

**Авторы:**

**к.т.н. Рыбалкин А.Д.,**

**к.т.н. Иванченко А.Н.,**

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия,

**к.т.н. Шурупов А.А.,**

ООО НПП «ЭКРА», г. Чебоксары, Россия.

**Dr. Rybalkin A.D.**, Candidate of Technical Sciences, assistant professor, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

**Ключевые слова:** трансформатор тока, выбор нагрузки, погрешность, ток короткого замыкания, микропроцессорные устройства релейной защиты.

**Dr. Ivanchenko A.N.**

Candidate of Technical Sciences, professor, department «Software Computer Engineering», Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI).

**Dr. A.A. Shurupov**, EKRA Ltd., Cheboksary, Russia.

**Annotation:** choice of load of current transformers for modern microprocessor based relay protection devices has some peculiarities. In particular the algorithm choice of load must additionally contain the check that duration of exact transformation of current transformer fits to operating time of a relay protection devices.

**Keywords:** current transformer, choice of load, error, short circuit current, microprocessor based relay protection devices.

# СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К АВТОМАТИЗАЦИИ ВЫБОРА СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ В ТОКОВЫХ ЦЕПЯХ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

## MODERN APPROACH TO AUTOMATION OF CHOICE OF WIRE CROSS-SECTIONS IN CURRENT CIRCUITS OF RELAY PROTECTIONS

**Аннотация:** выбор нагрузки на трансформаторы тока при применении современных микропроцессорных устройств релейной защиты имеет ряд особенностей. В частности, необходимо дополнить алгоритм выбора нагрузки проверкой соответствия времени достаточно точной трансформации тока и времени срабатывания защиты.

В соответствии с требованиями ГОСТ 7746-2001, производители трансформаторов тока (ТТ) обязаны гарантировать работу ТТ с погрешностью не больше заданной при протекании по первичной обмотке ТТ вынужденной составляющей тока короткого замыкания (ТКЗ) с кратностью не больше заданной. При этом все три типа погрешностей, а именно токовая, угловая и полная, вычисляются за время, равное периоду промышленной чистоты, то есть вычисляются интегральные значения этих величин. Можно показать, что в зависимости от характера нагрузки и относительного содержания свободных составляющих в ТКЗ форма вторичного тока при одной и той же величине токовой погрешности будет существенно отличаться [1].

Традиционная практика выбора нагрузки на ТТ сводилась к определению допустимой нагрузки по кривым предельных кратностей [5, 6]. В настоящее время такой подход не всегда может быть реализован. Во-первых, при проектировании отсутствуют кривые для многих типов ТТ, особенно иностранного производства. Во-вторых появились предложения применять ТТ с допустимой погрешностью 5%. В этом случае целесообразно для выбора нагрузки применить метод базисных параметров [7].

Для выбора нагрузки на ТТ с учётом необходимости обеспечить время достаточно точной трансформации (ДТТ) [7] существующую методику выбора нагрузки на ТТ необходимо дополнить в соответствии с этим условием.

Необходимость такого дополнения объясняется также тем, что кроме периодической составляющей в токе короткого замыкания может содержаться аperiodическая составляющая. В этом случае насыщение сердечника ТТ происходит существенно быстрее, чем при воздействии только периодической составляющей. В [1] показано, что величина нагрузки, подключённой ко вторичной обмотке ТТ, влияет на время насыщения сердечника ТТ только в первом периоде. При насыщении сердечника ТТ во втором или последующих периодах на момент наступления насыщения влияет величина постоянной времени затухания аperiodической составляющей. Следовательно, величина допустимой нагрузки ( $Z_{доп}$ ), выбранная по условию трансформации периодической составляющей с погрешностью не больше заданной, является максимально возможной. В случае, если при выбранной таким образом величине  $Z_{доп}$  время насыщения сердечника ТТ (длительность интервала ДТТ) оказывается меньше допустимого по условиям работы измерительных органов (ИО) защиты данного типа, величину  $Z_{доп}$  необходимо снизить. Методика такой проверки изложена ниже (метод «ЭКРА»).

### Автоматизация проектирования токовых цепей релейной защиты

Проектирование релейной защиты и противоаварийной автоматики электрических станций и подстанций представляет достаточно трудоемкий процесс, включающий два вида работ:

- рутинные работы, которые занимают до 70-80% времени;

творческие работы, которые составляют соответственно 30-20% времени.

