ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 58669— 2019

Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ С ЗАМКНУТЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ ДЛЯ ЗАЩИТЫ

Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2020

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 ноября 2019 г. № 1195-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, оформление, 2020

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины, определения и сокращения 2
3.1 Термины и определения 2
3.2 Сокращения 3
4 Общие положения 3
5 Определение времени до насыщения трансформаторов тока 5
5.1 Определение времени до насыщения трансформаторов тока аналитическим методом 5
5.2 Определение времени до насыщения трансформаторов тока графическим методом по паспортным данным 6
5.3 Определение времени до насыщения трансформаторов тока графическим методом с использованием вольтамперной характеристики трансформаторов тока 7
5.4 Определение времени до насыщения трансформаторов тока графическим методом с использованием характеристики намагничивания трансформаторов тока 8
Приложение А (обязательное) Формулы для расчета сопротивления нагрузки 10
Приложение Б (обязательное) Универсальные характеристики для определения минимального значения времени до насыщения трансформаторов тока 11
Приложение В (справочное) Примеры выполнения расчетов времени до насыщения трансформаторов тока 26
Приложение Г (справочное) Теоретические основы моделирования и расчета режимов работы трансформаторов тока 49
Библиография 56

Введение

Положения настоящего стандарта направлены на обеспечение выполнения требований правил [1] (пункт 128), в соответствии с которыми технические характеристики трансформаторов тока и подключенных к ним устройств релейной защиты в совокупности должны обеспечивать правильную работу устройств релейной защиты при коротких замыканиях, в том числе при возникновении апериодической составляющей тока.

Определение времени до насыщения трансформаторов тока необходимо для:

- выбора трансформаторов тока с учетом требований производителей устройств релейной защиты при новом строительстве, реконструкции и техническом перевооружении объектов электроэнергетики;
- выбора устройств релейной защиты при создании новых или модернизации существующих устройств релейной защиты на существующих трансформаторах тока;
- проверки правильности функционирования устройств релейной защиты в переходных режимах при коротких замыканиях на существующих трансформаторах тока.

ОКС 27.010

Поправка к ГОСТ Р 58669—2019 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита. Трансформаторы тока измерительные индуктивные с замкнутым магнитопроводом для защиты. Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях

В каком месте	Напечатано	Должно быть
Раздел 3, пункт 1.3.4	1.3.4	3.1.4
Подпункт 5.2.3.1, формула 15	$-\sin(\omega \cdot t + \alpha + \vartheta) + \cos\alpha \cdot \sin\vartheta$,	$-\sin(\omega \cdot t + \alpha + \vartheta) + \cos\alpha \cdot \sin\vartheta$,
Приложение В. Пункт В.4.1.4, по формуле (24) (2 раза);	= 0,275, = 0, 465,	= 0,275 Тл, = 0, 465 Тл,
для показателя = 270,48 В	где $U_{2\sin}^{(3)}$ определяют по формуле (20):	где $U_{2\sin}^{(1)}$ определяют по формуле (20):
Пункт В.4.2.4 для показателя = 303,97 В	где $U_{2\sin}^{(3)}$ определяют по формуле (20):	где $U_{2\sin}^{(1)}$ определяют по формуле (20):
Пункт В.4.3.3 для *однофазного* КЗ: $K_{факт}^{(1)}$	= 6,37.	= 6,73.
Пункт В.4.3.4 для показателя = 155,46 В	где $U_{2\sin}^{(3)}$ определяют по формуле (20):	где $U_{2\sin}^{(1)}$ определяют по формуле (20):
Приложение Г. Пункт Г.5.3, формула (Г.21)	$K_{п.р}(t) = \sum_{i=1}^{n} I_{k.i^*}$	$K_{п.р}(t) = \sum_{i=1}^{n} I_{K.i^*}$

(ИУС № 6—7 2020 г.)

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ С ЗАМКНУТЫМ МАГНИТОПРОВОДОМ ДЛЯ ЗАЩИТЫ

Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях

United power system and isolated power systems. Relay protection.
Inductive measuring current transformers for protection with a closed magnetic circuit.
Methodology guidelines for determination of time to saturation during short circuits

Дата введения — 2020—01—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает методы расчета времени до насыщения измерительных индуктивных трансформаторов тока для защиты с замкнутым магнитопроводом при коротких замыканиях (классов точности Р, РХ и ТРХ), определяет исходные данные, необходимые для применения каждого из методов, устанавливает требования по подготовке к проведению расчетов времени до насыщения измерительных индуктивных трансформаторов тока и порядок выполнения указанных расчетов с использованием каждого из установленных методов.

1.2 Настоящий стандарт предназначен для применения собственниками и иными законными владельцами объектов электроэнергетики, субъектами оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике, проектными организациями, организациями, осуществляющими создание новых или модернизацию существующих устройств релейной защиты.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 15150 Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды

ГОСТ 18685 Трансформаторы тока и напряжения. Термины и определения

ГОСТ 19693 Материалы магнитные. Термины и определения

ГОСТ 22483 (IEC 60228:2004) Жилы токопроводящие для кабелей, проводов и шнуров

ГОСТ 26522 Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения

ГОСТ Р 52735 Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением свыше 1 кВ

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

Издание официальное

3 Термины, определения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 18685, ГОСТ 26522, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1.1 **ветвь вторичного тока трансформатора тока:** Цепь, образуемая вторичной обмоткой и присоединенной к ней вторичной цепью трансформатора тока.

3.1.2 **вольтамперная характеристика;** ВАХ: Выраженная графически или табличным способом зависимость между действующими значениями тока и напряжения на вторичной обмотке при приложении к последней синусоидального напряжения, причем первичная и все остальные обмотки разомкнуты.

3.1.3 **время до насыщения трансформатора тока:** Время до насыщения вторичной обмотки для защиты измерительного индуктивного трансформатора тока с замкнутым магнитопроводом при коротких замыканиях.

1.3.4 **коэффициент остаточной намагниченности K_r:** Отношение остаточного потокосцепления Ψ_r к потокосцеплению насыщения $\Psi_{нас}$, выраженное в относительных единицах или процентах.

Примечание — Коэффициент остаточной намагниченности можно также выразить в виде отношения $B_r/B_{нас}$, что соответствует коэффициенту прямоугольности предельной петли гистерезиса в соответствии с ГОСТ 19693.

3.1.5 **коэффициент переходного режима (переходный коэффициент) $K_{п.р}(t)$:** Функция, характеризующая изменение во времени отношения мгновенного значения потокосцепления при наличии апериодической составляющей в первичном токе к амплитудному значению потокосцепления, которое имело бы место при токе номинальной предельной кратности, не содержащем апериодической составляющей.

Примечание — Переходный коэффициент численно равен отношению мгновенного значения тока погрешности при наличии апериодической составляющей к амплитудному значению тока погрешности при токе номинальной предельной кратности, не содержащем апериодической составляющей.

3.1.6 **номинальная мощность вторичной нагрузки трансформатора тока (номинальная мощность трансформатора тока) $S_{н.ном}$:** Значение полной мощности (в вольт-амперах при установленном коэффициенте мощности), которую трансформатор тока должен передавать во вторичную цепь при номинальном вторичном токе и номинальной нагрузке.

Примечание — Номинальная мощность трансформатора тока является номинальной нагрузкой, выраженной в вольт-амперах при установленном коэффициенте мощности.

3.1.7 **номинальный вторичный ток трансформатора тока $I_{2ном}$:** Указанное в паспорте действующее значение вторичного тока, при котором трансформатор тока рассчитан функционировать в течение срока службы.

3.1.8 **номинальный первичный ток трансформатора тока $I_{1ном}$:** Указанное в паспорте действующее значение первичного тока, при котором трансформатор тока рассчитан функционировать в течение срока службы.

3.1.9 **номинальная предельная кратность трансформатора тока $K_{ном}$:** Наибольшая кратность первичного синусоидального тока по отношению к его номинальному значению при номинальной вторичной нагрузке, при которой полная погрешность не превышает полной погрешности, заданной классом точности.

3.1.10 **остаточная (начальная) магнитная индукция B_r:** Магнитная индукция, сохраняющаяся в ферромагнитном веществе при изменении напряженности магнитного поля от некоторого значения до нуля.

3.1.11 **остаточное потокосцепление Ψ_r:** Значение потокосцепления, определяемое магнитным потоком, остающимся в магнитопроводе после отключения тока с амплитудным значением, обеспечивающим потокосцепление насыщения $\Psi_{нас}$.

Примечание — Остаточная магнитная индукция B_r — магнитная индукция, соответствующая остаточному потокосцеплению Ψ_r.

3.1.12 **параметр режима *A*:** Отношение потокосцепления насыщения к амплитуде потокосцепления, созданного периодической составляющей тока короткого замыкания при фактическом сопротивлении ветви вторичного тока трансформатора тока.

3.1.13 **постоянная времени вторичного контура трансформатора тока T_s:** Постоянная времени контура, образуемого вторичной обмоткой трансформатора тока и присоединенной к ней внешней электрической цепью, определяемая отношением суммы индуктивностей намагничивания, рассеяния вторичной обмотки и нагрузки к суммарному активному сопротивлению вторичной обмотки и нагрузки.

3.1.14 **потокосцепление насыщения обмотки трансформатора тока $\Psi_{нас}$:** Максимальное значение магнитного потока, соответствующее насыщению материала магнитопровода трансформатора тока, умноженное на число витков обмотки.

Примечание — Магнитная индукция насыщения $B_{нас}$ — максимальное значение магнитной индукции, соответствующее потокосцеплению насыщения обмотки трансформатора тока $\Psi_{нас}$.

3.1.15 **трансформатор тока для защиты класса точности Р (трансформатор тока класса Р):** Трансформатор тока для защиты, для которого не задается требование ограничения остаточного потокосцепления, а уровень насыщения определяется в установившемся режиме короткого замыкания действующим значением периодического тока при значениях всех прочих параметров, соответствующих номинальным данным.

3.1.16 **трансформатор тока для защиты класса точности РХ (трансформатор тока класса РХ):** Трансформатор тока для защиты с пренебрежимо малым реактивным сопротивлением рассеяния, для которого не задано требование ограничения остаточного потокосцепления и известны характеристика намагничивания, активное сопротивление вторичной обмотки, сопротивление вторичной нагрузки и коэффициент трансформации.

3.1.17 **трансформатор тока для защиты класса точности ТРХ (трансформатор тока класса ТРХ):** Трансформатор тока для защиты, для которого не задается требование ограничения остаточного потокосцепления, а уровень насыщения определяется в переходном режиме короткого замыкания максимальным значением мгновенной погрешности при значениях всех прочих параметров, соответствующих номинальным данным.

3.1.18 **фактическая кратность первичного тока трансформатора тока $K_{факт}$:** Кратность фактического первичного тока по отношению к его номинальному значению.

3.1.19 **характеристика намагничивания трансформатора тока $B_m = f(H)$:** Зависимость амплитудного значения магнитной индукции в магнитопроводе от действующего значения напряженности магнитного поля в нем, снятая при подведении ко вторичной обмотке трансформатора тока синусоидального напряжения.

3.1.20 **эквивалентная постоянная времени $T_{р.экв}$:** Постоянная времени затухания свободной апериодической составляющей тока, затухающей по экспоненциальному закону, которой заменяют сумму свободных апериодических составляющих, имеющих неодинаковые начальные значения и постоянные времени затухания.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте применены следующие сокращения:

ВАХ — вольтамперная характеристика трансформатора тока;
КЗ — короткое замыкание;
ЛЭП — линия электропередачи;
ОРУ — открытое распределительное устройство;
ПХН — прямоугольная характеристика намагничивания;
ТТ — трансформатор тока;
ЭДС — электродвижущая сила.

4 Общие положения

4.1 В зависимости от объема сведений о ТТ, имеющихся у собственников и иных законных владельцев объектов электроэнергетики, субъектов оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике, проектных организаций, организаций, осуществляющих создание новых или модернизацию существующих устройств релейной защиты, следует использовать один или несколько из следующих методов расчета времени до насыщения измерительных индуктивных трансформаторов тока для защиты с замкнутым магнитопроводом при КЗ (далее — время до насыщения ТТ, $t_{нас}$):

- аналитический метод;
- графический метод по паспортным данным;

- графический метод с использованием ВАХ ТТ;
- графический метод с использованием характеристики намагничивания ТТ.

4.2 При использовании каждого из методов расчета времени до насыщения ТТ для определения его величины ($t_{нас}$) необходимо подготовить исходные данные для расчетов, определить расчетную схему, схемно-режимные условия и расчетную точку КЗ, выполнить подготовительные расчеты.

4.2.1 К исходным данным для расчетов относятся:

$I_{1.ном}$ — номинальный первичный ток ТТ;

$I_{2.ном}$ — номинальный вторичный ток ТТ;

R_2 — активное сопротивление вторичной обмотки ТТ;

X_2 — индуктивное сопротивление вторичной обмотки ТТ;

$z_{н.ном}$ — номинальная нагрузка ТТ (или $S_{н.ном}$ — номинальная мощность вторичной нагрузки ТТ);

ε — полная погрешность ТТ;

$K_{ном}$ — номинальная предельная кратность ТТ.

Значения сопротивлений приводят к нормальной температуре в соответствии с ГОСТ 15150.

4.2.2 Расчетная схема электрической станции должна содержать все питающие элементы [генераторы, трансформаторы и(или) автотрансформаторы блоков], трансформаторы и(или) автотрансформаторы связи, а также линии связи с системными эквивалентами, соответствующими максимальному режиму работы системы. В состав расчетной схемы подстанции должны входить питающие линии и силовые трансформаторы (автотрансформаторы). Расчетная схема должна содержать эквиваленты систем, соответствующие максимальному режиму их работы.

4.2.3 Схемно-режимные условия и расчетную точку КЗ необходимо выбирать таким образом, чтобы через проверяемый ТТ при КЗ проходил наибольший ток $I_{КЗ}$.

4.2.4 Для определения значения $t_{нас}$ необходимо произвести расчеты при трехфазных КЗ, для сетей с глухозаземленной нейтралью и при однофазных КЗ. Результатом расчета значения $t_{нас}$ должна являться наименьшая из полученных величин.

4.2.5 При осуществлении подготовительных расчетов необходимо определить величину нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.экв}$ для каждого из расчетных видов КЗ.

4.2.6 Расчет нагрузок во вторичных цепях ТТ, используемых в схемах защит, должен осуществляться с использованием расчетных формул в соответствии с приложением А.

4.2.7 Эквивалентную постоянную времени $T_{р.экв}$ необходимо рассчитывать с использованием специализированных программных комплексов и созданных в них моделей сети, предназначенных для расчета электромагнитных переходных процессов.

При приближенных расчетах эквивалентную постоянную времени $T_{р.экв}$ допускается рассчитывать по формуле

$$T_{р.экв} = \frac{1}{I_{КЗ\Sigma}} \left(\sum_{i=1}^{n} I_{КЗi} \cdot T_{р.i} \right), \quad (1)$$

где $I_{КЗ\Sigma}$ — действующее значение суммарного тока КЗ;

$I_{КЗi}$ — действующее значение тока КЗ в i-й ветви;

$T_{р.i}$ — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока в каждой из i-й ветви, питающей место КЗ.

Постоянную времени затухания апериодической составляющей тока в каждой i-й ветви, питающей место КЗ, $T_{р.i}$ необходимо определять с использованием одного из следующих способов.

4.2.7.1 Рассчитывать по формуле

$$T_{р.i} = \frac{X_i}{\omega \cdot R_i}, \quad (2)$$

где X_i — эквивалентное индуктивное сопротивление i-й ветви относительно точки КЗ;

ω — угловая частота;

R_i — эквивалентное активное сопротивление i-й ветви относительно точки КЗ.

4.2.7.2 При наличии осциллограмм токов КЗ соответствующих ЛЭП и оборудования $T_{р.экв}$ допускается определять графически с использованием следующего способа. В токе КЗ необходимо выделить апериодическую составляющую (например, с использованием сервисных возможностей программного обеспечения осциллографа) и по ней определить $T_{р.экв}$ как время, за которое начальное значение апериодической составляющей уменьшилось в e раз, где e — основание натурального логарифма. Найденное с использованием указанного способа значение $T_{р.экв}$ необходимо применять только к той

схеме сети и составу ЛЭП и оборудования, которое находилось в работе на момент возникновения записанного на осциллограмме КЗ.

4.3 Расчеты времени до насыщения ТТ следует выполнять при отсутствии в сердечниках ТТ остаточной магнитной индукции и при наличии в сердечниках ТТ предельных значений остаточной магнитной индукции $B_{r.пред}$, где $B_{r.пред}$=0,86·$B_{нас}$.

5 Определение времени до насыщения трансформаторов тока

5.1 Определение времени до насыщения трансформаторов тока аналитическим методом

5.1.1 При применении аналитического метода следует использовать исходные данные в соответствии с 4.2.1.

5.1.2 При применении аналитического метода при отсутствии в сердечниках ТТ остаточной магнитной индукции время до насыщения ТТ необходимо рассчитывать по 5.1.4, при наличии в сердечниках ТТ остаточной магнитной индукции время до насыщения ТТ необходимо рассчитывать по 5.1.5.

5.1.3 При расчете времени до насыщения ТТ аналитическим методом:

- параметр режима А необходимо определять в соответствии с 5.1.6;
- коэффициент остаточной намагниченности сердечника ТТ K_r необходимо принимать равным 0,86.

5.1.4 При отсутствии в сердечниках ТТ остаточной магнитной индукции время до насыщения ТТ $t_{нас}$ необходимо рассчитывать по формуле

$$t_{нас} = T_{р.экв} \cdot ln\frac{\omega \cdot T_{р.экв}}{\omega \cdot T_{р.экв} - A + 1}. \quad (3)$$

Расчет по формуле (3) допустим при соблюдении условий (4) и (5):

$$\omega \cdot T_{р.экв} + 1 > A, \quad (4)$$

$$A > 1. \quad (5)$$

Невыполнение условия (4) означает, что насыщение магнитопровода отсутствует, и время до насыщения ТТ равно бесконечности.

Невыполнение условия (5) означает, что эксплуатация ТТ в таких условиях недопустима, т. к. ток предельной кратности меньше действующего значения тока КЗ.

5.1.5 При наличии в сердечниках ТТ остаточной магнитной индукции время до насыщения ТТ необходимо рассчитывать по формуле

$$t_{нас} = T_{р.экв} \cdot \ln\frac{\omega \cdot T_{р.экв}}{\omega \cdot T_{р.экв} - A \cdot (1 - K_r) + 1}. \quad (6)$$

Расчет по формуле (6) допустим при соблюдении условий (7) и (8):

$$\omega \cdot T_{р.экв} + 1 > A \cdot (1 - K_r), \quad (7)$$

$$A \cdot (1 - K_r) > 1. \quad (8)$$

Невыполнение условия (7) означает, что насыщение магнитопровода отсутствует и время до насыщения ТТ равно бесконечности.

В случае, если условие (8) не выполняется, значение $t_{нас}$, вычисленное по формуле (6), принимает отрицательное значение, и для определения времени до насыщения ТТ следует использовать графический метод по паспортным данным в соответствии с 5.2.

5.1.6 Параметр режима А необходимо вычислять по формуле

$$A = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном} \cdot z_{2\Sigma ном}}{I_{КЗ} \cdot z_{2\Sigma}}, \quad (9)$$

где $z_{2\Sigma ном}$ — номинальное полное сопротивление вторичной нагрузки ТТ;

$z_{2\Sigma}$ — полное сопротивление ветви вторичного тока.

Номинальное полное сопротивление вторичной нагрузки ТТ $z_{2\Sigma ном}$ необходимо рассчитывать по формуле

$$z_{2\Sigma ном} = \sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном} \cdot \cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(X_2 + z_{н.ном} \cdot \sin\varphi_{н.ном}\right)^2}, \quad (10)$$

где $\varphi_{н.ном}$ — номинальное значение угла сопротивления нагрузки ТТ.

