В., Хлебников С. Д. Моделирование и расчеты переходных режимов в цепях релейной защиты. М.: Энергия, 1974.
10. Либерзон Э. М. Расчет трансформаторов тока по упрощенной характеристике намагничивания. — Электричество, 1971, № 7, с. 64—67.
11. Расчет трансформаторов тока в установившемся режиме по универсальным характеристикам./ Дроздов А. Д., Кужеков С. Л., Гречухин В. Н., Добродеев К. М., Курицын В. П. — Изв. вузов. Сер. Энергетика, 1972, № 12, с. 53—58.
12. Кужеков С. Л. О методах расчета переходных и установившихся процессов в трансформаторах тока. — Электричество, 1975, № 7, с. 74—77.
13. Дроздов А. Д. Расчет режимов трансформаторов тока в релейной защите по номинальным и базисным параметрам. — Электричество, 1968, № 6, с. 72—75.
14. Сирота И. М., Стогний Б. С., Черненко В. А. Обобщенные характеристики для выбора трансформаторов тока в устройствах релейной защиты и автоматики. Киев: Наукова думка, 1968. — В надзаг.: АН УССР ин-т Электродинамики.
15. Гельфанд Я. С. Исследование переходных процессов в трансформаторах тока на математических машинах непрерывного действия. — Электричество, 1961, № 12, с. 40—44.
16. Засыпкин А. С., Бердов Г. В., Середин М. М. Расчетные кривые для определения вторичных токов в реле при включениях силовых трансформаторов на холостой ход. — Изв. вузов. Сер. Электромеханика, 1971, № 4, с. 390—396.

17. Шнеерсон Э. М. Анализ установившихся и переходных процессов нелинейных трансформаторов тока по составляющим основной частоты. — В кн.: Труды ВНИИР. Чебоксары: 1973, с. 138—165.
18. Новаш В. И. Некоторые вопросы математического моделирования релейных защит на полупроводниках. — Изв. вузов. Сер. Электромеханика, 1971, № 1, с. 29—33.
19. Сирота И. М. Переходные режимы работы трансформаторов тока. Киев: Изд-во АН УССР, 1961.
20. Подгорный Э. В., Хлебников С. Д. О выборе расчетной характеристики намагничивания трансформаторов тока в переходных режимах. — Электричество, 1966, № 9, с. 87—90.
21. Либерзон Э. М., Королев Е. П. Инженерный метод расчета переходных процессов в трансформаторах тока. — Электричество, 1968, № 12, с. 38—43.
22. Дроздов А. Д., Подгорный Э. В. О требованиях к трансформаторам тока для релейной защиты с учетом переходных процессов. — Электрические станции, 1971, № 12, с. 58—61.
23. Стогний Б. С. Анализ и расчет переходных режимов работы трансформаторов тока. Киев: Наукова думка, 1972.
24. Универсальные характеристики трансформаторов тока в переходном режиме короткого замыкания/ Кужеков С. Л., Иванов Ю. И., Колесникова Л. Д. и др. — Электричество, 1975, № 2, с. 9—13.
25. Zaporka R. Das Verhalten vom Stromwandler bei Einschwingvorgängen. — AEG — Mitt. 56, 1966, 3, S. 209—215.
26. Ягзих, Морва, Висс. Переходные процессы в трансформаторах тока и их влияние на снижение времени действия устройств релейной защиты. — В кн.: Современная релейная защита (СИГРЭ, 1968), М.: Энергия, 1970, с. 51—64.
27. Стогний Б. С. О целесообразности выполнения трансформаторов тока с учетом их работы в переходных режимах. — Электричество, 1974, № 8, с. 12—17.
28. Батурин А. М. Вибрация контактов реле серии ЭТ при несинусоидальной форме кривой тока. — Электрические станции, 1958, № 7, с. 88—89.
29. Гильчер О. А., Шлейфман А. Д. Способы устранения вибрации реле ЭН и ЭТ-520. — Электрические станции, 1955, № 11, с. 36—38.
30. Либерзон Э. М., Королев Е. П. Работа электромагнитных токовых реле при несинусоидальных токах. — В кн.: Научно-технический сборник ин-та «Энергосетьпроект», № 2, М.: Энергия, 1970, с. 53—58. В надзаг.: М-во энергетики и электрификации СССР.
31. Бессонов А. А. Теоретические основы электротехники. 6-е изд., перераб. М.: Высшая школа, 1973.
32. Дроздов А. Д., Михайлов В. В., Иванов Ю. И. Снижение вибрации электромагнитных токовых реле при несинусоидальных токах. — Электрические станции, 1966, № 11, с. 87—88.
33. Гельфанд Я. С. Релейная защита распределительных сетей. М.: Энергия, 1975.
34. Дроздов А. Д., Зинченко В. Ф., Кужеков С. Л. Повышение надежности срабатывания электромагнитных реле при перегруженных трансформаторах тока. — Изв. вузов. Сер. Электромеханика, 1967, № 10, с. 1160—1161.
35. Коробейников Б. А. Применение сглаживающего контура для повышения надежности работы индукционных реле направления мощности. — Электрические станции, 1968, № 10, с. 66—68.