Представляется целесообразным рутинную работу алгоритмизировать, разработать для нее программы или процедуры и благодаря внедрению этих программ повысить производительность труда проектировщиков и в целом снизить стоимость проекта [8]. Такие подходы уже известны и были предприняты. Работы по созданию программы выбора сечения проводов в токовых цепях релейной защиты были начаты в Южно-Российском государственном политехническом университете (Новочеркасском политехническом институте) еще в 70-80-е годы XX века [9]. Программы были разработаны для ЭВМ типа «Минск-32» и «ЕС ЭВМ». Они были внедрены в практику проектирования в Ростовском отделении института «Теплоэлектропроект», Ростовском и Горьковском отделениях института «Энергосетьпроект». Параллельно такие работы велись и в Павлодарском политехническом институте [10, 11].

Известно два подхода при создании программ:

1. Создаётся программа, которая потом распространяется в качестве загрузочного модуля и, в случае необходимости внести в неё изменение, всем пользователям рассылаются файлы, которые пользователи потом самостоятельно вставляют в готовые программы. Такой подход создаёт ряд неудобств, заключающихся в необходимости рассылки и отслеживания ситуации, с тем чтобы установить, внедрены ли эти изменения или нет, что приводит в конечном счёте к тому, что у различных пользователей имеются различные версии программ.

2. Современное состояние информационных технологий позволяет предложить другой путь, который избавляет от необходимости рассылать файлы и следить за состоянием программы у пользователей и так далее.

С учётом современных тенденций в программной реализации автоматизированных систем проектирования и расчётов можно утверждать,

что одним из перспективных направлений при создании таких систем (своеобразным «трендом») является использование технологии «облачных вычислений», основанной на использовании «облачной платформы».

Под «облачной платформой» понимается такая архитектура и организация вычислительных процессов, при которой все вычислительные ресурсы и средства управления ими концентрируются в одном месте – мощном вычислительном комплексе компании (центре обработки данных). Доступ к ресурсам осуществляется удалённо через интранет-интернет, что позволяет построить распределенную среду для проектирования, высокопроизводительных научно-технических вычислений и обработки данных. При этом все прикладные программы, расположенные на «облачной платформе», имеют собственный веб-интерфейс, и пользователи взаимодействуют с ними непосредственно из интернет-браузера. Построенные таким образом программы получили название «программы как сервис» («Software as Service», или SaaS).

Внедрение облачной платформы на предприятии позволяет: снизить затраты и сократить сроки внедрения систем проектирования и научно-технических расчетов, а также перейти от автоматизации отдельных шагов процессов в виде вызовов различных приложений или расчетных программ к созданию единого информационного пространства для проектных и исследовательских работ.

Основное преимущество технологии «облачных вычислений» для пользователей заключается в том, что к облачному сервису можно подключиться в любом месте и с любого устройства, имеющего выход в Интернет. Кроме того, пользователю не нужно приобретать, скачивать и устанавливать прикладные программы на своем компьютере, отслеживать и постоянно обновлять версии программного обеспечения.

В связи с тем, что в настоящее время применяются обе технологии, авторами выполнена реализация про-

граммы выбора сечения проводов в токовых цепях релейной защиты как в формате отдельной программы, так и в формате «программа как сервис».

Программа выполняет выбор сечения проводов в токовых цепях релейной защиты в соответствии с методикой [6]. Если для выбранного трансформатора тока отсутствует кривая 10% предельной кратности, то расчёт выполняется по методу номинальных и базисных параметров [7]. Блок-схема программы приведена ниже (рис. 1).

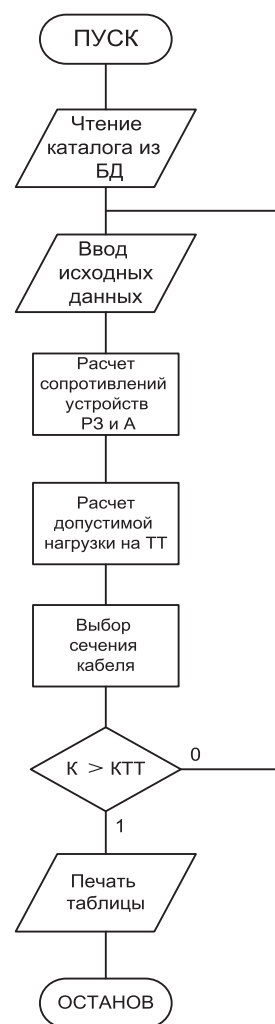


Рис. 1. Блок-схема программы выбора сечения проводов в токовых цепях релейной защиты



Здесь КТТ – количество трансформаторов тока, для которых должно быть выполнено расчёт, К – номер трансформатора тока, для которого выполняется текущий расчёт.