Полное сопротивление ветви вторичного тока $z_{2\Sigma}$ необходимо вычислять по формуле

$$z_{2\Sigma} = \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}\right)^2 + \left(X_2 + X_{н.факт}\right)^2}, \quad (11)$$

где $R_{н.факт}$— фактическое активное сопротивление нагрузки ТТ,

$X_{н.факт}$ — фактическое индуктивное сопротивление нагрузки ТТ.

5.1.7 Если значение $t_{нас}$, полученное по результатам вычислений по аналитическому методу, составило менее 15 мс, следует использовать графический метод по паспортным данным в соответствии с 5.2.

5.2 Определение времени до насыщения трансформаторов тока графическим методом по паспортным данным

5.2.1 При применении графического метода по паспортным данным следует использовать исходные данные в соответствии с 4.2.1.

5.2.2 При применении графического метода по паспортным данным время до насыщения ТТ необходимо определять графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

Для выбора универсальных характеристик необходимо рассчитать косинус угла сопротивления ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}}. \quad (12)$$

5.2.2.1 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, которые необходимо рассчитывать в соответствии с 5.1.6, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$, необходимо определять соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р.}(t_{нас}) = A. \quad (13)$$

5.2.2.2 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$, следует определять соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р.}(t_{нас}) = A(1 - K_r), \quad (14)$$

где K_r — коэффициент остаточной намагниченности, который необходимо принимать равным 0,86.

5.2.3 В целях уточнения расчетов времени до насыщения ТТ допускается выполнить расчет по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях (без использования $T_{р.экв}$) согласно следующему методу.

5.2.3.1 Необходимо построить временные диаграммы по формуле

$$K_{п.р.}(t) = \sum_{i=1}^{n} \frac{I_{кз.i}}{I_{кз\Sigma}} \left\{ \sin\alpha \cdot \cos\vartheta \cdot e^{-\frac{1}{T_{p.i}}} + \cos\alpha \cdot \cos\vartheta \cdot \omega \cdot T_{p.i} \left(1 - e^{-\frac{1}{T_{p.i}}}\right) \right\} -$$

$$- \sin(\omega \cdot t + \alpha + \vartheta) + \cos\alpha \cdot \sin\vartheta), \quad (15)$$

где $\frac{I_{кз.i}}{I_{кз\Sigma}}$ — доля тока в i-ой ветви по отношению к суммарному току КЗ $I_{кз\Sigma}$;

α — угол сопротивления ветви вторичного тока ТТ;

ϑ — начальная фаза периодической составляющей тока КЗ.

5.2.3.2 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, которые необходимо рассчитывать в соответствии с 5.1.6, и на построенных характеристиках $K_{п.р.}(t)$ следует определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (13).

5.2.3.3 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, и на построенных характеристиках $K_{п.р.}(t)$ следует определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (14).

5.3 Определение времени до насыщения трансформаторов тока графическим методом с использованием вольтамперной характеристики трансформаторов тока

5.3.1 При применении графического метода с использованием ВАХ ТТ следует использовать исходные данные в соответствии с 4.2.1 и ВАХ ТТ. ВАХ ТТ должна быть снята до значений тока намагничивания, соответствующих полной погрешности ТТ ε, т. е. не менее чем до 0,1(0,05) расчетной кратности тока КЗ.

5.3.2 Графический метод с использованием ВАХ ТТ допускается использовать, если выполняется условие:

$$\frac{I_{0.\varepsilon} / U_{\varepsilon}}{I_{лин} / U_{лин}} > 3, \tag{16}$$

где $I_{0.\varepsilon}$ — ток намагничивания;

U_{ε} — напряжение намагничивания, которое необходимо определить по ВАХ ТТ для рассчитанного значения $I_{0.\varepsilon}$;

$I_{лин}$ — ток, соответствующий $U_{лин}$;

$U_{лин}$ — напряжение, соответствующее середине линейного участка ВАХ.

Ток намагничивания $I_{0.\varepsilon}$ необходимо вычислять по формуле

$$I_{0.\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{100} \cdot I_{2.ном} \cdot K_{факт}, \tag{17}$$

где $K_{факт}$ — фактическая кратность первичного тока КЗ.

Фактическую кратность первичного тока КЗ $K_{факт}$ необходимо вычислять по формуле

$$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}, \tag{18}$$

где $I_{КЗ}$ — действующее значение тока КЗ в расчетной точке КЗ.

5.3.3 При применении графического метода с использованием ВАХ ТТ время до насыщения ТТ необходимо определять графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

Для выбора универсальных характеристик необходимо рассчитать косинус угла сопротивления ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12).

5.3.3.1 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, которые необходимо рассчитывать в соответствии с 5.3.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$, необходимо определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (13).

5.3.3.2 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$, необходимо определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (14).

5.3.4 Параметр режима А необходимо вычислять по формуле

$$A = \frac{U_{\varepsilon}}{U_{2sin}}, \tag{19}$$

где U_{ε} — напряжение намагничивания, которое необходимо определить по ВАХ ТТ для рассчитанного значения $I_{0.\varepsilon}$;

U_{2sin} — напряжение, соответствующее ЭДС вторичной обмотки при фактической кратности первичного тока ТТ $K_{факт}$ и суммарном сопротивлении ветви вторичного тока $z_{2\Sigma}$.

Напряжение U_{2sin} необходимо вычислять по формуле

$$U_{2sin} = K_{факт} \cdot I_{2.ном} \cdot z_{2\Sigma}, \tag{20}$$

где $K_{факт}$ — фактическая кратность первичного тока ТТ, которую необходимо вычислять по формуле (18);

$z_{2\Sigma}$ — полное сопротивление ветви вторичного тока, которое необходимо вычислять по формуле (11).

5.3.5 В целях уточнения расчетов времени до насыщения ТТ допускается выполнить расчет по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях (без использования $T_{р.экв}$) согласно следующему методу.

5.3.5.1 Необходимо построить временные диаграммы по формуле (15).

5.3.5.2 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения А, которые необходимо рассчитывать в соответствии с 5.3.4, и на построенных характеристиках $K_{п.р.}(t)$ следует определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (13).

5.3.5.3 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, и на построенных характеристиках $K_{п.р.}(t)$ следует определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (14).

5.4 Определение времени до насыщения трансформаторов тока графическим методом с использованием характеристики намагничивания трансформаторов тока

5.4.1 При применении графического метода с использованием характеристики намагничивания ТТ следует использовать исходные данные в соответствии с 4.2.1, а также:

- дополнительные данные ТТ (число витков вторичной обмотки ТТ w_2, поперечное сечение сердечника ТТ s и среднюю длину силовой линии l);
- характеристику намагничивания ТТ $B_m = f(H)$,

где B_m — амплитуда магнитной индукции;

H — действующее значение напряженности магнитного поля.

5.4.2 Графический метод с использованием характеристики намагничивания ТТ допускается использовать, если выполняется условие:

$$B_{m\varepsilon}(H_\varepsilon) \geq 1{,}8 \text{ Тл}, \tag{21}$$

где $B_{m\varepsilon}$ — амплитуда магнитной индукции, определенная по характеристике намагничивания ТТ для действующего значения напряженности магнитного поля H_ε.

Действующее значение напряженности магнитного поля H_ε необходимо вычислять по формуле

$$H_\varepsilon = I_{0.\varepsilon} \frac{w_2}{l}, \tag{22}$$

где $I_{0.\varepsilon}$ — ток намагничивания, который необходимо вычислять по формуле (17);

w_2 — число витков вторичной обмотки ТТ;

l — средняя длина силовой линии.

5.4.3 При применении графического метода с использованием характеристики намагничивания ТТ время до насыщения ТТ необходимо определять графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

Для выбора универсальных характеристик необходимо рассчитать косинус угла сопротивления ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12).

5.4.3.1 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, которые необходимо рассчитывать в соответствии с 5.4.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$, следует определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (13).

5.4.3.2 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$, следует определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (14).

5.4.4 Параметр режима А необходимо определять по формуле

$$A = \frac{B_{m\varepsilon}}{B_m}, \tag{23}$$

где $B_{m\varepsilon}$ — амплитуда магнитной индукции, определенная по характеристике намагничивания ТТ для действующего значения напряженности магнитного поля;

B_m — амплитуда магнитной индукции, соответствующая значению напряжения, соответствующего ЭДС вторичной обмотки, U_{2sin} при частоте электрического тока 50 Гц.

Значение амплитуды магнитной индукции B_m необходимо определять по формуле

$$B_m = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{2sin}}{\omega \cdot w_2 \cdot s}, \tag{24}$$

где w_2 — число витков вторичной обмотки ТТ;

s — поперечное сечение сердечника магнитопровода ТТ.

Напряжение U_{2sin} необходимо определять по формуле (20).

5.4.5 В целях уточнения расчетов времени до насыщения ТТ допускается выполнить расчет по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях (без использования $T_{р.экв}$) согласно следующему методу.

5.4.5.1 Необходимо построить временные диаграммы по формуле (15).

5.4.5.2 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, которые необходимо рассчитывать в соответствии с 5.4.4, и на построенных характеристиках $K_{п.р.}(t)$ необходимо определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (13).

5.4.5.3 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 – K_r)$, и на построенных характеристиках $K_{п.р.}(t)$ необходимо определять соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (14).

5.5 Примеры выполнения расчетов времени до насыщения ТТ приведены в приложении В. Теоретические основы моделирования и расчета режимов работы ТТ приведены в приложении Г.

Приложение А
(обязательное)

Формулы для расчета сопротивления нагрузки

А.1 Контрольные кабели необходимо моделировать активным сопротивлением $r_{пр}$ и определять по ГОСТ 22483 по формуле

$$r_{пр} = \frac{\rho \cdot l}{s}, \quad (А.1)$$

где ρ — удельное сопротивление проводника, Ом·мм^2/м;

l — длина контрольного кабеля, м;

s — площадь поперечного сечения жилы контрольного кабеля, мм^2.

А.2 Для схемы соединения группы ТТ «полная звезда» сопротивление нагрузки необходимо определять следующим образом:

- при трехфазном КЗ — по формуле

$$z_{н.факт} = r_{пр} + z_{рф}; \quad (А.2)$$

- при однофазном КЗ — по формуле

$$z_{н.факт} = 2r_{пр} + z_{рф} + z_{ро}, \quad (А.3)$$

где $z_{рф}$ — суммарное сопротивление устройств релейной защиты (для наиболее загруженной фазы);

$z_{ро}$ — суммарное сопротивление устройств релейной защиты, включенных в цепь общего провода.

А.3 Для схемы соединения группы ТТ «неполная звезда» сопротивление нагрузки необходимо определять при трехфазном КЗ по формуле

$$z_{н.факт} = \sqrt{3}r_{пр} + \sqrt{3}z_{рф}. \quad (А.4)$$

А.4 Для схемы соединения группы ТТ «треугольник» сопротивление нагрузки необходимо определять следующим образом:

- при трехфазном КЗ — по формуле

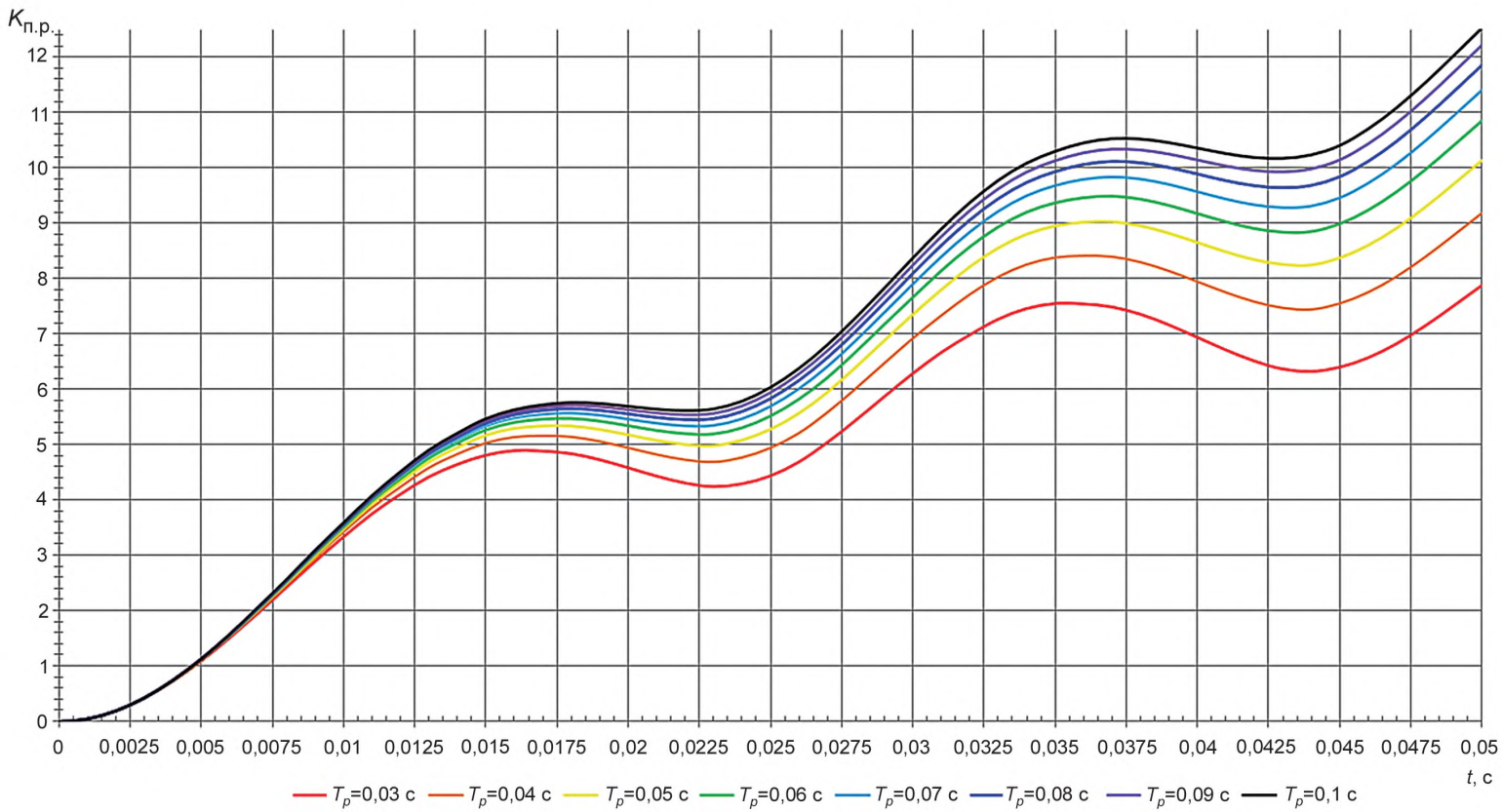
$$z_{н.факт} = 3r_{пр} + 3z_{рф}; \quad (А.5)$$

- при однофазном КЗ — по формуле

$$z_{н.факт} = 2r_{пр} + 2z_{рф}. \quad (А.6)$$

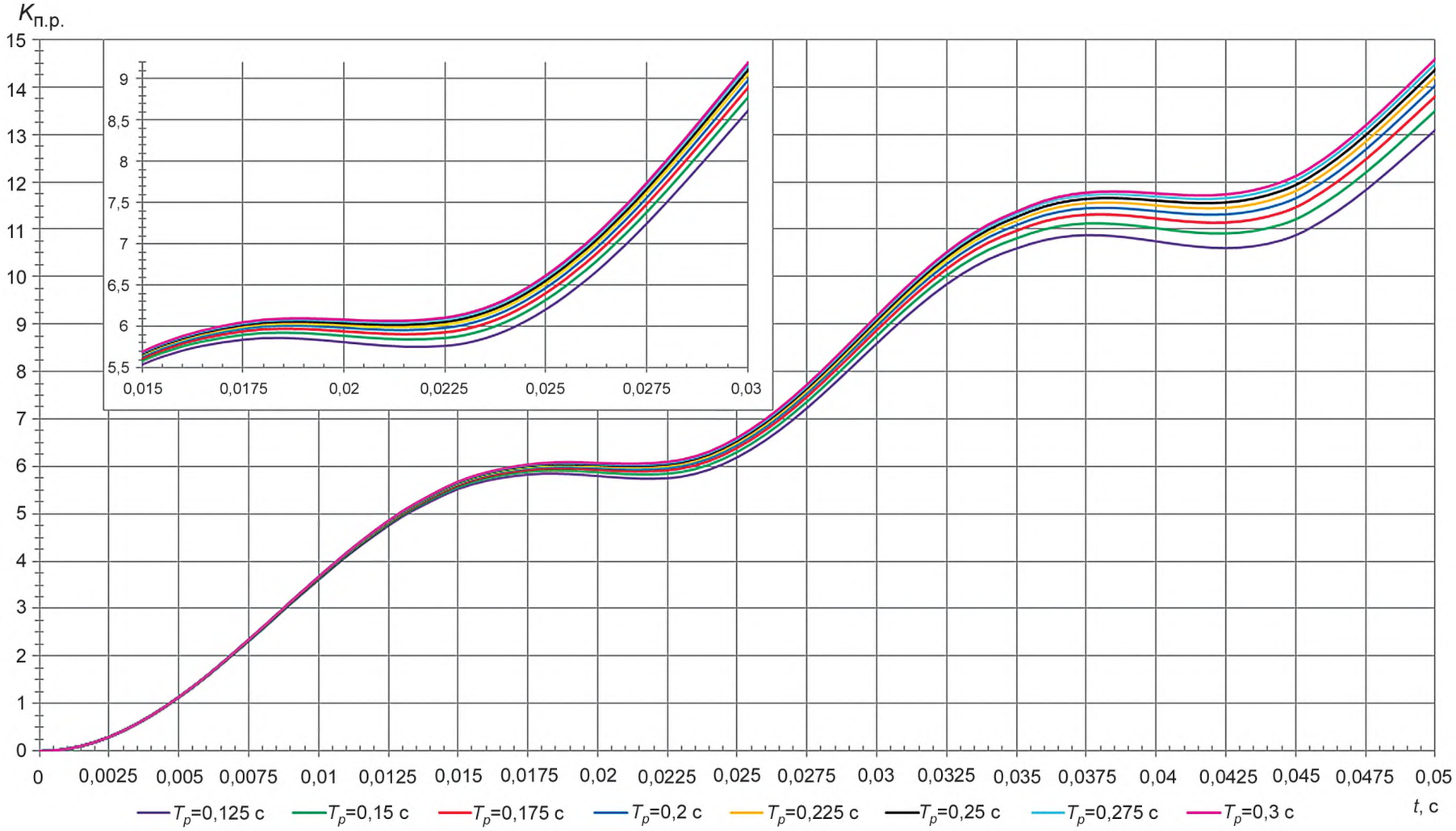
Приложение Б
(обязательное)

Универсальные характеристики для определения минимального значения времени до насыщения трансформаторов тока