36. **Либерзон Э. М., Королев Е. П.** Уменьшение вибрации контактной системы индукционных реле направления мощности. — Электрические станции, 1967, № 12, с. 51—54.
37. **Бадин Г. В., Введенский К. С.** Устранение вибрации реле мощности серии РБМ. — Электрические станции, 1968, № 11, с. 75—76.
38. **Королев Е. П., Либерзон Э. М.** Работа защиты типа ДФЗ-2 при искаженной форме кривой тока. — Электрические станции, 1971, № 6, с. 57—60.
39. **Руководящие указания по релейной защите. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110—330 кВ.** М.: Энергия, 1972.
40. **Королев Е. П., Либерзон Э. М.** Расчет сечений жил контрольных кабелей в токовых цепях релейной защиты. — Электрические станции, 1975, № 8, с. 60—62.
41. **Шабад М. А.** Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. 2-е изд., перераб. Л.: Энергия, 1976.
42. **Дроздов А. Д., Платонов В. В.** Реле дифференциальных защит элементов энергосистем. М.: Энергия, 1968.
43. **Висящев А. Н.** Особенности работы защит при включении их на сумму вторичных токов. — Электрические станции, 1970, № 10, с. 53—55.
44. **Правила устройств электроустановок.** 4-е изд. М.—Л.: Энергия, 1965. В надзаг.: Государственный производственный комитет по энергетике и электрификации СССР.
45. **Королев Е. П., Либерзон Э. М.** Учет нелинейной нагрузки при расчете погрешностей трансформаторов тока. — Электричество, 1975, № 9, с. 75—78.
46. **Руководящие указания по релейной защите. Защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов.** М.: Госэнергоиздат, 1962.
47. **Голубев М. Л.** Релейная защита и автоматика подстанций с короткозамыкателями и отделителями. 2-е изд., перераб. М.: Энергия, 1965.
48. **Гельфанд Я. С., Голубев М. Л., Царев М. И.** Релейная защита и электроавтоматика на переменном оперативном токе. 2-е изд., перераб., М.: Энергия, 1973.
49. **Королев Е. П., Либерзон Э. М.** Проверка надежности питания оперативных цепей защиты выпрямленным током при несимметричных к. з. — Электрические станции, 1969, № 10, с. 63—66.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	5
<b>Глава первая. Методы расчета погрешностей трансформаторов тока . . . . .</b>	<b>7</b>
1-1. Основные параметры трансформаторов тока . . . . .	7
1-2. Метод эквивалентных синусоид . . . . .	9
1-3. Метод прямоугольной характеристики намагничивания . . . . .	15
1-4. Метод спрямленной характеристики намагничивания . . . . .	21
1-5. Метод базисных параметров . . . . .	22
1-6. Методы моделирования трансформаторов тока . . . . .	22
1-7. Оценка различных методов для инженерных расчетов . . . . .	25
1-8. Требования к трансформаторам тока по рекомендациям МЭК . . . . .	26
<b>Глава вторая. Методы расчета переходных процессов в трансформаторах тока . . . . .</b>	<b>27</b>
2-1. Общие сведения . . . . .	27
2-2. Метод прямоугольной характеристики намагничивания . . . . .	28
2-3. Метод спрямленной характеристики намагничивания . . . . .	35
2-4. Метод линейной характеристики намагничивания . . . . .	36
2-5. Метод наклонной характеристики намагничивания . . . . .	37
2-6. Методы физического и математического моделирования . . . . .	38
2-7. Оценка различных инженерных методов расчета переходных процессов . . . . .	40
2-8. Предварительные рекомендации МЭК по конструкции и характеристикам ТТ, к которым предъявляются требования точности в переходных процессах . . . . .	41
<b>Глава третья. Работа измерительных органов релейной защиты при искаженной форме кривой тока . . . . .</b>	<b>42</b>
3-1. Общие положения . . . . .	42
3-2. Электромагнитные реле тока . . . . .	43
3-3. Индукционные реле тока . . . . .	50
3-4. Индукционные реле направления мощности . . . . .	51
3-5. Дифференциально-фазные высокочастотные защиты . . . . .	58
3-6. Дистанционные защиты . . . . .	60
<b>Глава четвертая. Выбор допустимых нагрузок на трансформаторы тока . . . . .</b>	<b>61</b>
4-1. Общие сведения . . . . .	61
4-2. Расчетные условия для защит различных типов . . . . .	63