Интерфейс первого варианта программы и вид таблицы с результатами расчёта приведены на рис. 2 и 3.

Для установки и запуска программного обеспечения предъявляются следующие минимальные требования:

1. Программное обеспечение:
  - ОС Windows 7 и выше;
  - установщик Microsoft Windows версии 4.5 и выше;
  - .NET Framework 3.5 SP1 и выше.
2. Аппаратное обеспечение:
  - компьютер с процессором Intel или совместимым, с тактовой частотой 1 ГГц и выше (рекомендуется 2 ГГц и выше);
  - не менее 512 МБ ОЗУ (рекомендуется 1 Гб и более);
  - 200 МБ свободного места на жестком диске.

Авторами выполнена реализация программы выбора сечения проводов в токовых цепях релейной защиты в формате «программа как сервис». Данная программа размещена в сети Интернет и доступна пользователям через любой интернет-браузер. Скачать программу бесплатно можно по ссылке <http://www.ekra-adr.ru/>. Там же размещены инструкции по установке программы и по применению.

В настоящее время продолжается работа по созданию и других программ для проектных и научно-технических расчетов в области релейной защиты и противоаварийной автоматики электрических станций и подстанций, которые в совокупности и составят единое информационное пространство для проектных и исследовательских работ.

**Методика проверки времени достаточно точной трансформации (метод «ЭКРА»)**

Кроме периодической составляющей в ТКЗ может содержаться апериодическая составляющая, которая

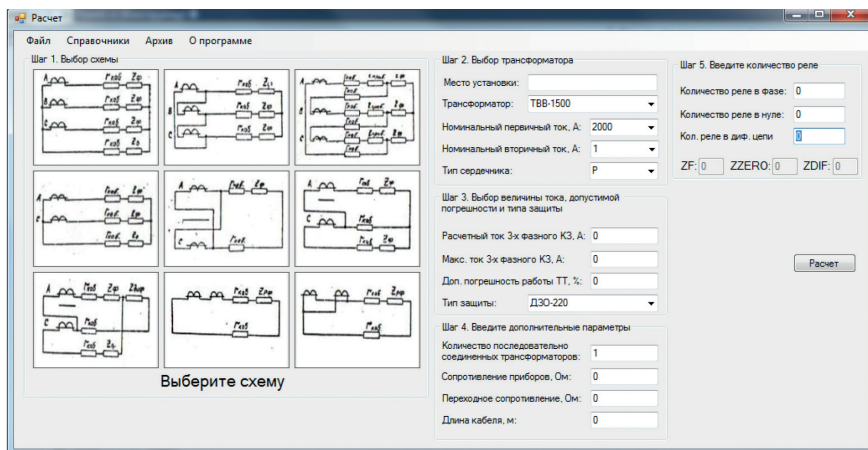


Рис. 2. Интерфейс программы выбора сечения проводов в токовых цепях релейной защиты.

Приложение А (обязательное)  
Расчет нагрузок на трансформаторы тока

Таблица В.1 – Расчет сечений жил контрольных кабелей в токовых цепях

Минимальная ТТ	Вид защиты	Тип ТТ и его коэффициент трансформации	Расчетный ток КЗ, I <sub>кз.А</sub>	Мин. ток КЗ, I <sub>кз.А</sub>	Классификация кабелей	Мин. приток, I <sub>приток, А</sub>	Поправочный коэффициент, К <sub>п</sub>	Расчетный ток, I <sub>расч, А</sub>	Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Сопоротивление релейной нагрузки, Ом	Сопоротивление релейной нагрузки в кабеле, Ом	Допустимый ток, I <sub>доп, А</sub>	Величина поправки, n	Величина параметра n	Длина кабеля, м	Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Сечение жил, мм <sup>2</sup>	Амплитудное значение тока, I <sub>ампл, А</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Валентин	220	150	TBB-1500	2000	1000	3,00	6,00	0,00	2,65		1,10	0,00	225,00	0,00	2,00	200,00		1,50	87,99
			1-фазный																
			3-фазный																

Рис. 3. Таблица с результатами расчёта

является однополярной. В этом случае насыщение сердечника ТТ происходит существенно быстрее, чем при воздействии только периодической составляющей. В [1] показано, что величина нагрузки, подключённой ко вторичной обмотке ТТ, влияет на время насыщения сердечника ТТ только в первом периоде. При насыщениях сердечника ТТ во втором и последующих периодах на момент наступления насыщения влияет постоянная времени затухания апериодической составляющей (T<sub>1</sub>). Следовательно, величина Z<sub>доп</sub>, выбранная по условию трансформации периодической составляющей с погрешностью не больше заданной, является максимально

возможной. В случае, если при выбранной таким образом величине Z<sub>доп</sub> время насыщения сердечника ТТ (длительность интервала достаточно точной трансформации (ДТТ)) оказывается меньше допустимого по условиям работы измерительных органов (ИО) защиты данного типа, величину Z<sub>доп</sub> необходимо снизить.