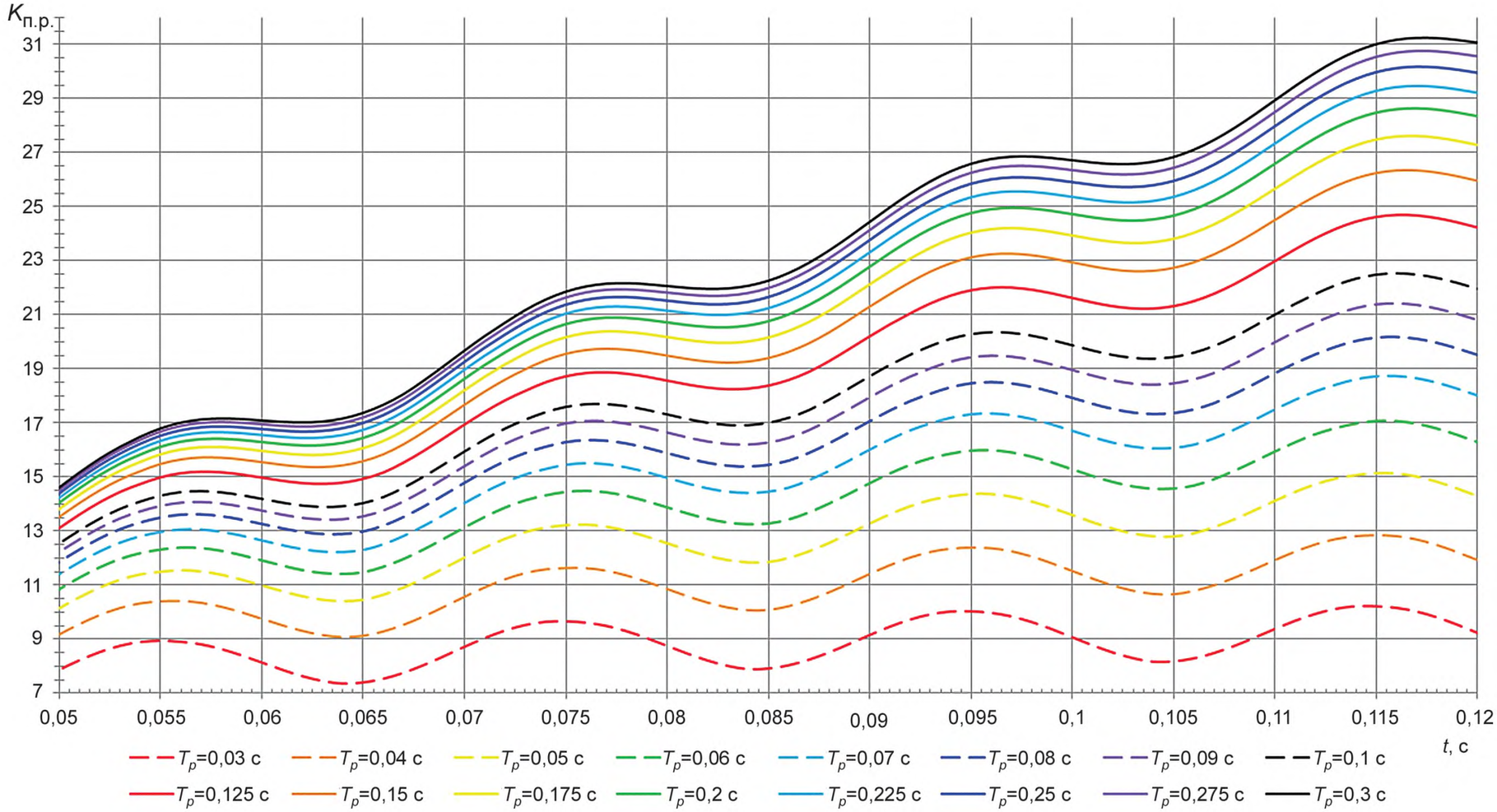
а) T_p = (0,03–0,1) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.1 — Универсальные характеристики ТТ при cos α = 1, лист 1



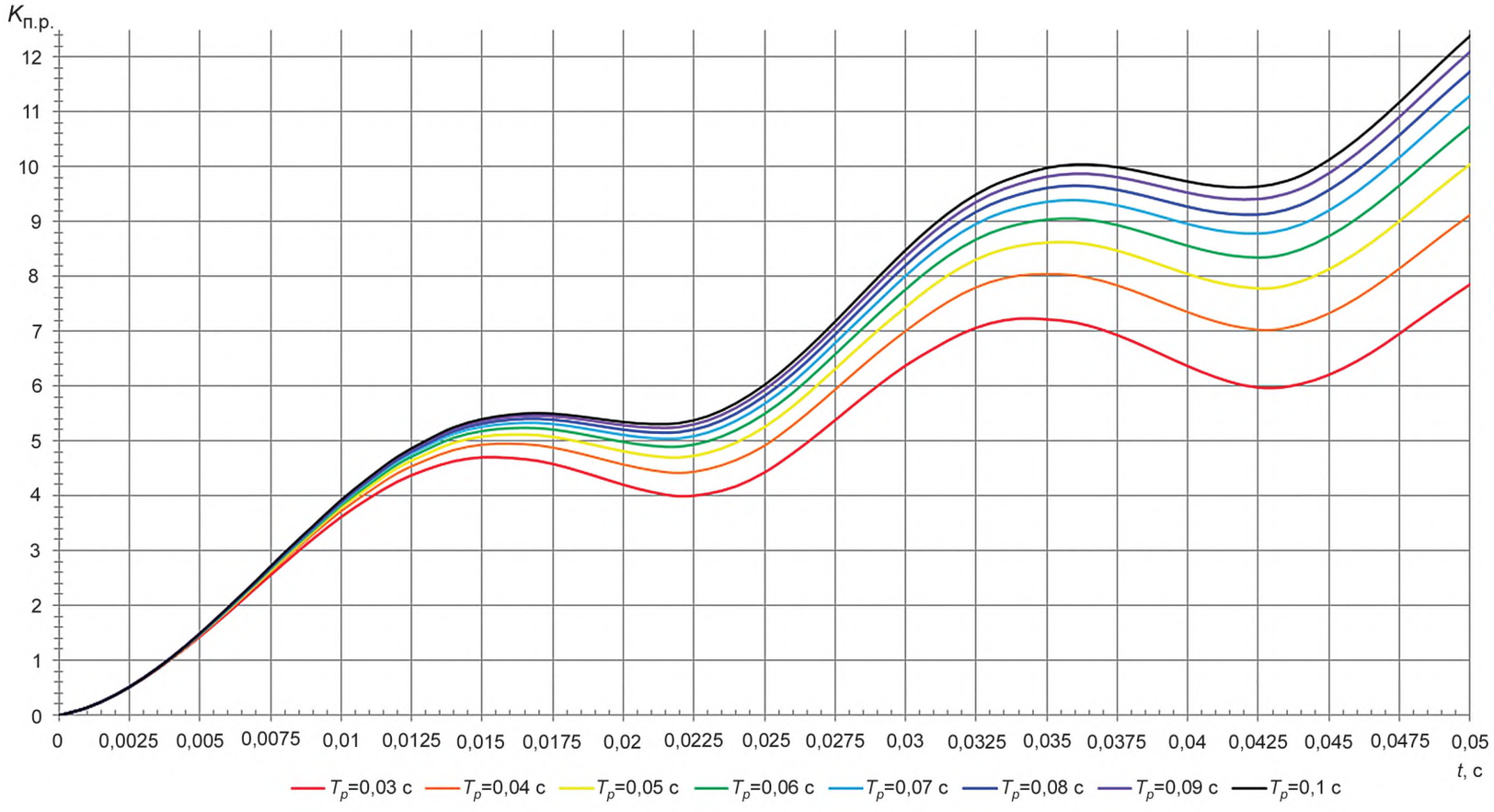
б) T_p = (0,1–0,3) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.1, лист 2



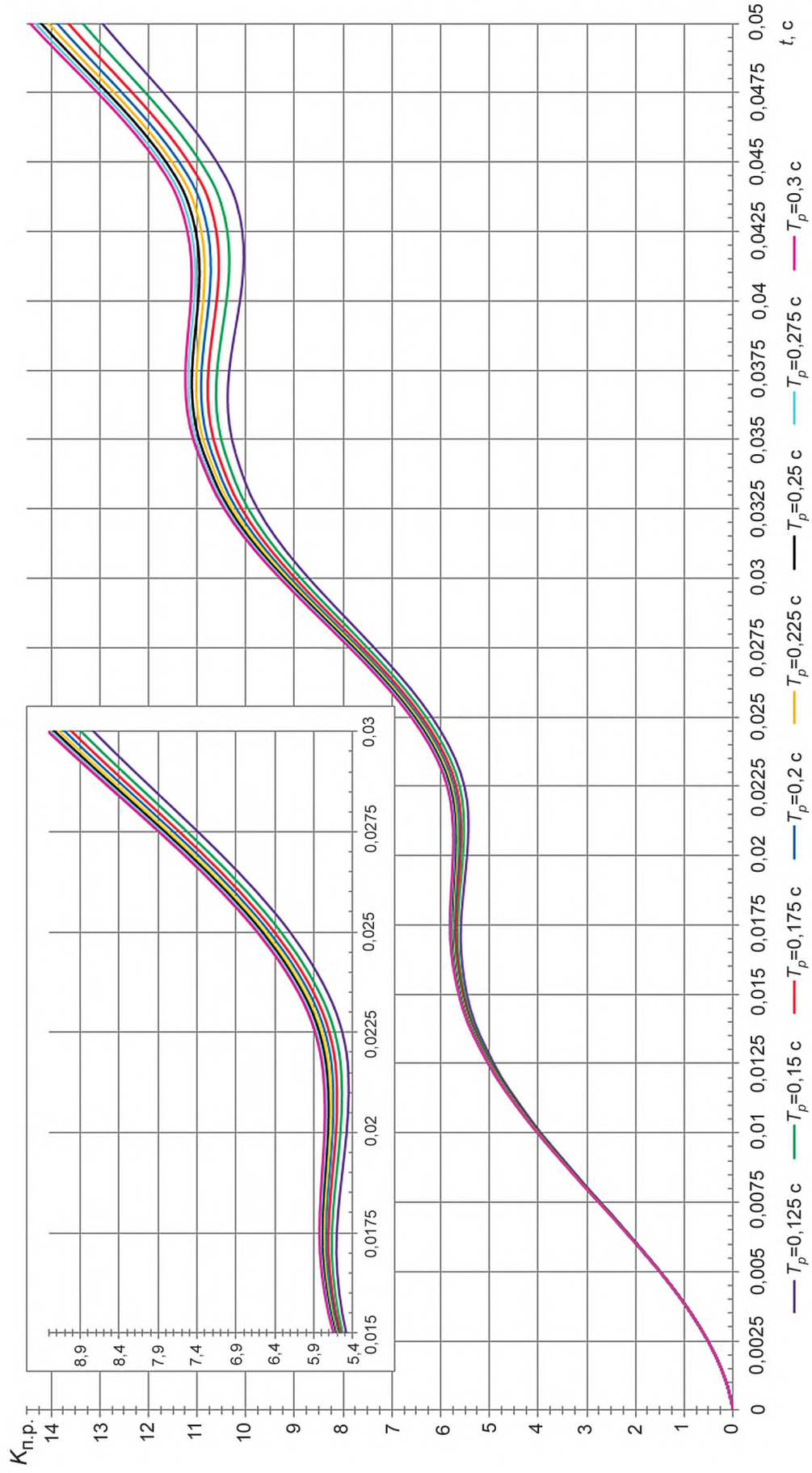
в) T_p = (0,03–0,3) с для t = (0,05–0,12) с

Рисунок Б.1, лист 3



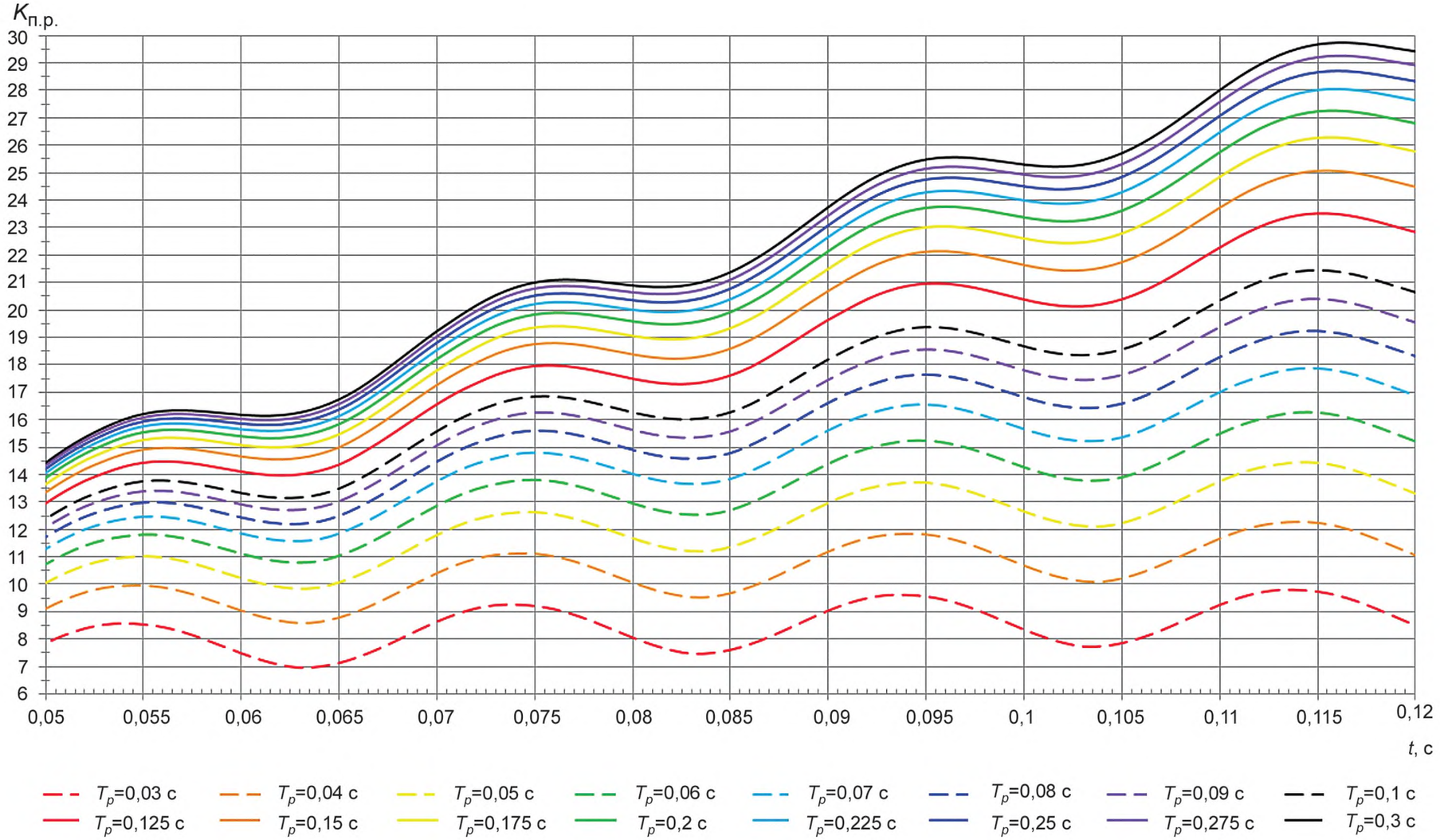
а) T_p = (0,03–0,1) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.2 — Универсальные характеристики ТТ при cos α = 0,95, лист 1



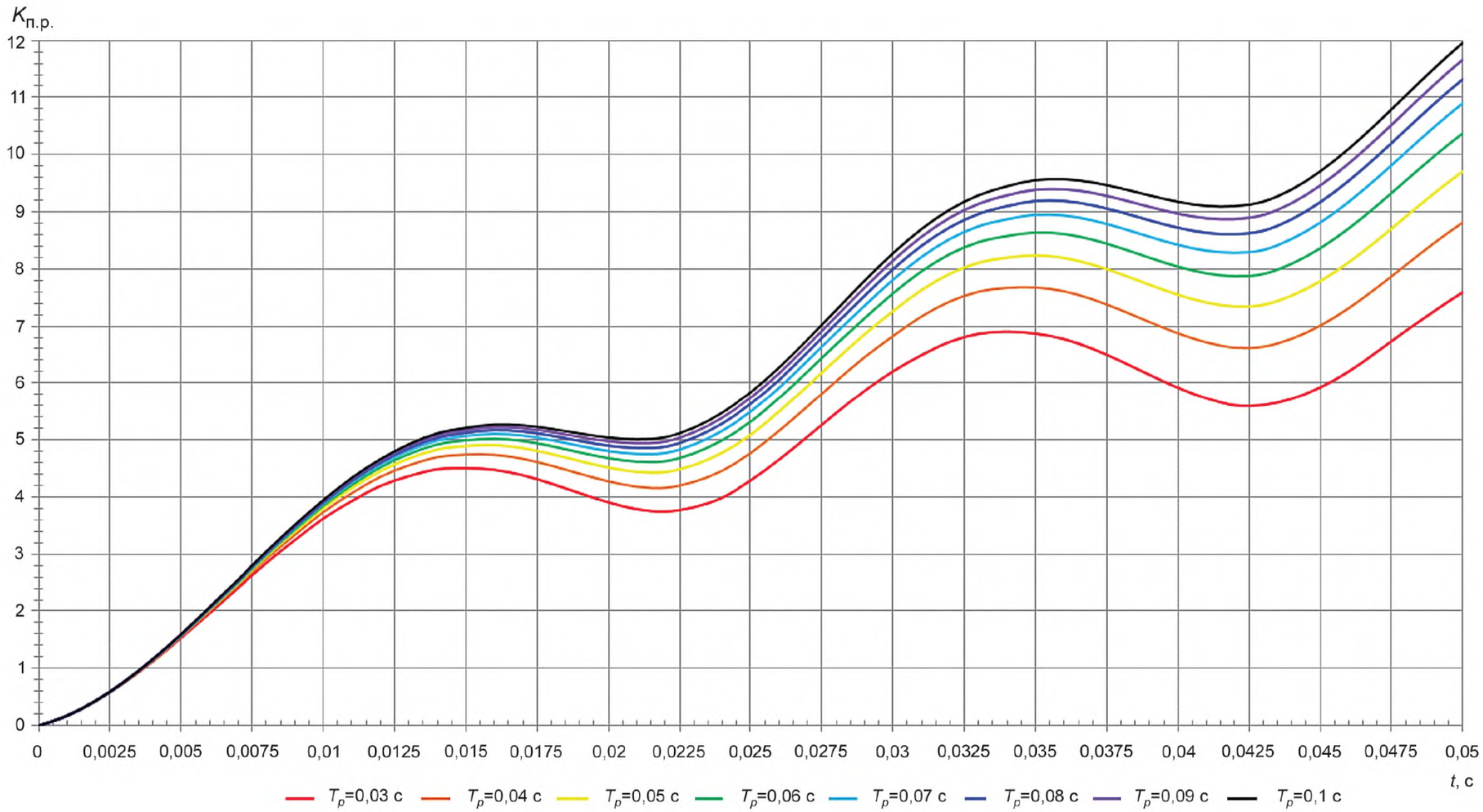
б) T_p = (0,1–0,3) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.2, лист 2