4-3. Расчет сечений жил контрольных кабелей . . . . .	67
4-4. Особенности характеристик предельных кратностей встроенных ТТ при малых кратностях тока . . . . .	81
4-5. Особенности расчета полной и токовой погрешностей при включении защит на сумму токов двух ТТ . . . . .	84
4-6. Построение кривых предельных кратностей трансфор- маторов тока . . . . .	87
4-7. Построение кривых предельной кратности по вольт- амперной характеристике ТТ . . . . .	93
4-8. Учет нелинейности сопротивлений при расчете допу- стимых нагрузок . . . . .	94
4-9. Расчеты нагрузок на обмотки трансформаторов тока в схемах на переменном оперативном токе . . . . .	97
Приложения . . . . .	114
П1. Рекомендации по определению угла между токами поврежденных фаз при двухфазном к. з. на землю	114
П2. Кривые предельных кратностей трансформаторов тока	116
П3. Технические данные трансформаторов тока $I_{2ном} = 5A$	163
Список литературы . . . . .	203

**ЕВГЕНИЙ ПАВЛОВИЧ КОРОЛЕВ  
ЭДУАРД МАРКУСОВИЧ ЛИБЕРЗОН**

**Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях  
релейной защиты**

*Редактор Л. С. Зисман  
Редактор издательства И. А. Сморгкова  
Обложка художника Г. А. Жегина  
Технический редактор Н. П. Собакина  
Корректор И. А. Володяева  
ИБ № 1004*

Сдано в набор 23.08.79 Подписано в печать 13.11.79 Т-18664  
Формат 84×108<sup>1/32</sup> Бумага типографская № 2 Гарн. шрифта  
литературная Печать высокая Усл. печ. л. 10,92  
Уч.-изд. л. 10,98 Тираж 18 000 экз. Заказ 262 Цена 55 к.  
Издательство «Энергия», 113114, Москва, М-114, Шлюзов-  
вая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при  
Государственном комитете СССР по делам издательств,  
полиграфии и книжной торговли. 113114, Москва, М-114,  
Шлюзовая наб., 10