Будем проводить дальнейший анализ для ТКЗ, описываемого уравнением

$$i_{1-макс} \cdot (\cos\varphi_{кз} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \cos(\omega \cdot t + \varphi_{кз})), \quad (1)$$

где I<sub>макс</sub> – максимальное значение вынужденной составляющей ТКЗ; φ<sub>кз</sub> – фаза КЗ;

$T_1$  – постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока КЗ;  
 $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – частота вынужденной составляющей;  
 $t$  – время.

В [12] приведены методика вычисления и кривые для определения момента первого насыщения сердечника ТТ в случае максимального содержания аperiodической составляющей при различном характере нагрузки, который принято характеризовать величиной  $\cos\varphi_2$ , и при аппроксимации кривой намагничивания прямоугольной характеристикой намагничивания (ПХН).

Уравнение для расчёта времени насыщения сердечника ТТ при принятых допущениях имеет вид [12]:

$$\sin\varphi_2 \cdot e^{-\frac{t_s}{T_1}} + \omega \cdot T_1 \cdot \cos\varphi_2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_s}{T_1}}\right) - \sin(\omega \cdot t_s + \varphi_2) = \frac{B_s - B_r}{B_{max}}, \quad (2)$$

где:  $t_s$  – время насыщения сердечника ТТ;  
 $B_s$  – индукция насыщения;  
 $B_r$  – остаточная индукция;  
 $B_{max}$  – максимальное значение индукции в сердечнике при учёте насыщения.

Решая (2) относительно  $t_s$ , найдём зависимости момента первого насыщения от трёх величин:  $B^* = \frac{B_s - B_r}{B_{max}}$ ,  $T_1$  и  $\cos\varphi_2$ .

Применение на практике кривых из [12] для определения момента первого насыщения сердечника ТТ при различном характере нагрузки приводит к существенной погрешности, так как они построены для  $B^*$  в диапазоне изменения от 0 до 10. При этом масштаб не позволяет определить значения  $t_s$  с достаточной для практики точностью при значениях  $B^*$  от 0 до 2, а именно этот диапазон и важен для практики.

Результат расчёта приведён в виде графиков (рис. 4).

Приведённые на рис. 4 кривые позволяют определить время первого насыщения сердечника ТТ при КЗ с