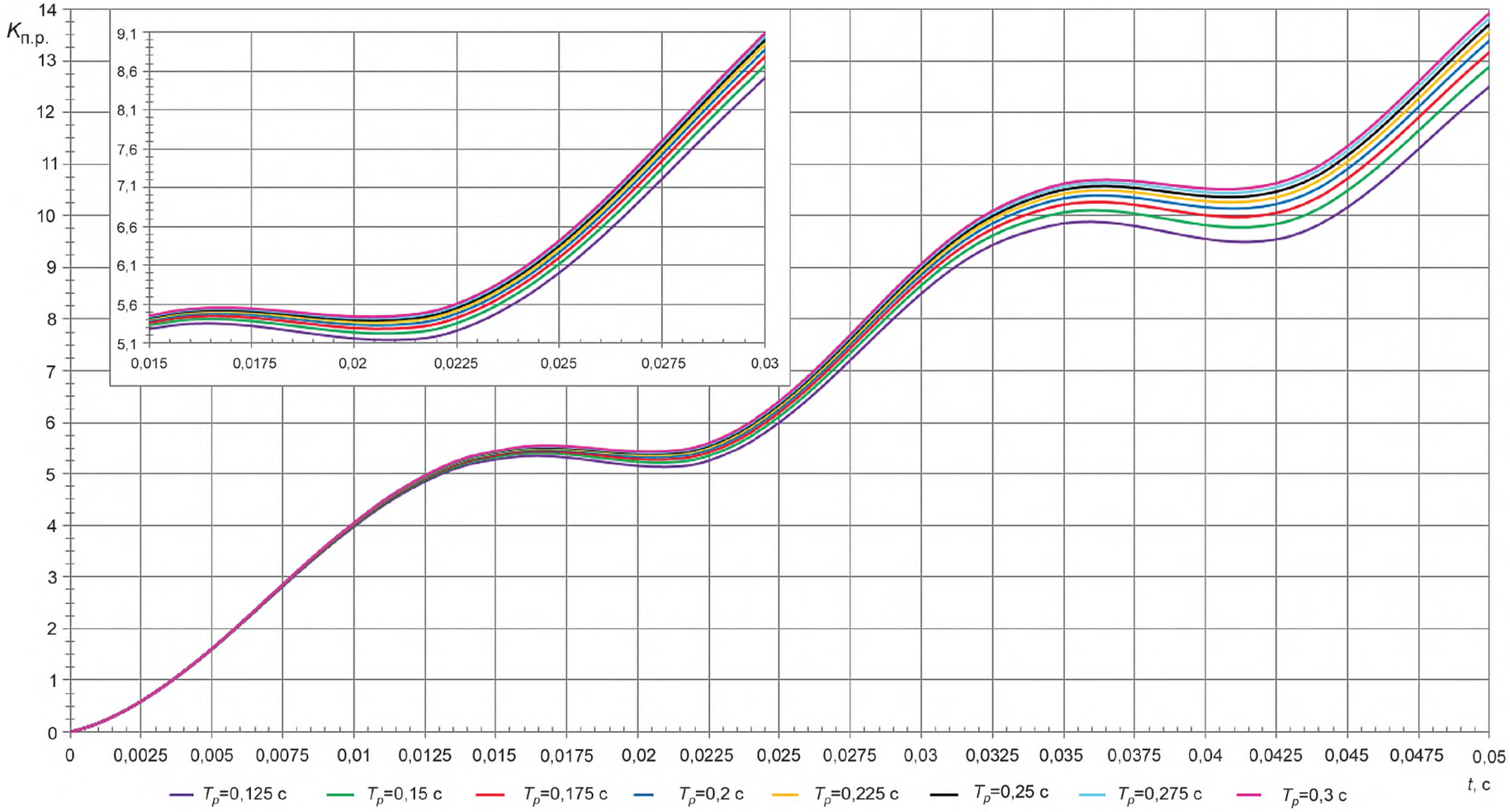
в) T_p = (0,03–0,3) с для t = (0,05–0,12) с

Рисунок Б.2, лист 3



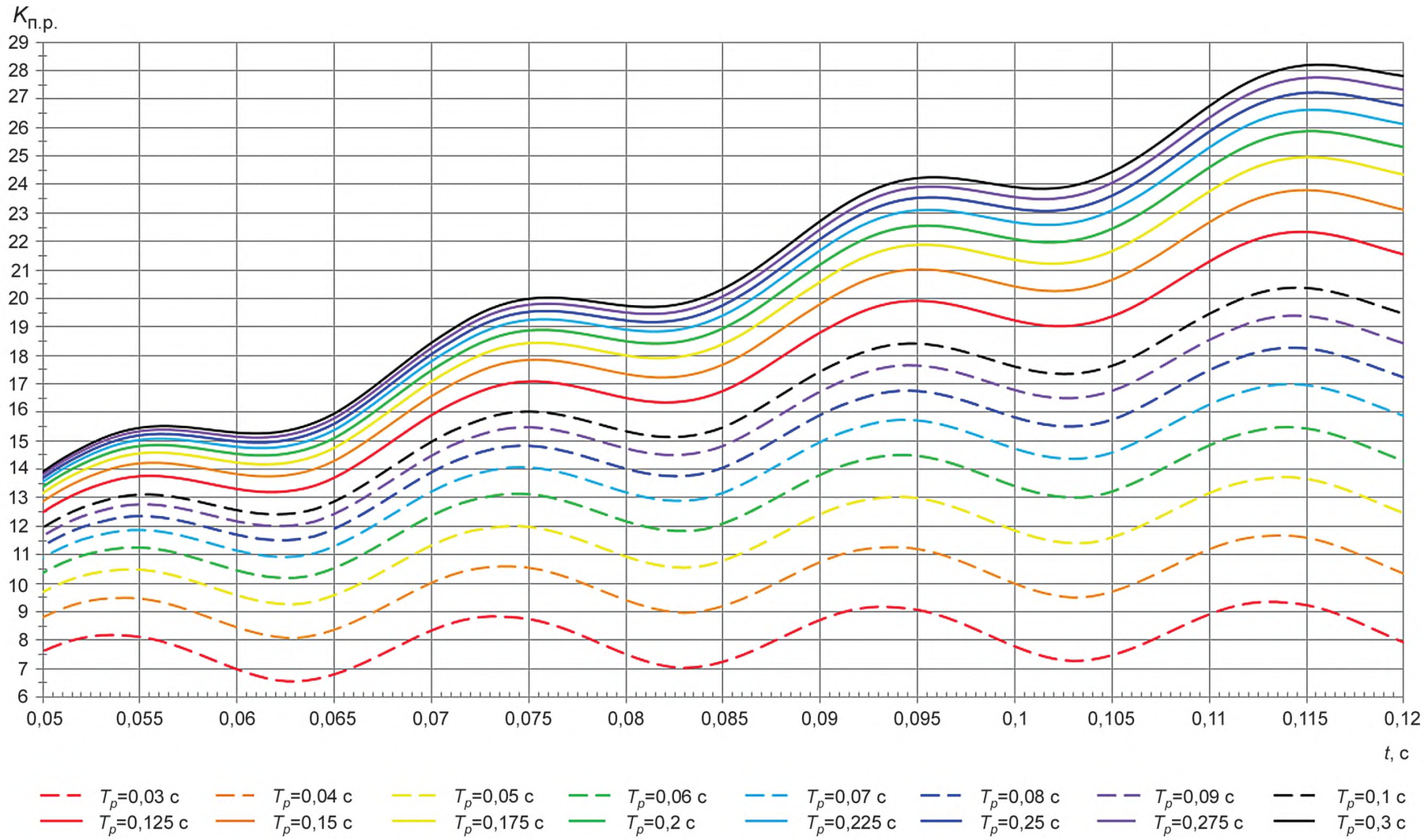
а) T_p = (0,03–0,1) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.3 — Универсальные характеристики ТТ при cos α = 0,9, лист 1



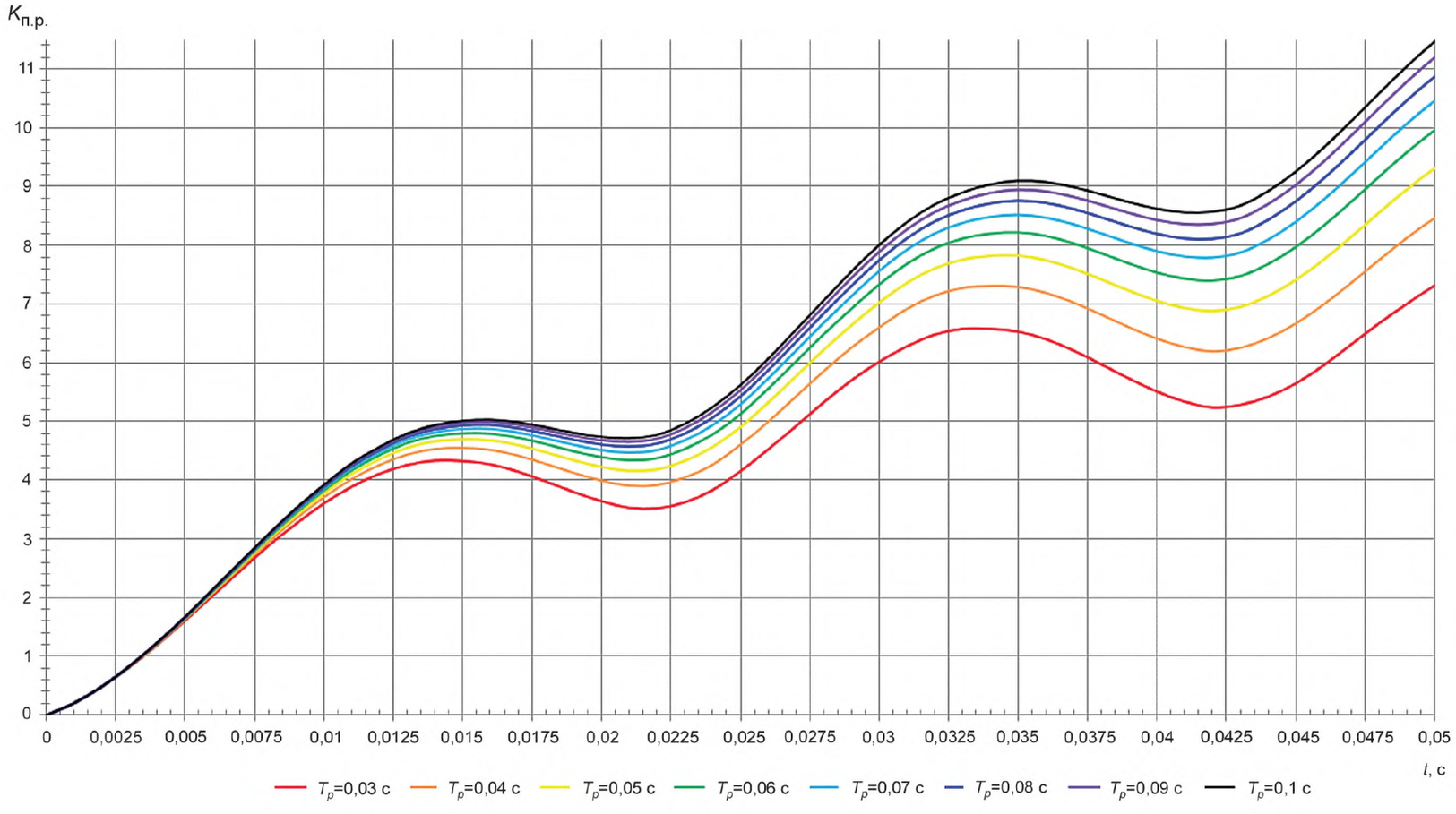
б) T_p = (0,1–0,3) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.3, лист 2



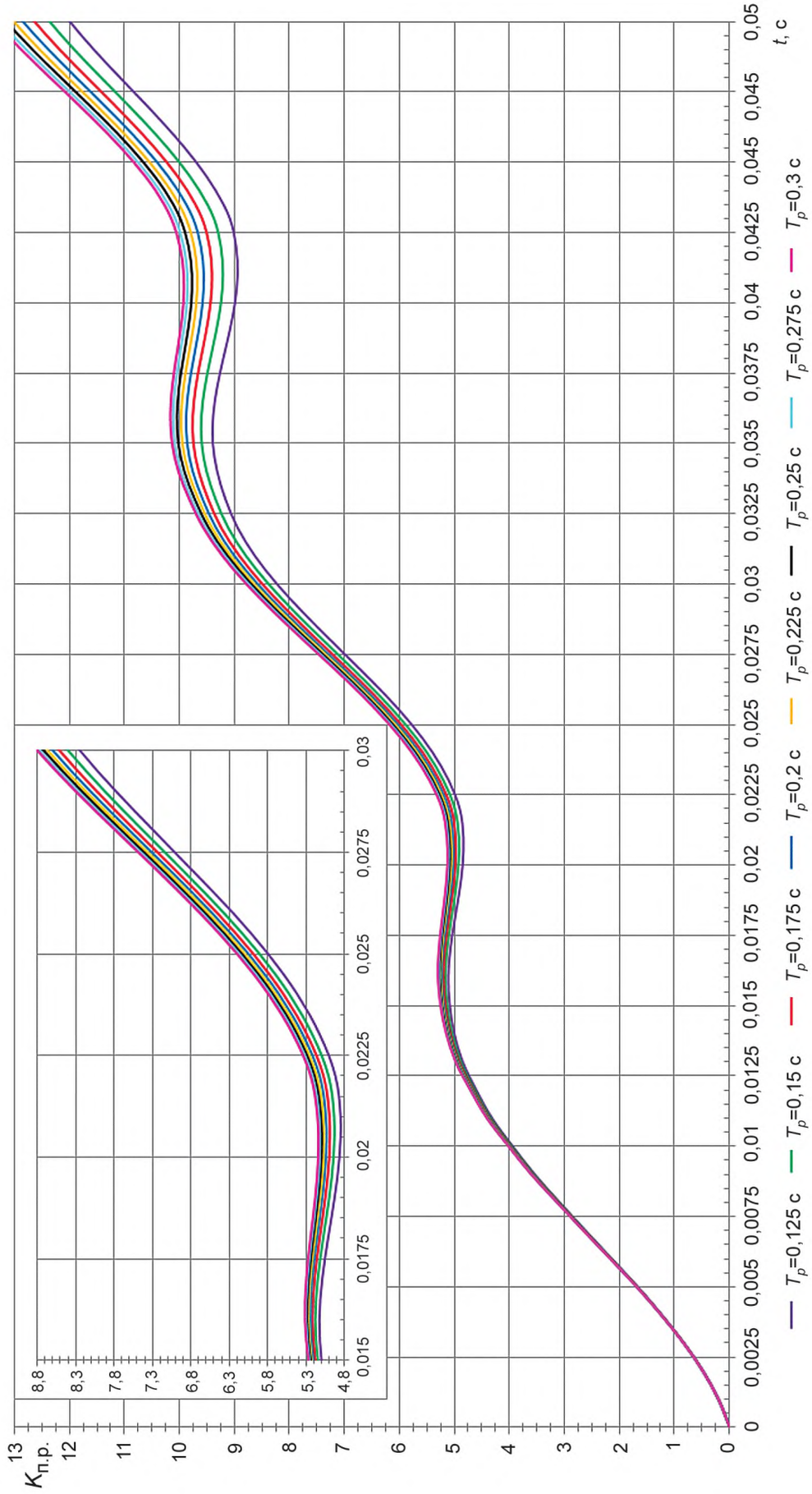
в) T_p = (0,03–0,3) с для t = (0,05–0,12) с

Рисунок Б.3, лист 3



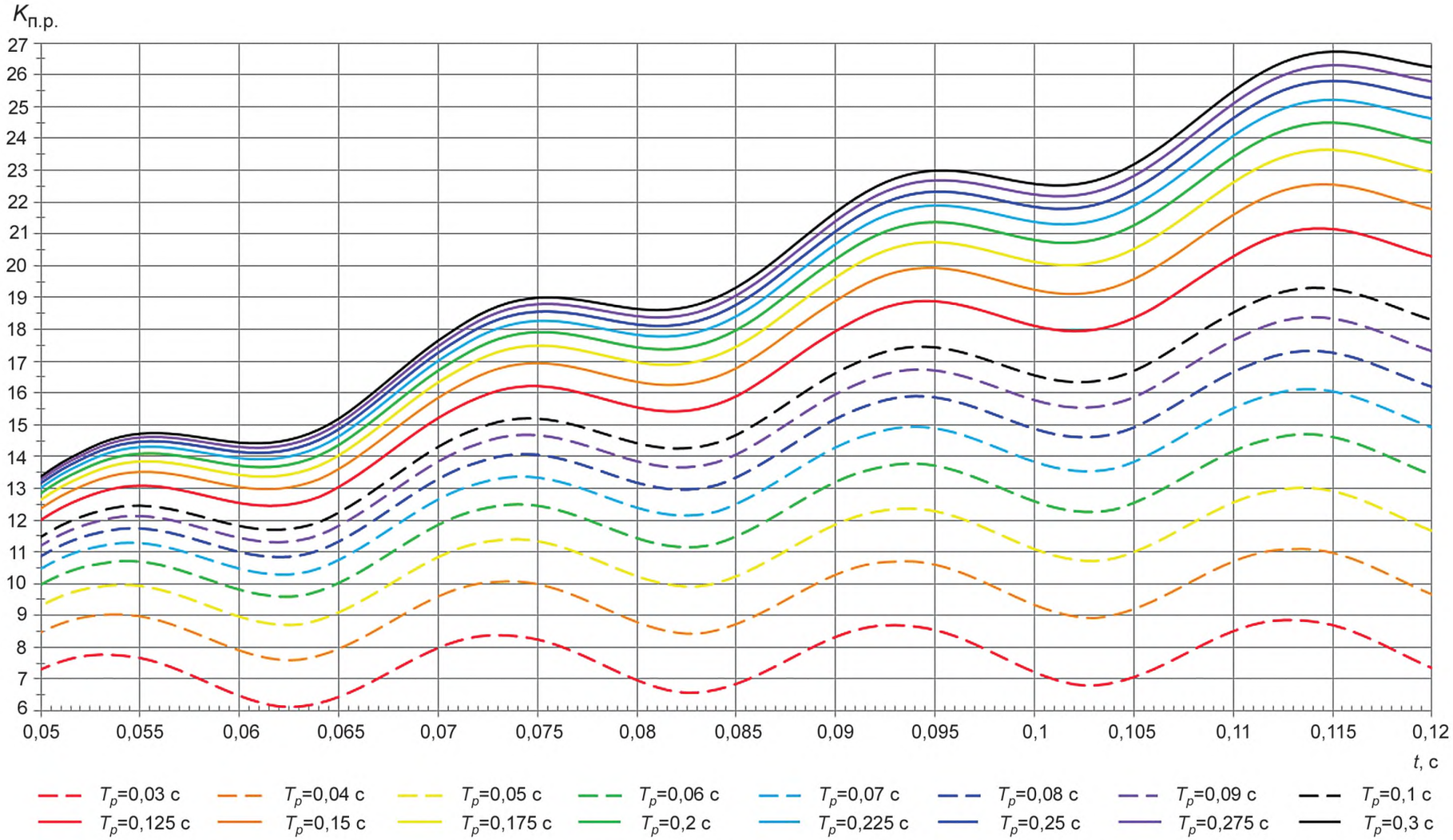
а) T_p = (0,03–0,1) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.4 — Универсальные характеристики ТТ при cos α = 0,85, лист 1



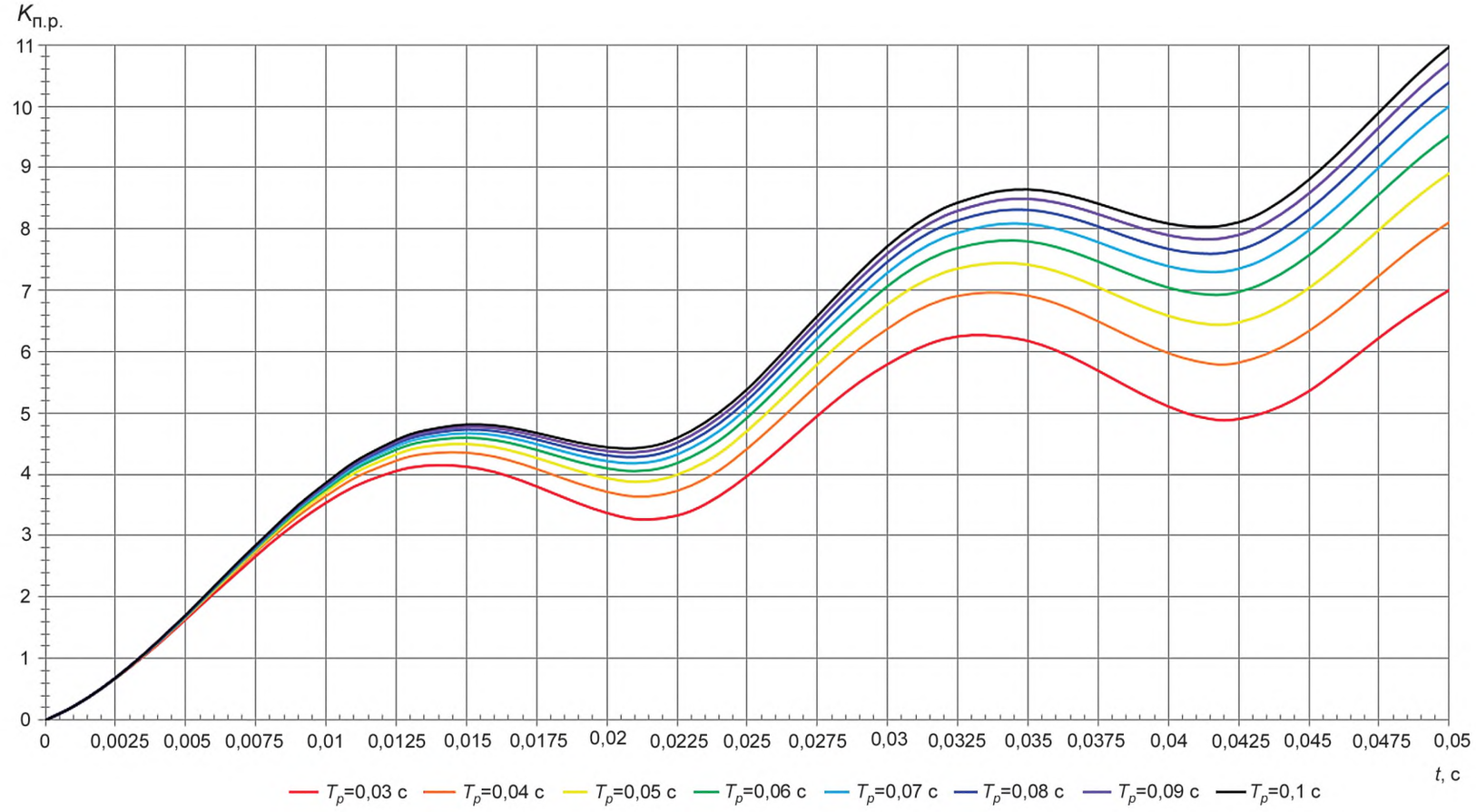
б) T_p = (0,1–0,3) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.4, лист 2



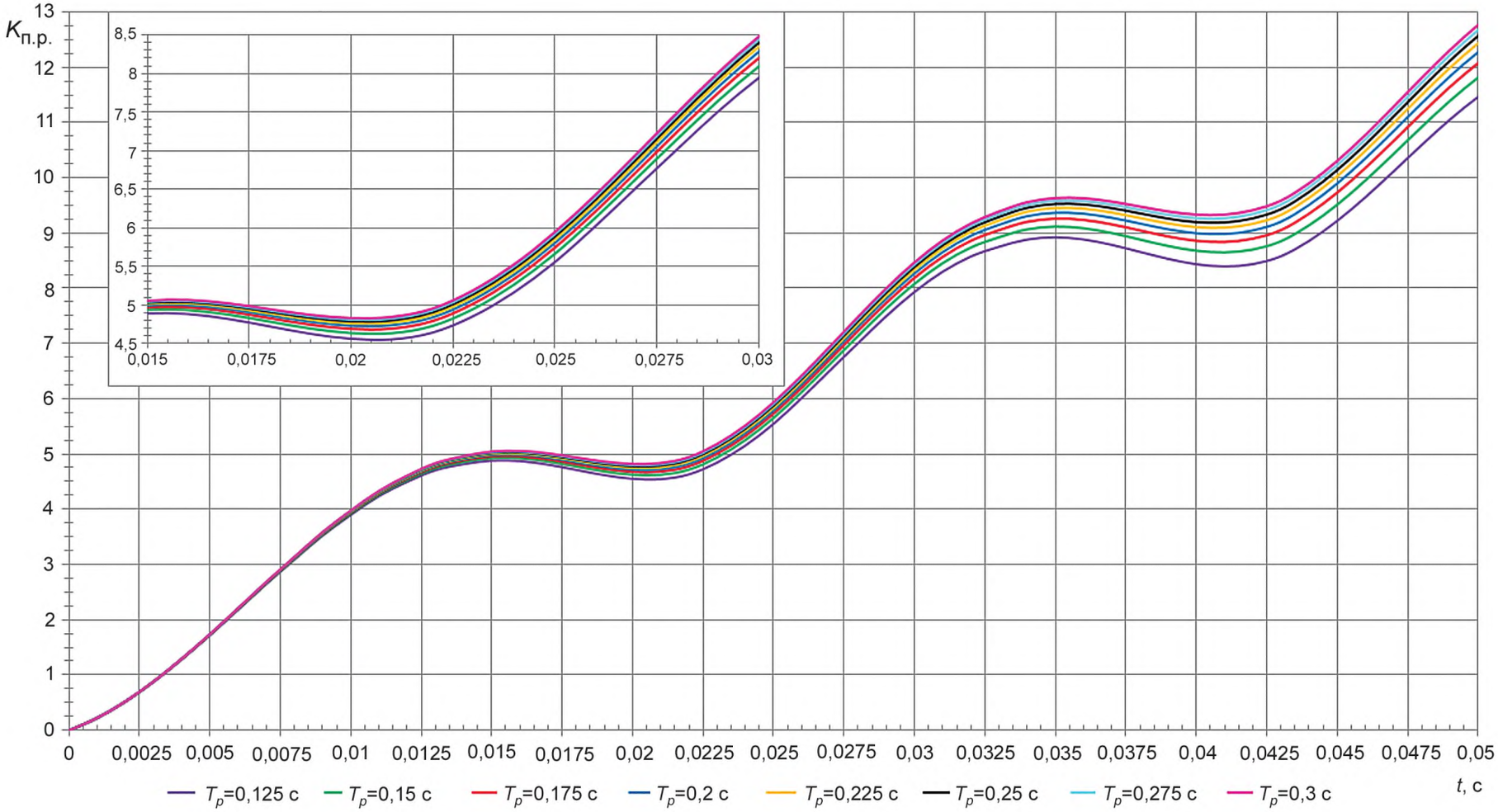
в) T_p = (0,03–0,3) с для t = (0,05–0,12) с

Рисунок Б.4, лист 3



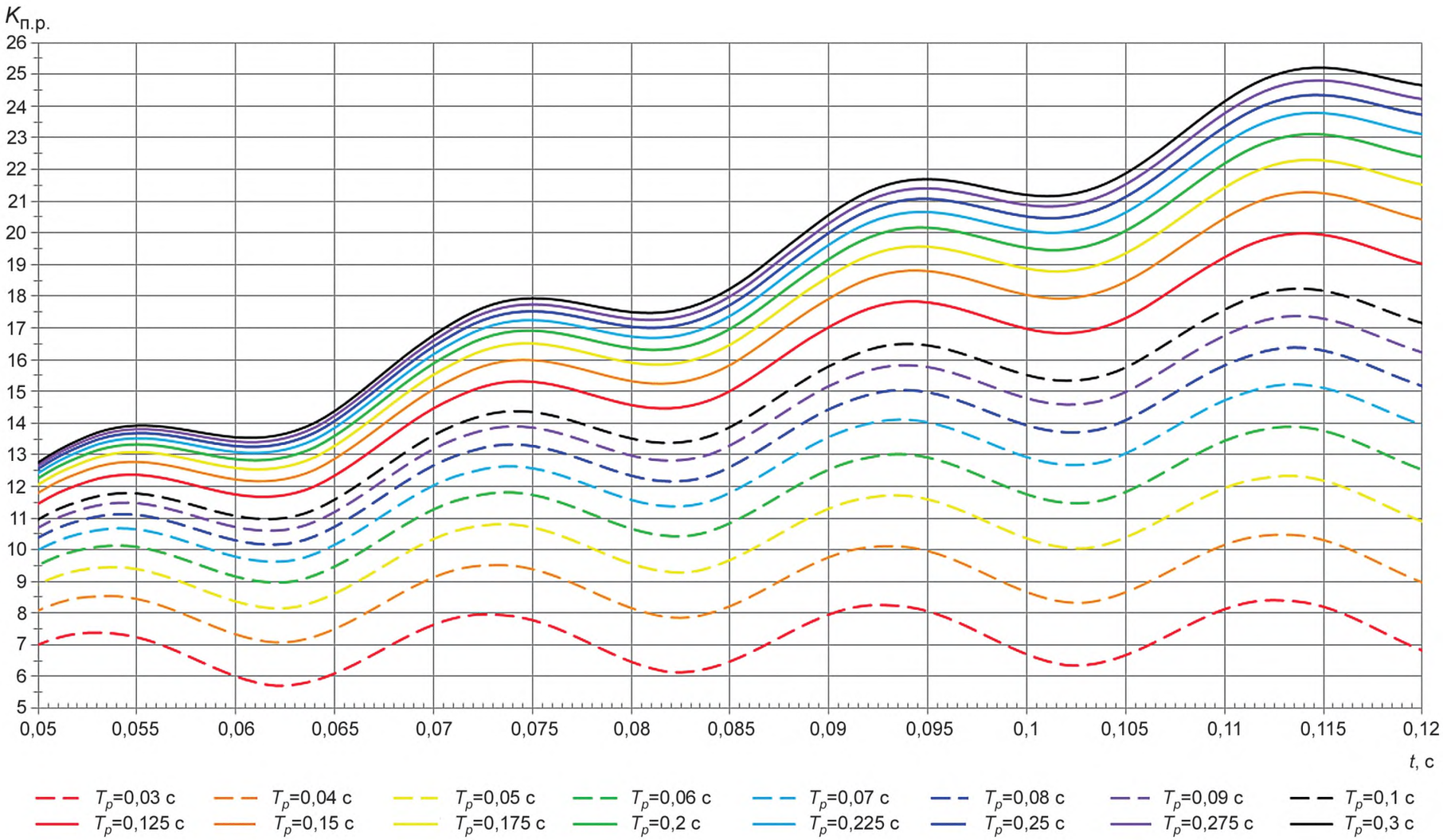
а) T_p = (0,03–0,1) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.5 — Универсальные характеристики ТТ при cos α = 0,8, лист 1



б) T_p = (0,1–0,3) с для t = (0–0,05) с

Рисунок Б.5, лист 2



в) T_p = (0,03–0,3) с для t = (0,05–0,12) с

Рисунок Б.5, лист 3

Приложение В
(справочное)

Примеры выполнения расчетов времени до насыщения трансформаторов тока

В.1 Примеры расчетов времени до насыщения трансформаторов тока аналитическим методом

В.1.1 Расчет времени до насыщения ТТ типа SAS 550/5G 2000/1

В.1.1.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа SAS 500/5G 2000/1):

$I_{1.ном}$ = 2000 А; $I_{2.ном}$ = 1А; R_2 = 7,51 Ом; X_2 = 0 Ом; $z_{н.ном}$ = 40 Ом; ε = 10 %; $K_{ном}$ = 20, $\cos\varphi_{н.ном}$ = 0,8.

В.1.1.2 Расчетная схема электрической станции приведена на рисунке В.1.

В.1.1.3 В качестве схемно-режимного условия и расчетного места КЗ выбрана точка К (см. рисунок В.1) при отключенном выключателе Q14, при этом через проверяемый ТТ при КЗ проходит наибольший ток. Значения токов в ветвях, питающих точку КЗ, и постоянные времени затухания апериодических составляющих токов в ветвях приведены в таблице В.1.

Т а б л и ц а В.1 — Токи трехфазного и однофазного КЗ и постоянные времени затухания апериодических составляющих

№ ветви	Наименование ветви	$T_{p.i}^{(3)}$, мс	$I_{КЗ}^{(3)}$, А	$T_{p.i}^{(1)}$, мс	$I_{КЗ}^{(1)}$, А
1	Блок генератор-трансформатор 1	283	2 899	217	7226
2	Блок генератор-трансформатор 2	283	2 882	217	6980
3	Блок генератор-трансформатор 3	283	2 861	217	6948
4	Автотрансформатор связи	60	1 766	60	2366
5	ВЛ1	32,4	3 248	32,4	832
6	ВЛ2	32,2	3 172	32,2	797
7	ВЛ3	32,8	1 642	32,8	401
8	ВЛ4	32,4	1 328	32,4	441
9	ВЛ5	32,2	1 684	32,2	458
10	ВЛ6	32,6	1 663	32,6	451
Суммарные токи		—	23 145	—	26 900

В качестве максимальных значений токов в первичных обмотках ТТ, используемых в цепях основных (быстродействующих) защит и быстродействующих ступеней резервных защит, приняты следующие значения:

- ток однофазного близкого КЗ — 26 900 А;
- ток трехфазного близкого КЗ — 23 145 А.

Расчет постоянных времени затухания апериодических составляющих токов КЗ $T_{p.i}^{(3)}$, $T_{p.i}^{(1)}$ выполняют в соответствии с ГОСТ Р 52735.

В.1.1.4 Определение величины нагрузки во вторичных цепях ТТ

Поперечное сечение жилы контрольного кабеля марки КВВГЭнг-LS S = 2,5 мм^2. Наибольшая длина контрольного кабеля (от ТТ до устройства релейной защиты) на ОРУ—500 кВ составляет 900 м. Поэтому при расчете максимальной нагрузки во вторичных цепях ТТ принимается l = 900 м. Удельное сопротивление проводника для меди ρ = 0,0175 Ом·мм^2/м.

В примерах при расчете нагрузки во вторичных цепях ТТ входное сопротивление микропроцессорного устройства релейной защиты не учитывается, так как оно незначительно.

В соответствии с формулой (А.2) величина нагрузки во вторичных цепях ТТ при трехфазных КЗ:

$$R_{н.факт}^{(3)} = \frac{\rho \cdot l}{s} = \frac{0{,}0175 \cdot 900}{2{,}5} = 6{,}3 \text{ Ом}.$$

В соответствии с формулой (А.3) величина нагрузки во вторичных цепях ТТ при однофазных КЗ:

$$R_{н.факт}^{(1)} = 2\frac{\rho \cdot l}{s} = 2\frac{0{,}0175 \cdot 900}{2{,}5} = 12{,}6 \text{ Ом}.$$

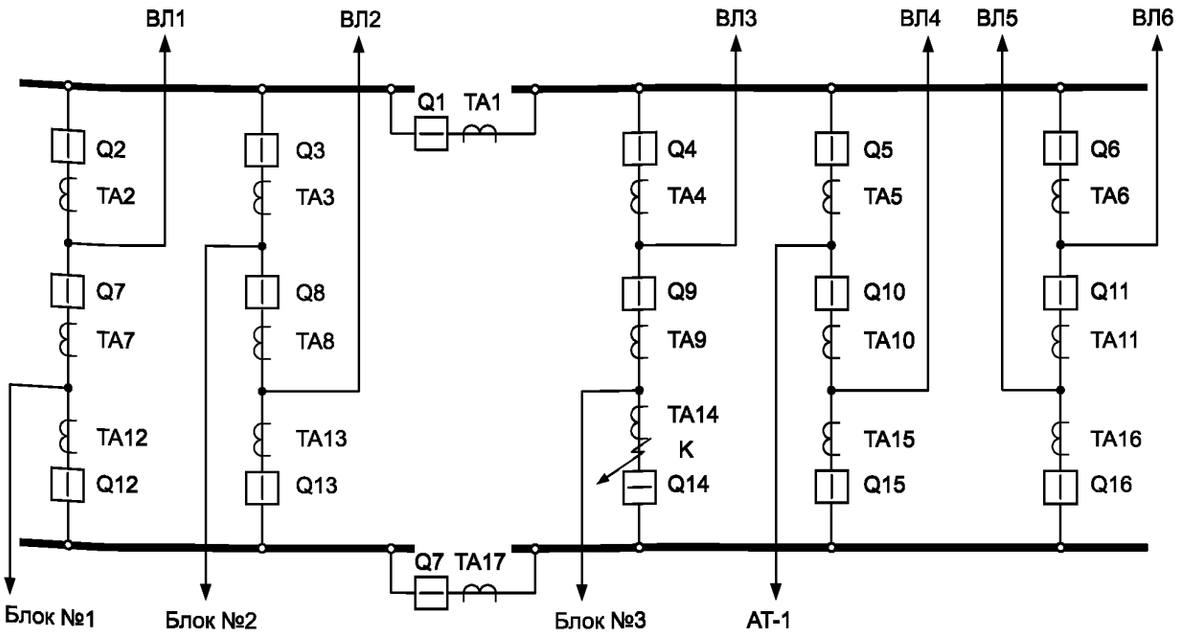


Рисунок В.1 — Пример схемы электрических соединений ОРУ—500 кВ

В.1.1.5 Определение $T_{p.экв}$ для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (1):

$$T^{(3)}_{p.экв} = \frac{1}{I_{КЗ}}\left(\sum_{i=1}^{N} I_{КЗ.i}\cdot T_{p.i}\right) = \frac{1}{23145}\cdot\left[\begin{array}{c}(2899+2882+2861)\cdot 0,283+1766\cdot 0,06+3248\cdot 0,0324+3172\cdot 0,0322+\\ +1642\cdot 0,0328+1328\cdot 0,0324+1684\cdot 0,0322+1663\cdot 0,0326\end{array}\right] = 0,128\text{с};$$

$$T^{(1)}_{p.экв} = \frac{1}{I_{КЗ}}\left(\sum_{i=1}^{N} I_{КЗ.i}\cdot T_{p.i}\right) = \frac{1}{26900}\cdot[(7226+6980+6948)\cdot 0,217+2366\cdot 0,06+832\cdot 0,0324+797\cdot 0,0322+$$

$$+401\cdot 0,0328+441\cdot 0,0324+458\cdot 0,0322+451\cdot 0,0326] = 0,180\text{ с}.$$

Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ в соответствии с формулой (9):

$$A^{(3)} = \frac{I_{1.ном}\cdot K_{ном}\sqrt{\left(R_2+z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2+\left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I^{(3)}_{КЗ}\cdot\left(R_2+R^{(3)}_{н.факт}\right)} = \frac{2000\cdot 20\sqrt{(7,51+40\cdot 0,8)^2+(40\cdot 0,6)^2}}{23145\cdot(7,51+6,3)} = 5,785.$$

$$A^{(1)} = \frac{I_{1.ном}\cdot K_{ном}\sqrt{\left(R_2+z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2+\left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I^{(1)}_{КЗ}\cdot\left(R_2+R^{(1)}_{н.факт}\right)} = \frac{2000\cdot 20\sqrt{(7,51+40\cdot 0,8)^2+(40\cdot 0,6)^2}}{26900\cdot(7,51+12,6)} = 3,418.$$

В.1.1.6 Выполнение проверки по условиям (7), (8) для трехфазного КЗ:

- по условию (7):

$$\omega\cdot T_p^{(3)} + 1 > A^{(3)}\cdot(1-K_r);$$

при $K_r = 0$: 41,2 > 5,785 — неравенство выполняется;
при $K_r = 0,86$: 41,2 > 0,81 — неравенство выполняется;

- по условию (8):

$$A^{(3)}\cdot(1-K_r) > 1;$$

при $K_r = 0$: 5,785 > 1 — неравенство выполняется;
при $K_r = 0,86$: 0,81 > 1 — неравенство не выполняется.

В.1.1.7 Выполнение проверки по условиям (7), (8) для однофазного КЗ:

- по условию (7):

$$\omega\cdot T_p^{(1)} + 1 > A^{(1)}\cdot(1-K_r);$$

при $K_r = 0$: 57,5 > 3,418 — неравенство выполняется;
при $K_r = 0,86$: 57,5 > 0,48 — неравенство выполняется;

- по условию (8):

$$A^{(1)}\cdot(1-K_r) > 1;$$

при K_r = 0: 3,418 > 1 — неравенство выполняется;
при K_r = 0,86: 0,48 > 1 — неравенство не выполняется.

В.1.1.8 Определение времени до насыщения ТТ при трехфазном КЗ:

- без учета остаточной индукции по формуле (3):

$$t_{нас}^{(3)} = 0{,}128 \cdot \ln\frac{314 \cdot 0{,}128}{314 \cdot 0{,}128 - 5{,}785 + 1} = 16{,}22 \text{ мс};$$

- расчет по формуле (6) с учетом остаточной индукции невозможен, т. к. не выполняется условие (8).

В.1.1.9 Определение времени до насыщения ТТ при однофазном КЗ:

- без учета остаточной индукции по формуле (3):

$$t_{нас}^{(1)} = 0{,}18 \cdot \ln\frac{314 \cdot 0{,}18}{314 \cdot 0{,}18 - 3{,}418 + 1} = 7{,}87 \text{ мс};$$

- расчет по формуле (6) с учетом остаточной индукции невозможен, т. к. не выполняется условие (8).