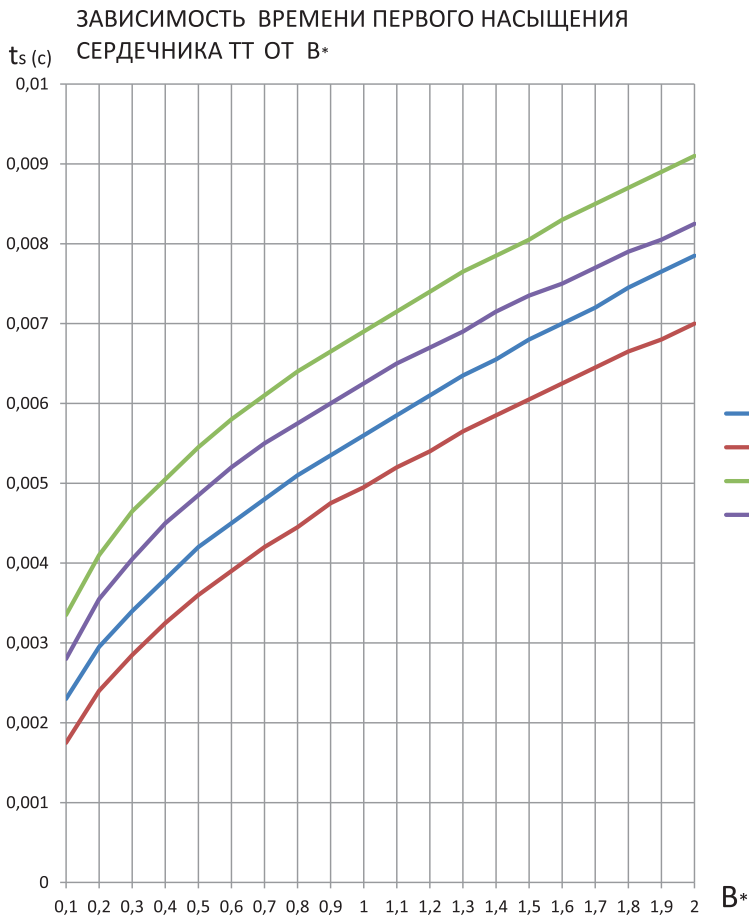


Рис. 4. Кривые зависимости  $t_s$  от  $B^*$  при  $\cos\varphi_2=1,0$  и  $\cos\varphi_2=0,8$

максимальной аperiodической составляющей. В случае если время, определённое по этим кривым, окажется меньше допустимого времени насыщения, то необходимо уменьшить нагрузку на ТТ до величины, при которой это время окажется не меньше допустимого.

Однако минимальное время насыщения не всегда достигается в этом режиме [4]. В частности, там показано, что до времени насыщения примерно 7 мс расчётным является режим без аperiodической составляющей. Из этого можно сделать вывод, что каждому минимальному значению времени насыщения соответствует своё значение фазы КЗ. При заданных значениях  $B^*$  сердечник ТТ насытится максимально быстро (минимальное значение вре-

мени насыщения сердечника ТТ) ( $t_{s, \min}$ ) при фазе КЗ, равной  $\varphi_{K3} = (\pi - \omega \cdot t_{s, \min}) / 2$  для ТКЗ, описываемого выражением (1).

Для важного для практики случая чисто активной нагрузки выражение для определения индукции в сердечнике ТТ имеет вид [9]:

$$B = \frac{r_2}{w \cdot q} \int_0^t i_2 \cdot dt + B_r \quad (3)$$

Подставляя в это уравнение ток, после интегрирования получим:

$$B_s - B_r = \frac{r_2 \cdot I_{max}}{w_2 \cdot Q \cdot \omega} \left[ \omega \cdot \cos\varphi_{K3} \cdot T_1 \left(1 - e^{-\frac{t_s}{T_1}}\right) + \sin\varphi_{K3} - \sin(\varphi_{K3} + \omega t_s) \right]$$



Табл. 1. Зависимость фазы КЗ, при которой достигается минимальное значение времени насыщения сердечника ТТ

$t_{s\text{ мин}}$ (мс)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\varphi_{\text{КЗ}}$ (рад)	1,57	1,413	1,256	1,099	0,942	0,785	0,628	0,471	0,314	0,157	0,0
$\cos\varphi_{\text{КЗ}}$	0,0	0,157	0,310	0,454	0,589	0,707	0,809	0,891	0,951	0,987	1,0

где  $B_{ts}$  – мгновенное значение индукции в сердечнике ТТ в момент насыщения, то есть при  $t=t_s$ ;

$g_2$  – величина активной нагрузки на трансформатор тока;

$w_2$  – число витков вторичной обмотки трансформатора тока;

$Q$  – сечение стали трансформатора тока.

В табл. 2 приведена зависимость относительной индукции, определённой по формуле

$$B_*^{\text{мин}} = \frac{B_{t_s - B_0}}{B_{\text{max}}} \quad (4)$$

$$\text{где } B_{\text{max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{r_2}}{\omega \cdot Q \cdot w_2}$$

в функции от  $T_1$  и  $t_{s\text{ мин}}$ . Эта таблица позволяет определить, какое минимальное значение  $B_*$  необходимо иметь, чтобы обеспечить  $t_{s\text{ мин}}$  не меньше заданного.

Порядок применения этой таблицы следующий:

1. По заданным значениям  $T_1$  и  $t_{s\text{ мин}}$  определяем величину  $B_*^{\text{мин}}$ .

2. По формуле  $B_{\text{max}} = \frac{\sqrt{2} Z_{2\text{ ном}} \cdot I_{2\text{ ном}}}{w_2 \cdot Q \cdot \omega}$

определяем величину  $B_{\text{max}}$  для расчётного режима.

3. По формуле  $B_* = \frac{B_s - B_r}{B_{\text{max}}}$  вычисляем

величину  $B_*$  для этого же режима.

Если  $B_* > B_*^{\text{мин}}$  то время насыщения сердечника ТТ ( $t_{s\text{ мин}}$ ) больше, чем минимально допустимое время, определённое по условиям правильной работы защиты, и величину нагрузки уменьшать не требуется.