В.1.2 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа ТФЗМ-500Б-IV 2000/1

В.1.2.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа ТФЗМ-500Б-IV 2000/1):

$I_{1.ном}$ = 2000 А; $I_{2.ном}$ = 1А; R_2 = 10 Ом; X_2 = 0 Ом; $z_{н.ном}$ = 50 Ом; ε = 10%; $K_{ном}$ = 20, $\cos\varphi_{н.ном}$ = 0,8.

Данный ТТ имеет каскадное исполнение. Магнитопровод верхнего каскада имеет сечение, превышающее сечение каждого из магнитопроводов нижнего каскада в 4,5 раза. По этой причине расчет выполняют для нижнего каскада.

В.1.2.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.экв}$ аналогичны расчету по В.1.1.

В.1.2.3 Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ в соответствии с формулой (9):

- для режима трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном}\sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(3)} \cdot \left(R_2 + R_{н.факт}^{(3)}\right)} = \frac{2000 \cdot 18\sqrt{\left(10 + 50 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(50 \cdot 0{,}6\right)^2}}{23145 \cdot \left(10 + 6{,}3\right)} = 5{,}564;$$

- для режима однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном}\sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(1)} \cdot \left(R_2 + R_{н.факт}^{(1)}\right)} = \frac{2000 \cdot 18\sqrt{\left(10 + 50 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(50 \cdot 0{,}6\right)^2}}{26900 \cdot \left(10 + 12{,}6\right)} = 3{,}453.$$

В.1.2.4 Выполнение проверки по условиям (7), (8) для трехфазного КЗ:

- по условию (7):

$$\omega \cdot T_p^{(3)} + 1 > A^{(3)} \cdot (1 - K_r);$$

при K_r = 0: 41,2 > 5,564 — неравенство выполняется;
при K_r = 0,86: 41,2 > 0,78 — неравенство выполняется;

- по условию (8):

$$A^{(3)} \cdot (1 - K_r) > 1;$$

при K_r = 0: 5,564 > 1 — неравенство выполняется;
при K_r = 0,86: 0,78 > 1 — неравенство не выполняется.

В.1.2.5 Выполнение проверки по условиям (7), (8) для однофазного КЗ:

- по условию (7):

$$\omega \cdot T_p^{(1)} + 1 > A^{(1)} \cdot (1 - K_r);$$

при K_r = 0: 57,5 > 3,453 — неравенство выполняется;
при K_r = 0,86: 57,5 > 0,48 — неравенство выполняется;

- по условию (8):

$$A^{(1)} \cdot (1 - K_r) > 1;$$

при K_r = 0: 3,453 > 1 — неравенство выполняется;
при K_r = 0,86: 0,48 > 1 — неравенство не выполняется.

В.1.2.6 Определение времени до насыщения ТТ при трехфазном КЗ:

- без учета остаточной индукции по формуле (3):

$$t_{нас}^{(3)} = 0{,}128 \cdot \ln\frac{314 \cdot 0{,}128}{314 \cdot 0{,}128 - 5{,}564 + 1} = 15{,}42 \text{ мс};$$

- расчет по формуле (6) с учетом остаточной индукции невозможен, т. к. не выполняется условие (8).

В.1.2.7 Определение времени до насыщения ТТ при однофазном КЗ:
- без учета остаточной индукции по формуле (3):

$$t_{нас}^{(1)} = 0{,}18 \cdot \ln\frac{314 \cdot 0{,}18}{314 \cdot 0{,}18 - 3{,}453 + 1} = 7{,}98 \text{ мс};$$

- расчет по формуле (6) с учетом остаточной индукции невозможен, т. к. не выполняется условие (8).

В.1.3 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа JK ELK CB3 4000/1

В.1.3.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа JK ELK CB3 4000/1):

$I_{1.ном}$ = 4000 А; $I_{2.ном}$ = 1А; R_2 = 10,5 Ом; X_2 = 0 Ом; $z_{н.ном}$ = 30 Ом; ε = 5%; $K_{ном}$ = 20, $\cos\varphi_{н.ном}$ = 0,8.

В.1.3.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.экв}$ аналогичны расчету по В.1.1.

В.1.3.3 Определение параметра режима A для трехфазного и однофазного КЗ в соответствии с формулой (9):
- для режима трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном}\sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(3)} \cdot \left(R_2 + R_{н.факт}^{(3)}\right)} = \frac{4000 \cdot 20\sqrt{\left(10{,}5 + 30 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(30 \cdot 0{,}6\right)^2}}{23145 \cdot \left(10{,}5 + 6{,}3\right)} = 8{,}0;$$

- для режима однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном}\sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(1)} \cdot \left(R_2 + R_{н.факт}^{(1)}\right)} = \frac{4000 \cdot 20\sqrt{\left(10{,}5 + 30 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(30 \cdot 0{,}6\right)^2}}{26900 \cdot \left(10{,}5 + 12{,}6\right)} = 5{,}0.$$

В.1.3.4 Выполнение проверки по условиям (7), (8) для трехфазного КЗ:
- по условию (7):

$$\omega \cdot T_p^{(3)} + 1 > A^{(3)} \cdot (1 - K_r);$$

при K_r = 0: 41,2 > 8,0 — неравенство выполняется;
при K_r = 0,86: 41,2 > 1,12 — неравенство выполняется;
- по условию (8):

$$A^{(3)} \cdot (1 - K_r) > 1;$$

при K_r = 0: 8,0 > 1 — неравенство выполняется;
при K_r = 0,86: 1,12 > 1 — неравенство выполняется.

В.1.3.5 Выполнение проверки по условиям (7), (8) для однофазного КЗ:
- по условию (7):

$$\omega \cdot T_p^{(1)} + 1 > A^{(1)} \cdot (1 - K_r);$$

при K_r = 0: 57,5 > 5,0 — неравенство выполняется;
при K_r = 0,86: 57,5 > 0,7 — неравенство выполняется;
- по условию (8):

$$A^{(1)} \cdot (1 - K_r) > 1;$$

при K_r = 0: 5,0 > 1 — неравенство выполняется;
при K_r = 0,86: 0,7 > 1 — неравенство не выполняется.

В.1.3.6 Определение времени до насыщения ТТ при трехфазном КЗ:
- без учета остаточной индукции по формуле (3):

$$t_{нас}^{(3)} = 0{,}128 \cdot \ln\frac{314 \cdot 0{,}128}{314 \cdot 0{,}128 - 8{,}0 + 1} = 24{,}5 \text{ мс};$$

- с учетом остаточной индукции по формуле (6):

$$t_{нас}^{(3)} = 0{,}128 \cdot \ln\frac{314 \cdot 0{,}128}{314 \cdot 0{,}128 - 8{,}0 \cdot \left(1 - 0{,}86\right) + 1} = 0{,}39 \text{ мс}.$$

В.1.3.7 Определение времени до насыщения ТТ при однофазном КЗ:
- без учета остаточной индукции по формуле (3):

$$t_{нас}^{(1)} = 0{,}18 \cdot \ln\frac{314 \cdot 0{,}18}{314 \cdot 0{,}18 - 5{,}0 + 1} = 13{,}24 \text{ мс};$$

- расчет по формуле (6) с учетом остаточной индукции невозможен, т. к. не выполняется условие (8).

В.2 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока графическим методом по паспортным данным

В.2.1 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа SAS 550/5G 2000/1

В.2.1.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа SAS 500/5G 2000/1):

$I_{1.ном}$ = 2000 А; $I_{2.ном}$ = 1А; R_2 = 7,51 Ом; X_2 = 0 Ом; $z_{н.ном}$ = 40 Ом; ε = 10%; $K_{ном}$ = 20, $\cos\varphi_{н.ном}$ = 0,8.

В.2.1.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.экв}$ аналогичны расчету по В.1.1.

В.2.1.3 Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (9):

- для режима трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном}\sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(3)} \cdot \left(R_2 + R_{н.факт}^{(3)}\right)} = \frac{2000 \cdot 20\sqrt{\left(7{,}51 + 40 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(40 \cdot 0{,}6\right)^2}}{23145 \cdot \left(7{,}51 + 6{,}3\right)} = 5{,}785;$$

$$A^{(3)} \cdot \left(1 - K_r\right) = 5{,}785 \cdot \left(1 - 0{,}86\right) = 0{,}81;$$

- для режима однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном}\sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(1)} \cdot \left(R_2 + R_{н.факт}^{(1)}\right)} = \frac{2000 \cdot 20\sqrt{\left(7{,}51 + 40 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(40 \cdot 0{,}6\right)^2}}{26900 \cdot \left(7{,}51 + 12{,}6\right)} = 3{,}418;$$

$$A^{(1)} \cdot \left(1 - K_r\right) = 3{,}418 \cdot \left(1 - 0{,}86\right) = 0{,}48.$$

В.2.1.4 Определение времени до насыщения ТТ осуществляют графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

В.2.1.5 Для выбора универсальной характеристики рассчитывают косинус угла ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12):

- для трехфазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{7{,}51 + 6{,}3}{13{,}81} = 1;$$

- для однофазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{7{,}51 + 12{,}6}{20{,}11} = 1.$$

В.2.1.6 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.2.1.3, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 16{,}8 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 9{,}6 \text{ мс}.$$

В.2.1.7 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.2.1.3, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 4{,}2 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 3{,}2 \text{ мс}.$$

В.2.1.8 Определение времени до насыщения ТТ по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях (без использования $T_{р.экв}$)

Согласно формуле (15) строят временные диаграммы $K_{п.р}(t)$ для трехфазного и однофазного КЗ, которые приведены на рисунке В.2.

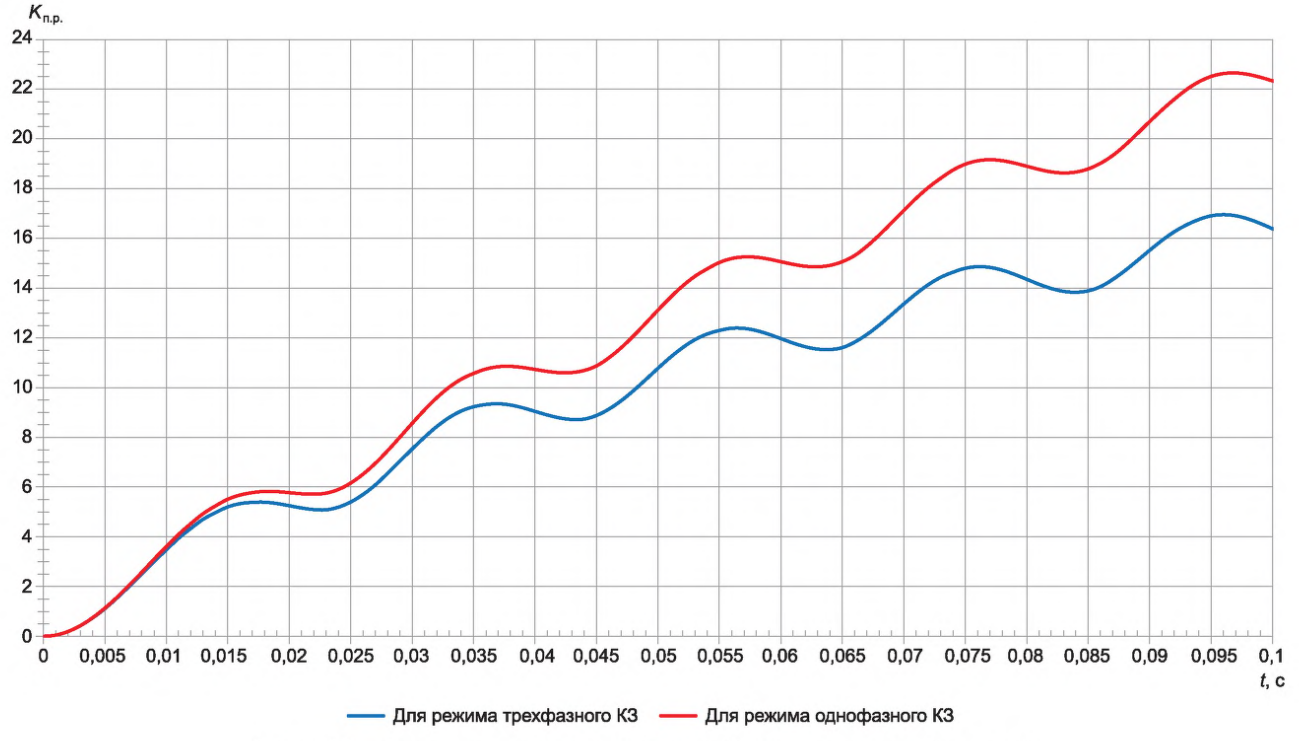


Рисунок В.2 — Временные диаграммы коэффициента $K_{п.р}(t)$, построенные по формуле (15)

Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.2.1.3, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 26{,}2 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 9{,}6 \text{ мс}.$$

Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.2.1.3, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 4{,}2 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 3{,}2 \text{ мс}.$$

В.2.2 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа ТФЗМ-500Б-IV 2000/1

В.2.2.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа ТФЗМ-500Б-IV 2000/1):

$I_{1.ном} = 2000$ А; $I_{2.ном} = 1$А; $R_2 = 10$ Ом; $X_2 = 0$ Ом; $z_{н.ном} = 50$ Ом; $\varepsilon = 10$ %; $K_{ном} = 18$, $\cos\varphi_{н.ном} = 0{,}8$.

В.2.2.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.экв}$ аналогичны расчету по В.1.1.

Данный ТТ имеет каскадное исполнение. Магнитопровод верхнего каскада имеет сечение, превышающее сечение каждого из магнитопроводов нижнего каскада в 4,5 раза. По этой причине расчет произведен для нижнего каскада.

В.2.2.3 Определение параметра режима A для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (9):

- для режима трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном} \sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(3)} \cdot \left(R_2 + R_{н.факт}^{(3)}\right)} = \frac{2000 \cdot 18\sqrt{\left(10 + 50 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(50 \cdot 0{,}6\right)^2}}{23145 \cdot \left(10 + 6{,}3\right)} = 5{,}564;$$

$$A^{(3)} \cdot \left(1 - K_r\right) = 5{,}564 \cdot \left(1 - 0{,}86\right) = 0{,}78.$$

- для режима однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{I_{1.ном} \cdot K_{ном} \sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном}\cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(z_{н.ном}\sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(1)} \cdot \left(R_2 + R_{н.факт}^{(1)}\right)} = \frac{2000 \cdot 18\sqrt{\left(10 + 50 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(50 \cdot 0{,}6\right)^2}}{26900 \cdot \left(10 + 12{,}6\right)} = 3{,}453;$$

$$A^{(1)} \cdot \left(1 - K_r\right) = 3{,}453 \cdot \left(1 - 0{,}86\right) = 0{,}48.$$

В.2.2.4 Определение времени до насыщения ТТ осуществляют графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

В.2.2.5 Для выбора универсальной характеристики рассчитывают косинус угла ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12):

- для трехфазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10 + 6{,}3}{16{,}3} = 1;$$

- для однофазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10 + 12{,}6}{22{,}6} = 1.$$

В.2.2.6 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.2.2.3, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и $\cos\alpha$, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 15{,}1 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 9{,}6 \text{ мс}.$$

В.2.2.7 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.2.2.3, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.\text{экв}}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 4{,}1 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 3{,}2 \text{ мс}.$$

В.2.2.8 Определение времени до насыщения ТТ по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях (без использования $T_{р.\text{экв}}$)

Согласно формуле (15) строят временные диаграммы $K_{\text{п.р}}(t)$ для трехфазного и однофазного КЗ (см. рисунок В.2).

Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.2.2.3, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 25{,}6 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 9{,}7 \text{ мс}.$$

Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.2.2.3, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 4{,}1 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 3{,}2 \text{ мс}.$$

В.2.3 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа JK ELK CB3 4000/1

В.2.3.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа JK ELK CB3 4000/1):

$I_{1.\text{ном}} = 4000$ А; $I_{2.\text{ном}} = 1$А; $R_2 = 10{,}5$ Ом; $X_2 = 0$ Ом; $z_{\text{н.ном}} = 30$ Ом; $\varepsilon = 5$ %; $K_{\text{ном}} = 20$, $\cos\varphi_{\text{н.ном}} = 0{,}8$.

В.2.3.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.\text{экв}}$ аналогичны расчету по В.1.1.

В.2.3.3 Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (9):

- для режима трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{I_{1.\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \sqrt{\left(R_2 + z_{\text{н.ном}}\cos\varphi_{\text{н.ном}}\right)^2 + \left(z_{\text{н.ном}}\sin\varphi_{\text{н.ном}}\right)^2}}{I^{(3)}_{\text{КЗ}} \cdot \left(R_2 + R^{(3)}_{\text{н.факт}}\right)} = \frac{4000 \cdot 20\sqrt{\left(10{,}5 + 30 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(30 \cdot 0{,}6\right)^2}}{23145 \cdot \left(10{,}5 + 6{,}3\right)} = 8{,}0;$$

$$A^{(3)} \cdot \left(1 - K_r\right) = 8{,}0 \cdot \left(1 - 0{,}86\right) = 1{,}12.$$

- для режима однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{I_{1.\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \sqrt{\left(R_2 + z_{\text{н.ном}}\cos\varphi_{\text{н.ном}}\right)^2 + \left(z_{\text{н.ном}}\sin\varphi_{\text{н.ном}}\right)^2}}{I^{(1)}_{\text{КЗ}} \cdot \left(R_2 + R^{(1)}_{\text{н.факт}}\right)} = \frac{4000 \cdot 20\sqrt{\left(10{,}5 + 30 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(30 \cdot 0{,}6\right)^2}}{26900 \cdot \left(10{,}5 + 12{,}6\right)} = 5{,}0;$$

$$A^{(1)} \cdot \left(1 - K_r\right) = 5{,}0 \cdot \left(1 - 0{,}86\right) = 0{,}7.$$

В.2.3.4 Определение времени до насыщения ТТ осуществляют графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

В.2.3.5 Для выбора универсальной характеристики рассчитывают косинус угла ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12):

- для трехфазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{\text{н.факт}}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10,5 + 6,3}{16,8} = 1;$$

- для однофазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{\text{н.факт}}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10,5 + 12,6}{23,1} = 1.$$

В.2.3.6 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.2.3.3, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.\text{экв}}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 28,9 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 13,0 \text{ мс}.$$

В.2.3.7 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.2.3.3, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.\text{экв}}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 5,0 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 3,9 \text{ мс}.$$

В.2.3.8 Определение времени до насыщения ТТ по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях (без использования $T_{р.\text{экв}}$)

Согласно формуле (15) строят временные диаграммы $K_{\text{п.р}}(t)$ для трехфазного и однофазного КЗ (см. рисунок В.2).

Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.2.3.3, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 31,0 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 13,2 \text{ мс}.$$

Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.2.3.3, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 5,0 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 3,9 \text{ мс}.$$

В.3 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока графическим методом с использованием вольтамперной характеристики трансформаторов тока

В.3.1 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа SAS 550/5G 2000/1

В.3.1.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа SAS 550/5G 2000/1):

$I_{1.\text{ном}} = 2000$ А; $I_{2.\text{ном}} = 1$А; $R_2 = 7,51$ Ом; $X_2 = 0$ Ом; $z_{\text{н.ном}} = 40$ Ом; $\varepsilon = 10$ %; $K_{\text{ном}} = 20$, $\cos\varphi_{\text{н.ном}} = 0,8$.

ВАХ ТТ приведена на рисунке В.3.

В.3.1.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.\text{экв}}$ аналогичны расчету по В.1.1.

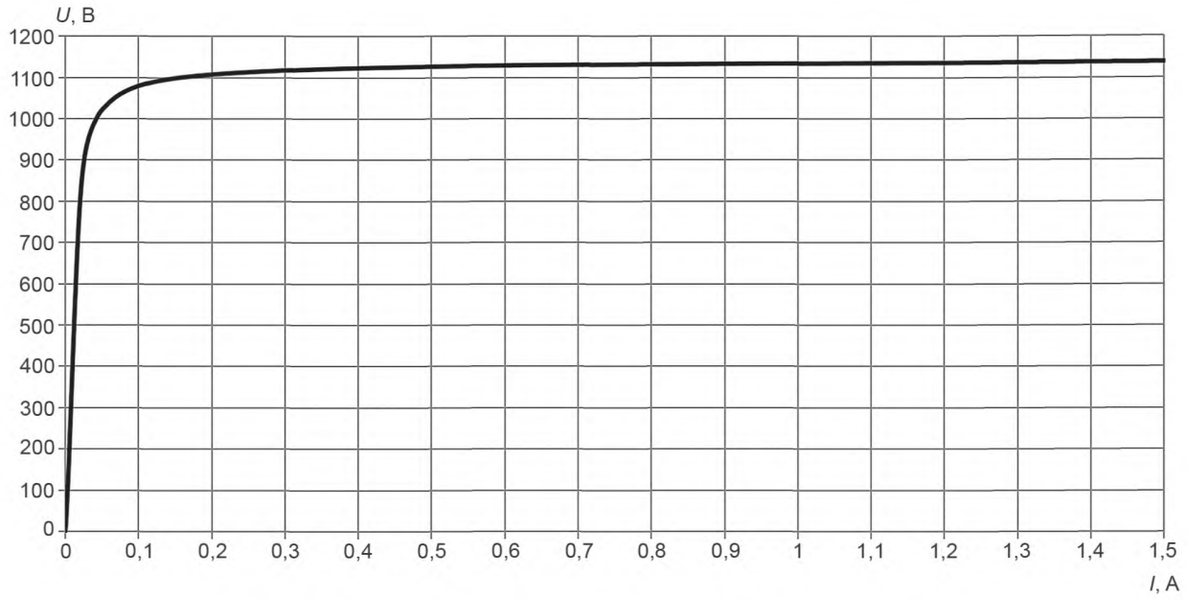


Рисунок В.3 — Вольтамперная характеристика ТТ SAS 550/5G 2000/1

В.3.1.3 Выполнение проверки допустимости использования метода

Определение фактической кратности тока КЗ:

- для трехфазного КЗ:

$$K_{\text{факт}}^{(3)} = \frac{I_{\text{к}}^{(3)}}{I_{1.\text{ном}}} = \frac{23145}{2000} = 11{,}57;$$

- для однофазного КЗ:

$$K_{\text{факт}}^{(1)} = \frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{1.\text{ном}}} = \frac{26900}{2000} = 13{,}45.$$

Определение тока намагничивания, соответствующего классу точности ТТ, по формуле (17):

- для трехфазного КЗ:

$$I_{0.10}^{(3)} = 0{,}1 I_{2\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}^{(3)} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 11{,}57 = 1{,}157 \text{ А};$$

- для однофазного КЗ:

$$I_{0.10}^{(1)} = 0{,}1 I_{2\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}^{(1)} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 13{,}45 = 1{,}345 \text{ А}.$$

По ВАХ ТТ (см. рисунок В.3) определить значения напряжений, соответствующие рассчитанным значениям $I_{0.10}^{(3)}$ и $I_{0.10}^{(1)}$:

$$U_{10}^{(3)} = 1134 \text{ В};$$

$$U_{10}^{(1)} = 1136 \text{ В}.$$

По ВАХ ТТ (см. рисунок В.3) определить параметры середины линейного участка ВАХ:

$$U_{\text{лин}} = 400 \text{ В};$$

$$I_{\text{лин}} = 0{,}0076 \text{ А}.$$

Проверка выполнения условия (16):

- для трехфазного КЗ:

$$\frac{I_{0.10}^{(3)} / U_{10}^{(3)}}{I_{\text{лин}} / U_{\text{лин}}} = \frac{1{,}157 / 1134}{0{,}0076 / 400} = 53{,}68 > 3 \text{ — условие выполняется;}$$

- для однофазного КЗ:

$$\frac{I_{0.10}^{(1)} / U_{10}^{(1)}}{I_{\text{лин}} / U_{\text{лин}}} = \frac{1{,}345 / 1136}{0{,}0076 / 400} = 62{,}11 > 3 \text{ — условие выполняется.}$$

В.3.1.4 Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (19):

- для трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{U_{\varepsilon}^{(3)}}{U_{2sin}^{(3)}} = \frac{1134}{159,78} = 7,09;$$

$$A^{(3)}\,(1 - K_r) = 7,09 \cdot (1 - 0,86) = 0,99,$$

где $U_{2sin}^{(3)}$определяют по формуле (20):

$$U_{2sin}^{(3)} = K_{факт}^{(3)} \cdot I_{2.ном} \cdot (R_2 + R_{н.факт}^{(3)}) = 11,57 \cdot 1,0 \cdot (7,51 + 6,3) = 159,78 \text{ В};$$

- для однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{U_{\varepsilon}^{(1)}}{U_{2.sin}^{(1)}} = \frac{1136}{270,48} = 4,2;$$

$$A_r^{(1)} = A^{(1)}\,(1 - K_r) = 4,2 \cdot (1 - 0,86) = 0,59,$$

где $U_{2sin}^{(1)} = K_{факт}^{(1)} \cdot I_{2.ном} \cdot (R_2 + R_{н.факт}^{(1)}) = 13,45 \cdot 1,0 \cdot (7,51 + 12,6) = 270,48$ В.

В.3.1.5 Определение времени до насыщения ТТ осуществляют графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

В.3.1.6 Для выбора универсальной характеристики рассчитывают косинус угла ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12):

- для трехфазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{7,51 + 6,3}{13,81} = 1;$$

- для однофазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{7,51 + 12,6}{20,11} = 1.$$

В.3.1.7 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.3.1.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 27,2 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 11,1 \text{ мс}.$$

В.3.1.8 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A\,(1 - K_r)$, рассчитанные в В.2.1.3, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 4,7 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 3,5 \text{ мс}.$$

В.3.1.9 Определение времени до насыщения ТТ по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях (без использования $T_{р.экв}$).

Согласно формуле (15) строят временные диаграммы $K_{п.р}(t)$ для трехфазного и однофазного КЗ (см. рисунок В.2).

Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.3.1.4, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 29,1 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 11{,}2 \text{ мс}.$$

Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A\ (1 - K_r)$, рассчитанные в В.3.1.4, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 4{,}7 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 3{,}5 \text{ мс}.$$

В.3.2 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа ТФЗМ-500Б-IV 2000/1

В.3.2.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа ТФЗМ-500Б-IV 2000/1):

$I_{1.ном} = 2000$ А; $I_{2.ном} = 1$ А; $R_2 = 10$ Ом; $X_2 = 0$ Ом; $z_{н.ном} = 50$ Ом; $\varepsilon = 10$ %; $K_{ном} = 18$, $\cos\varphi_{н.ном} = 0{,}8$.

ВАХ ТТ приведена на рисунке В.4.

В.3.2.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.экв}$ аналогичны расчету по В.1.1.

Данный ТТ имеет каскадное исполнение. Магнитопровод верхнего каскада имеет сечение, превышающее сечение каждого из магнитопроводов нижнего каскада в 4,5 раза. По этой причине расчет произведен для нижнего каскада.

В.3.2.3 Выполнение проверки допустимости использования метода

Определение фактической кратности тока КЗ:

- для трехфазного КЗ:

$$K_{факт}^{(3)} = \frac{I_к^{(3)}}{I_{1.ном}} = \frac{23145}{2000} = 11{,}57;$$

- для однофазного КЗ:

$$K_{факт}^{(1)} = \frac{I_к^{(1)}}{I_{1.ном}} = \frac{26900}{2000} = 13{,}45.$$

Определение тока намагничивания, соответствующего классу точности ТТ, по формуле (17):

- для трехфазного КЗ:

$$I_{0.10}^{(3)} = 0{,}1 I_{2ном} \cdot K_{факт}^{(3)} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 11{,}57 = 1{,}157 \text{ А};$$

- для однофазного КЗ:

$$I_{0.10}^{(1)} = 0{,}1 I_{2ном} \cdot K_{факт}^{(1)} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 13{,}45 = 1{,}345 \text{ А}.$$

По ВАХ ТТ (см. рисунок В.4) определить значения напряжений, соответствующие рассчитанным значениям $I_{0.10}^{(3)}$ и $I_{0.10}^{(1)}$:

$$U_{10}^{(3)} = 1374 \text{ В};$$

$$U_{10}^{(1)} = 1377 \text{ В}.$$

По ВАХ ТТ (см. рисунок В.4) определить параметры середины линейного участка ВАХ:

$$U_{лин} = 540 \text{ В};$$

$$I_{лин} = 0{,}0155 \text{ А}.$$

Проверка выполнения условия (16):

- для трехфазного КЗ:

$$\frac{I_{0.10}^{(3)} / U_{10}^{(3)}}{I_{лин} / U_{лин}} = \frac{1{,}157 / 1374}{0{,}0155 / 540} = 29{,}34 > 3 \text{ — условие выполняется};$$

- для однофазного КЗ:

$$\frac{I_{0.10}^{(1)} / U_{10}^{(1)}}{I_{лин} / U_{лин}} = \frac{1{,}345 / 1377}{0{,}0155 / 540} = 34{,}04 > 3 \text{ — условие выполняется}.$$

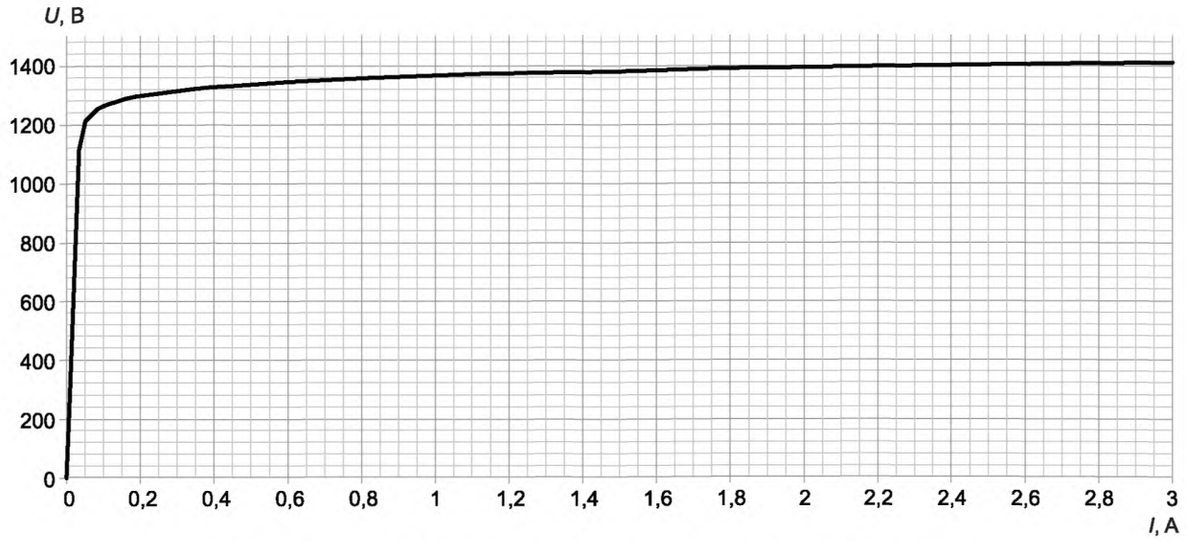


Рисунок В.4 — Вольтамперная характеристика ТТ ТФЗМ—500Б—2000/1

В.3.2.4 Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (19):

- для трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{U_{\varepsilon}^{(3)}}{U_{2sin}^{(3)}} = \frac{1374}{188,59} = 7,29;$$

$$A^{(3)}(1 - K_r) = 7,29 \cdot (1 - 0,86) = 1,02,$$

где $U_{2sin}^{(3)}$определяют по формуле (20):

$$U_{2sin}^{(3)} = K_{факт}^{(3)} \cdot I_{2.ном} \cdot (R_2 + R_{н.факт}^{(3)}) = 11,57 \cdot 1,0 \cdot (10 + 6,3) = 188,59 \text{ В};$$

- для однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{U_{\varepsilon}^{(1)}}{U_{2sin}^{(1)}} = \frac{1377}{303,97} = 4,53;$$

$$A_r^{(1)} = A^{(1)}(1 - K_r) = 4,53 \cdot (1 - 0,86) = 0,63,$$

где $U_{2sin}^{(1)} = K_{факт}^{(1)} \cdot I_{2.ном} \cdot (R_2 + R_{н.факт}^{(1)}) = 13,45 \cdot 1,0 \cdot (10 + 12,6) = 303,97$ В.

В.3.2.5 Определение времени до насыщения ТТ осуществляют графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

В.3.2.6 Для выбора универсальной характеристики рассчитывают косинус угла ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12):

- для трехфазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10 + 6,3}{16,3} = 1;$$

- для однофазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10 + 12,6}{22,6} = 1.$$

В.3.2.7 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.3.2.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 27,5 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 11,9 \text{ мс}.$$

В.3.2.8 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.3.2.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{нас} = 4,7 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{нас} = 3,7 \text{ мс}.$$

В.3.2.9 Определение времени до насыщения ТТ по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях (без использования $T_{р.экв}$).

Согласно формуле (15) строят временные диаграммы $K_{п.р}(t)$ для трехфазного и однофазного КЗ (см. рисунок В.2).

Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.3.2.4, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{нас} = 29,5 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{нас} = 12,0 \text{ мс}.$$

Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.3.2.4, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{нас} = 4,8 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{нас} = 3,7 \text{ мс}.$$

В.3.3 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа JK ELK CB3-780 4000/1

В.3.3.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа JK ELK CB3 4000/1):

$I_{1.ном} = 4000$ А; $I_{2.ном} = 1$А; $R_2 = 10,5$ Ом; $X_2 = 0$ Ом; $z_{н.ном} = 30$ Ом; $\varepsilon = 5$ %; $K_{ном} = 20$, $\cos\varphi_{н.ном} = 0,8$.

ВАХ ТТ приведена на рисунке В.5.

В.3.3.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.экв}$ аналогичны расчету по В.1.1.

В.3.3.3 Выполнение проверки допустимости использования метода

Определение фактической кратности тока КЗ:

- для трехфазного КЗ:

$$K^{(3)}_{факт} = \frac{I^{(3)}_к}{I_{1.ном}} = \frac{23145}{4000} = 5,79;$$

- для однофазного КЗ:

$$K^{(1)}_{факт} = \frac{I^{(1)}_к}{I_{1.ном}} = \frac{26900}{4000} = 6,73.$$

Определение тока намагничивания, соответствующего классу точности ТТ, по формуле (17):

- для трехфазного КЗ:

$$I^{(3)}_{0.5} = 0,05 I_{2ном} \cdot K^{(3)}_{факт} = 0,05 \cdot 1 \cdot 5,79 = 0,29 \text{ А};$$

- для однофазного КЗ:

$$I^{(1)}_{0.5} = 0,05 I_{2ном} \cdot K^{(1)}_{факт} = 0,05 \cdot 1 \cdot 6,73 = 0,34 \text{ А}.$$

Определение по ВАХ ТТ (см. рисунок В.5) значения напряжений, соответствующие рассчитанным значениям $I^{(3)}_{0.5}$ и $I^{(1)}_{0.5}$:

$$U^{(3)}_5 = 1453 \text{ В};$$

$$U^{(1)}_5 = 1458 \text{ В}.$$

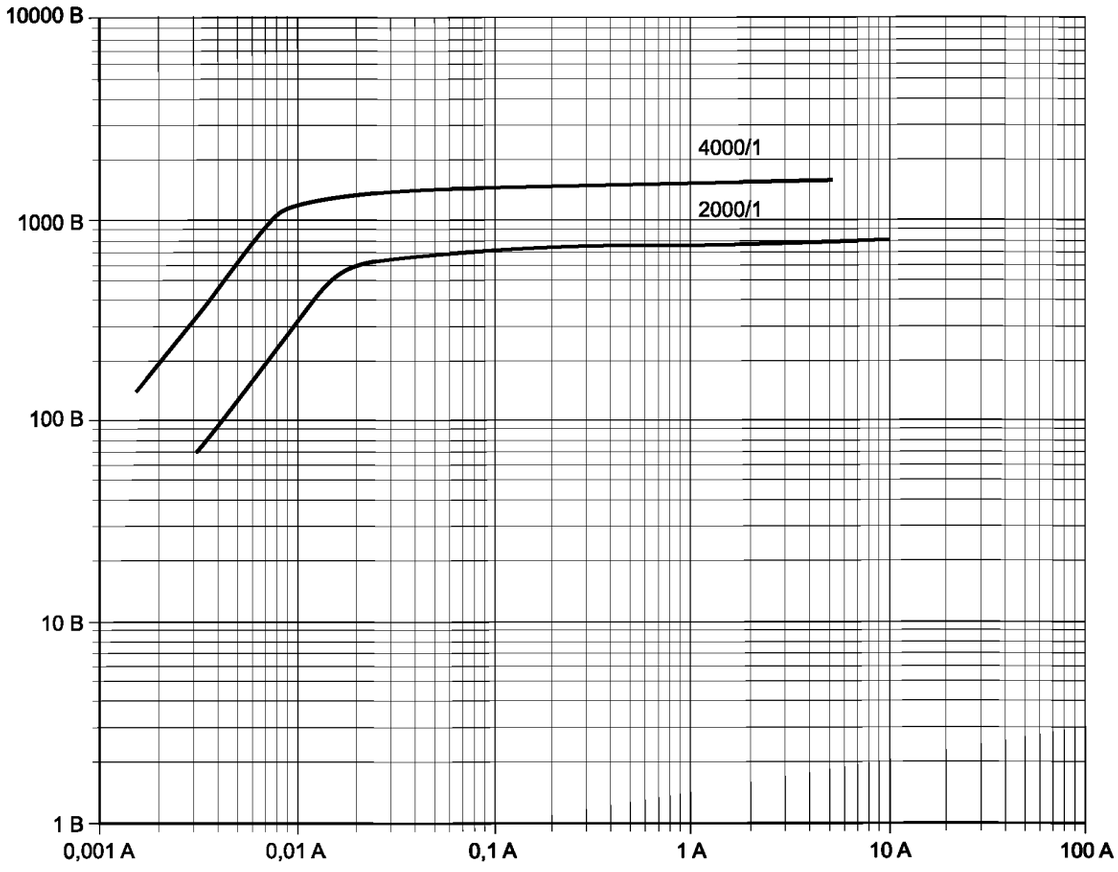


Рисунок В.5 — Вольтамперная характеристика ТТ JK ELK СВЗ—780 с $n_{ном}$ 4000/1 (верхняя кривая) и 2000/1 (нижняя кривая)

Определение по ВАХ ТТ (см. рисунок В.5) параметров середины линейного участка ВАХ:

$$U_{лин} = 405 \text{ В};$$

$$I_{лин} = 0{,}00273 \text{ А}.$$

Проверка выполнения условия (16):
- для трехфазного КЗ:

$$\frac{I_{0.5}^{(3)} / U_5^{(3)}}{I_{лин} / U_{лин}} = \frac{0{,}29 / 1453}{0{,}00273 / 405} = 29{,}85 > 3$$ — условие выполняется;

- для однофазного КЗ:

$$\frac{I_{0.5}^{(1)} / U_5^{(1)}}{I_{лин} / U_{лин}} = \frac{0{,}34 / 1458}{0{,}00273 / 405} = 34{,}78 > 3$$ — условие выполняется.

В.3.3.4 Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (19):
- для трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{U_{\varepsilon}^{(3)}}{U_{2.sin}^{(3)}} = \frac{1453}{97{,}27} = 14{,}94;$$

$$A^{(3)} (1 - K_r) = 14{,}94 \cdot (1 - 0{,}86) = 2{,}09,$$

где $U_{2sin}^{(3)}$определяют по формуле (20):

$$U_{2sin}^{(3)} = K_{факт}^{(3)} \cdot I_{2.ном} \cdot (R_2 + R_{н.факт}^{(3)}) = 5{,}79 \cdot 1{,}0 \cdot (10{,}5 + 6{,}3) = 97{,}27 \text{ В};$$

- для однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{U_{\varepsilon}^{(1)}}{U_{2sin}^{(1)}} = \frac{1458}{155,46} = 9,38;$$

$$A_r^{(1)} = A^{(1)}\,(1 - K_r) = 9,38 \cdot (1 - 0,86) = 1,31;$$

где $U_{2sin}^{(1)} = K_{факт}^{(1)} \cdot I_{2.ном} \cdot (R_2 + R_{н.факт}^{(1)}) = 6,73 \cdot 1,0 \cdot (10,5 + 12,6) = 155,46$ В.