Если  $B_* < B_*^{\text{мин}}$ , то время насыщения сердечника ТТ ( $t_{s\text{ мин}}$ ) меньше, чем минимально допустимое время, определённое по условиям правильной работы защиты, величину нагрузки необходимо уменьшить.

Табл. 2. Зависимость минимальной относительной индукции  $B_*^{\text{мин}}$  от  $T_1$  и минимального времени насыщения сердечника ТТ ( $t_{s\text{ мин}}$ )

	$T_1=0,02$ с	$T_1=0,05$ с	$T_1=0,1$ с	$T_1=0,2$ с	$T_1=0,3$ с
$t_{s\text{ мин}}$	$B_*^{\text{мин}}$	$B_*^{\text{мин}}$	$B_*^{\text{мин}}$	$B_*^{\text{мин}}$	$B_*^{\text{мин}}$
0	0	0	0	0	0
0,001	0,04788	0,0486	0,04885	0,049	0,04901
0,002	0,18455	0,19011	0,19202	0,193	0,1933
0,003	0,39684	0,41481	0,42105	0,4242	0,42527
0,004	0,66862	0,70903	0,72323	0,7305	0,7329
0,005	0,98153	1,05575	1,08217	1,0957	1,10027
0,006	1,31582	1,43533	1,47842	1,5006	1,50811
0,007	1,65121	1,82633	1,89027	1,9234	1,93458
0,008	1,96765	2,20633	2,29459	2,3405	2,35609
0,009	2,24613	2,55288	2,66775	2,7278	2,74822
0,01	2,46939	2,84433	2,98651	3,0612	3,08665

Величину нагрузки на ТТ необходимо уменьшить до такой величины, чтобы выполнялось условие  $B_* < B_*^{\text{мин}}$ .

Новое значение  $Z_{\text{доп}}^{\text{ио}}$  определяется по формуле

$$Z_{\text{доп}}^{\text{ио}} = \frac{B_*}{B_*^{\text{мин}}} \cdot Z_{\text{доп}} \quad (5)$$

где  $Z_{\text{доп}}^{\text{ио}}$  – максимальное допустимое значение величины нагрузки на ТТ по условию обеспечения времени ДТТ не менее, чем заданное по условию работы ИО.

Пример.

Дано:  $S_{\text{н.ном}} = 30$  ВА,  $K_{10\text{ ном}} = 20$ ,  $I_{2\text{ ном}} = 1$  А.

**Расчёт 1.** По формуле  $Z_{2\text{ ном}} = \frac{S_{2\text{ ном}}}{I_{2\text{ ном}}^2}$

имеем  $30/1 = 30$  Ом.

Защита имеет минимальное время срабатывания ИО  $t_{\text{ср.ио}} = 3$  мс. По табл. 2 при  $T_1 = 0,3$  с определяем  $B_*^{\text{мин}} = 0,425$ .

Для режима КЗ имеем  $B_{\text{max}} = \frac{I_{2\text{ ном}} \cdot K_{\text{расч}} \cdot Z_2}{222 \cdot Q \cdot w_2}$ .

Принимая  $K_{\text{расч}} = K_{10\text{ ном}}$  и  $Z_2 = Z_{2\text{ ном}}$ , имеем числитель  $U_2 = I_{2\text{ ном}} \cdot K_{10\text{ ном}} \cdot Z_{2\text{ ном}} = 1 \cdot 20 \cdot 30 = 600$  В, а знаменатель  $222 \cdot 17,3 \cdot 10^{(-4)} \cdot 1000 = 17,3 \cdot 22,2 = 384,6$ . Тогда  $B_{\text{max}} = 600/384,6 = 1,56$  Тл. Принимая  $B_s = 1,8$  Тл, а  $B_r = 1,0$  Тл (режим неуспешного АПВ), имеем  $B_* = 0,8/1,56 = 0,513$ . То есть  $B_* > B_*^{\text{мин}}$ . Следовательно, выбранный ТТ обеспечит время трансформации ТКЗ при самой неблагоприятной фазе КЗ, достаточное для срабатывания измерительного органа РЗ.

**Расчёт 2.** Допустим, что минимальное время срабатывания ИО  $t_{\text{ср.ио}} = 5$  мс. По табл. 2 при  $T_1 = 0,3$  с определяем  $B_*^{\text{мин}} = 1,10$ . Из результата предыдущего расчёта известно, что  $B_* = 0,513$ .