В.3.3.5 Определение времени до насыщения ТТ осуществляют графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

В.3.3.6 Для выбора универсальной характеристики рассчитывают косинус угла ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12):

- для трехфазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10,5 + 6,3}{16,8} = 1;$$

- для однофазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10,5 + 12,6}{23,1} = 1.$$

В.3.3.7 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.3.3.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 54,6 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 30,9 \text{ мс}.$$

В.3.3.8 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.3.3.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 7,0 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 5,4 \text{ мс}.$$

В.3.3.9 Определение времени до насыщения ТТ по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях (без использования $T_{р.экв}$).

Согласно формуле (15) строят временные диаграммы $K_{п.р}(t)$ для трехфазного и однофазного КЗ (см. рисунок В.2).

Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.3.3.4, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 88,6 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 31,6 \text{ мс}.$$

Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.3.3.4, и на построенных характеристиках (см. рисунок В.2) определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t_{нас}^{(3)} = 7,2 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t_{нас}^{(1)} = 5,4 \text{ мс}.$$

В.4 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока графическим методом с использованием характеристики намагничивания трансформаторов тока

В.4.1 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа SAS 550/5G 2000/1

В.4.1.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа SAS 550/5G 2000/1):

$I_{1.ном}$ = 2000 А; $I_{2.ном}$ = 1 А; R_2 = 7,51 Ом; X_2 = 0 Ом; $z_{н.ном}$ = 40 Ом; ε = 10 %; $K_{ном}$ = 20, $\cos\varphi_{н.ном}$ = 0,8; w_2 = 1997 витков, s = 13,125 см^2; l = 1,437 м.

Характеристика намагничивания ТТ приведена на рисунке В.6.

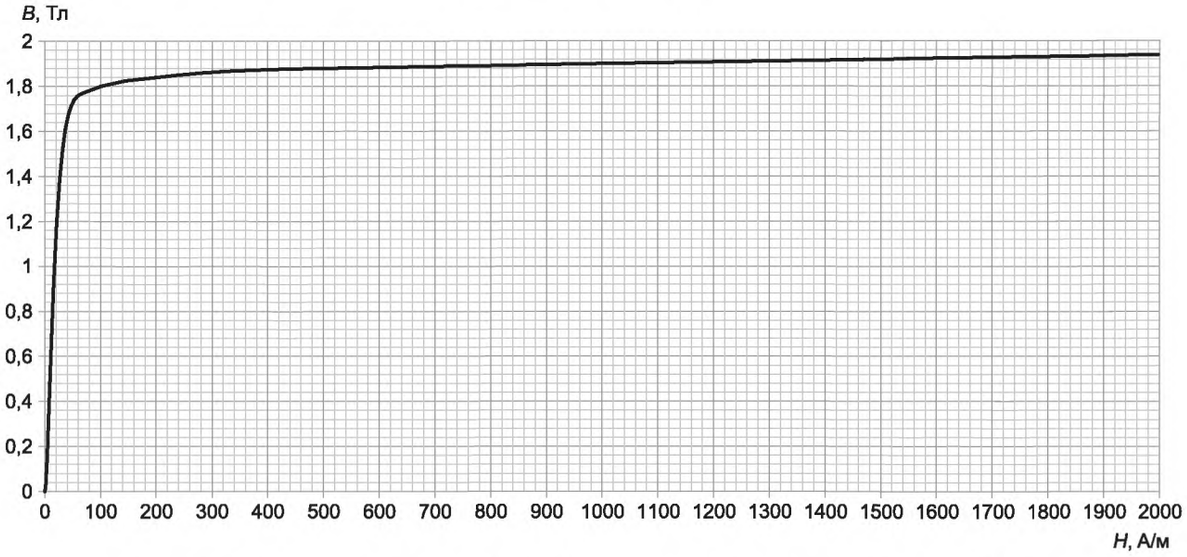


Рисунок В.6 — Зависимость $B_m(H)$ холоднокатаной электротехнической стали по [2]

В.4.1.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.экв}$ аналогичны расчету по В.1.1.

В.4.1.3 Выполнение проверки допустимости использования метода

Определение фактической кратности тока КЗ:

- для трехфазного КЗ:

$$K^{(3)}_{факт} = \frac{I^{(3)}_к}{I_{1.ном}} = \frac{23145}{2000} = 11{,}57;$$

- для однофазного КЗ:

$$K^{(1)}_{факт} = \frac{I^{(1)}_к}{I_{1.ном}} = \frac{26900}{2000} = 13{,}45.$$

Определение тока намагничивания, соответствующего классу точности ТТ, по формуле (17):

- для трехфазного КЗ:

$$I^{(3)}_{0.10} = 0{,}1 I_{2ном} \cdot K^{(3)}_{факт} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 11{,}57 = 1{,}157 \text{ А};$$

- для однофазного КЗ:

$$I^{(1)}_{0.10} = 0{,}1 I_{2ном} \cdot K^{(1)}_{факт} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 13{,}45 = 1{,}345 \text{ А}.$$

Определение действующего значения напряженности магнитного поля H_{10} по формуле (22):

$$H^{(3)}_{10} = I^{(3)}_{0.10} \cdot \frac{w_2}{l} = 1{,}157 \cdot \frac{1997}{1{,}437} = 1608 \text{ А/м};$$

$$H^{(1)}_{10} = I^{(1)}_{0.10} \cdot \frac{w_2}{l} = 1{,}345 \cdot \frac{1997}{1{,}437} = 1869 \text{ А/м}.$$

Определение по характеристике намагничивания ТТ $B_m(H)$ (см. рисунок В.6) для рассчитанных значений $H^{(3)}_{10}$ и $H^{(1)}_{10}$ магнитной индукции насыщения:

$$B^{(3)}_{m10}\,(H^{(3)}_{10}) = 1{,}924 \text{ Тл};$$

$$B^{(1)}_{m10}\,(H^{(1)}_{10}) = 1{,}934 \text{ Тл}.$$

Проверка выполнения условия (21):

- для трехфазного КЗ:

$$B^{(3)}_{m10}\,(H^{(3)}_{10}) = 1{,}924\ \text{Тл} > 1{,}8\ \text{Тл}$$ — условие выполняется;

- для однофазного КЗ:

$$B^{(1)}_{m10}\,(H^{(1)}_{10}) = 1{,}934\ \text{Тл} > 1{,}8\ \text{Тл}$$ — условие выполняется.

В.4.1.4 Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (23):

- для трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{B^{(3)}_{m10}}{B^{(3)}_{m}} = \frac{1{,}924}{0{,}275} = 6{,}99;$$

$$A^{(3)}\,(1 - K_r) = 6{,}99 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}98,$$

где $B^{(3)}_{m}$ определяют по формуле (24):

$$B^{(3)}_{m} = \frac{U^{(3)}_{2\text{sin}}}{222 \cdot w_2 \cdot s} = \frac{159{,}78}{222 \cdot 1997 \cdot 13{,}125 \cdot 10^{-4}} = 0{,}275,$$

где $U^{(3)}_{2\text{sin}}$определяют по формуле (20):

$$U^{(3)}_{2\text{sin}} = K^{(3)}_{\text{факт}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (R_2 + R^{(3)}_{\text{н.факт}}) = 11{,}57 \cdot 1{,}0 \cdot (7{,}51 + 6{,}3) = 159{,}78\ \text{В};$$

- для однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{B^{(1)}_{m10}}{B^{(1)}_{m}} = \frac{1{,}934}{0{,}465} = 4{,}16;$$

$$A^{(1)}\,(1 - K_r) = 4{,}16 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}58,$$

где $B^{(1)}_{m}$ определяют по формуле (24):

$$B^{(1)}_{m} = \frac{U^{(1)}_{2\text{sin}}}{222 \cdot w_2 \cdot s} = \frac{270{,}48}{222 \cdot 2000 \cdot 13{,}125 \cdot 10^{-4}} = 0{,}465,$$

где $U^{(3)}_{2\text{sin}}$определяют по формуле (20):

$$U^{(1)}_{2\text{sin}} = K^{(1)}_{\text{факт}} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (R_2 + R^{(1)}_{\text{н.факт}}) = 13{,}45 \cdot 1{,}0 \cdot (7{,}51 + 12{,}6) = 270{,}48\ \text{В}.$$

В.4.1.5 Определение времени до насыщения ТТ осуществляют графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

В.4.1.6 Для выбора универсальной характеристики рассчитывают косинус угла ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12):

- для трехфазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{\text{н.факт}}}{z_{2\Sigma}} = \frac{7{,}51 + 6{,}3}{13{,}81} = 1;$$

- для однофазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{\text{н.факт}}}{z_{2\Sigma}} = \frac{7{,}51 + 12{,}6}{20{,}11} = 1.$$

В.4.1.7 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения A, рассчитанные в В.4.1.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.\text{экв}}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 27{,}0\ \text{мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 11{,}0\ \text{мс}.$$

В.4.1.8 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.4.1.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.\text{экв}}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 4{,}6 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 3{,}5 \text{ мс}.$$

В.4.2 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа ТФЗМ-500Б-IV 2000/1

В.4.2.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа ТФЗМ-500Б-IV 2000/1):

$I_{1.\text{ном}}$ = 2000 А; $I_{2.\text{ном}}$ = 1А; R_2 = 10 Ом; X_2 = 0 Ом; $z_{\text{н.ном}}$ = 50 Ом; ε = 10 %; $K_{\text{ном}}$ = 18, $\cos\varphi_{\text{н.ном}}$ = 0,8; w_2 = 1185 витков, s = 26,5 см^2; l = 1,3 м.

Характеристика намагничивания ТТ приведена на рисунке В.6.

В.4.2.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.\text{экв}}$ аналогичны расчету по В.1.1.

Данный ТТ имеет каскадное исполнение. Магнитопровод верхнего каскада имеет сечение, превышающее сечение каждого из магнитопроводов нижнего каскада в 4,5 раза. По этой причине расчет произведен для нижнего каскада.

В.4.2.3 Выполнение проверки допустимости использования метода

Определение фактической кратности тока КЗ:

- для трехфазного КЗ:

$$K^{(3)}_{\text{факт}} = \frac{I^{(3)}_{\text{к}}}{I_{1.\text{ном}}} = \frac{23145}{2000} = 11{,}57;$$

- для однофазного КЗ:

$$K^{(1)}_{\text{факт}} = \frac{I^{(1)}_{\text{к}}}{I_{1.\text{ном}}} = \frac{26900}{2000} = 13{,}45.$$

Определение тока намагничивания, соответствующего классу точности ТТ, по формуле (17):

- для трехфазного КЗ:

$$I^{(3)}_{0.10} = 0{,}1 I_{2\text{ном}} \cdot K^{(3)}_{\text{факт}} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 11{,}57 = 1{,}157 \text{ А};$$

- для однофазного КЗ:

$$I^{(1)}_{0.10} = 0{,}1 I_{2\text{ном}} \cdot K^{(1)}_{\text{факт}} = 0{,}1 \cdot 1 \cdot 13{,}45 = 1{,}345 \text{ А}.$$

Определение действующего значения напряженности магнитного поля H_{10} по формуле (22):

$$H^{(3)}_{10} = I^{(3)}_{0.10} \cdot \frac{w_2}{l} = 1{,}157 \cdot \frac{1185}{1{,}3} = 1054{,}65 \text{ А/м};$$

$$H^{(1)}_{10} = I^{(1)}_{0.10} \cdot \frac{w_2}{l} = 1{,}345 \cdot \frac{1185}{1{,}3} = 1226{,}02 \text{ А/м}.$$

Определение по характеристике намагничивания ТТ $B_m(H)$ (см. рисунок В.6) для рассчитанных значений $H^{(3)}_{10}$ и $H^{(1)}_{10}$ магнитной индукции насыщения:

$$B^{(3)}_{m10}\,(H^{(3)}_{10}) = 1{,}902 \text{ Тл};$$

$$B^{(1)}_{m10}\,(H^{(1)}_{10}) = 1{,}909 \text{ Тл}.$$

Проверка выполнения условия (21):

- для трехфазного КЗ:

$$B^{(3)}_{m10}\,(H^{(3)}_{10}) = 1{,}902 \text{ Тл} > 1{,}8 \text{ Тл} \text{ — условие выполняется};$$

- для однофазного КЗ:

$$B^{(1)}_{m10}\,(H^{(1)}_{10}) = 1{,}909 \text{ Тл} > 1{,}8 \text{ Тл} \text{ — условие выполняется}.$$

В.4.2.4 Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (23):

- для трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{B^{(3)}_{m10}}{B^{(3)}_{m}} = \frac{1{,}902}{0{,}27} = 7{,}04;$$

$$A^{(3)}\,(1 - K_r) = 7{,}04 \cdot (1 - 0{,}86) = 0{,}99,$$

где $B^{(3)}_m$ определяют по формуле (24):

$$B^{(3)}_m = \frac{U^{(3)}_{2\sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s} = \frac{188{,}59}{222 \cdot 1185 \cdot 26{,}5 \cdot 10^{-4}} = 0{,}27 \text{ Тл},$$

где $U^{(3)}_{2sin}$определяют по формуле (20):

$$U^{(3)}_{2sin} = K^{(3)}_{факт} \cdot I_{2.ном} \cdot (R_2 + R^{(3)}_{н.факт}) = 11,57 \cdot 1,0 \cdot (10 + 6,3) = 188,59 \text{ В},$$

- для однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{B^{(1)}_{m10}}{B^{(1)}_{m}} = \frac{1,909}{0,44} = 4,34;$$

$$A^{(1)} (1 - K_r) = 4,34 \cdot (1 - 0,86) = 0,61,$$

где $B^{(1)}_m$ определяют по формуле (24):

$$B^{(1)}_m = \frac{U^{(1)}_{2sin}}{222 \cdot w_2 \cdot s} = \frac{303,97}{222 \cdot 1185 \cdot 26,5 \cdot 10^{-4}} = 0,44 \text{ Тл},$$

где $U^{(3)}_{2sin}$определяют по формуле (20):

$$U^{(1)}_{2sin} = K^{(1)}_{факт} \cdot I_{2.ном} \cdot (R_2 + R^{(1)}_{н.факт}) = 13,45 \cdot 1,0 \cdot (10 + 12,6) = 303,97 \text{ В}.$$

В.4.2.5 Определение времени до насыщения ТТ осуществляют графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

В.4.2.6 Для выбора универсальной характеристики рассчитывают косинус угла ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12):

- для трехфазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10 + 6,3}{16,3} = 1;$$

- для однофазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{н.факт}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10 + 12,6}{22,6} = 1.$$

В.4.2.7 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения А, рассчитанные в В.4.2.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{нас} = 27,0 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{нас} = 11,5 \text{ мс}.$$

В.4.2.8 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{п.р}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.4.2.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{р.экв}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{нас}$:

$$K_{п.р}(t_{нас}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{нас} = 4,6 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{нас} = 3,6 \text{ мс}.$$

В.4.3 Расчет времени до насыщения трансформаторов тока типа JK ELK CB3-780 4000/1

В.4.3.1 Исходные данные (номинальные параметры ТТ типа JK ELK CB3 4000/1):

$I_{1.ном}$ = 4000 А; $I_{2.ном}$ = 1А; R_2 = 10,5 Ом; X_2 = 0 Ом; $z_{н.ном}$ = 30 Ом; ε = 5 %; $K_{ном}$ = 20, cos $\varphi_{н.ном}$ = 0,8, w_2 = 4000 витков, s = 8,2 см^2; l = 1,2 м.

Характеристика намагничивания ТТ приведена на рисунке В.6.

В.4.3.2 Расчетная схема электрической станции, схемно-режимные условия и расчетное место КЗ, величина нагрузки во вторичных цепях ТТ и $T_{р.экв}$ аналогичны расчету по В.1.1.

В.4.3.3 Выполнение проверки допустимости использования метода

Определение фактической кратности тока КЗ:

- для трехфазного КЗ:

$$K^{(3)}_{факт} = \frac{I^{(3)}_{к}}{I_{1.ном}} = \frac{23145}{4000} = 5,79;$$

- для однофазного КЗ:

$$K_{\text{факт}}^{(1)} = \frac{I_{\text{к}}^{(1)}}{I_{1.\text{ном}}} = \frac{26900}{4000} = 6,37.$$

Определение тока намагничивания, соответствующего классу точности ТТ, по формуле (17):

- для трехфазного КЗ:

$$I_{0.5}^{(3)} = 0,05 I_{2\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}^{(3)} = 0,05 \cdot 1 \cdot 5,79 = 0,29 \text{ А};$$

- для однофазного КЗ:

$$I_{0.5}^{(1)} = 0,05 I_{2\text{ном}} \cdot K_{\text{факт}}^{(1)} = 0,05 \cdot 1 \cdot 6,73 = 0,34 \text{ А}.$$

Определение действующего значения напряженности магнитного поля H_5 по формуле (22):

$$H_5^{(3)} = I_{0.5}^{(3)} \cdot \frac{w_2}{l} = 0,29 \cdot \frac{4000}{1,2} = 966 \text{ А/м};$$

$$H_5^{(1)} = I_{0.5}^{(1)} \cdot \frac{w_2}{l} = 0,34 \cdot \frac{4000}{1,2} = 1133 \text{ А/м}.$$

Определение по характеристике намагничивания ТТ $B_m(H)$ (см. рисунок В.6) для рассчитанных значений $H_5^{(3)}$ и $H_5^{(1)}$ магнитной индукции насыщения:

$$B_{m5}^{(3)}(H_5^{(3)}) = 1,899 \text{ Тл};$$

$$B_{m5}^{(1)}(H_5^{(1)}) = 1,905 \text{ Тл}.$$

Проверка выполнения условия (21):

- для трехфазного КЗ:

$$B_{m5}^{(3)}(H_5^{(3)}) = 1,899 \text{ Тл} > 1,8 \text{ Тл} \text{ — условие выполняется};$$

- для однофазного КЗ:

$$B_{m5}^{(1)}(H_5^{(1)}) = 1,905 \text{ Тл} > 1,8 \text{ Тл} \text{ — условие выполняется}.$$

В.4.3.4 Определение параметра режима А для трехфазного и однофазного КЗ по формуле (23):

- для трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{B_{m5}^{(3)}}{B_m^{(3)}} = \frac{1,899}{0,134} = 14,17;$$

$$A^{(3)}(1 - K_r) = 14,17 \cdot (1 - 0,86) = 1,98,$$

где $B_m^{(3)}$ определяют по формуле (24):

$$B_m^{(3)} = \frac{U_{2\text{sin}}^{(3)}}{222 \cdot w_2 \cdot s} = \frac{97,27}{222 \cdot 4000 \cdot 8,2 \cdot 10^{-4}} = 0,134 \text{ Тл},$$

где $U_{2\text{sin}}^{(3)}$ определяют по формуле (20):

$$U_{2\text{sin}}^{(3)} = K_{\text{факт}}^{(3)} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (R_2 + R_{\text{н.факт}}^{(3)}) = 5,79 \cdot 1,0 \cdot (10,5 + 6,3) = 97,27 \text{ В};$$

- для однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{B_{m5}^{(1)}}{B_m^{(1)}} = \frac{1,905}{0,213} = 8,94;$$

$$A^{(1)}(1 - K_r) = 8,94 \cdot (1 - 0,86) = 1,25,$$

где $B_m^{(1)}$ определяют по формуле (24):

$$B_m^{(1)} = \frac{U_{2\text{sin}}^{(1)}}{222 \cdot w_2 \cdot s} = \frac{155,46}{222 \cdot 4000 \cdot 8,2 \cdot 10^{-4}} = 0,213 \text{ Тл},$$

где $U_{2\text{sin}}^{(3)}$ определяют по формуле (20):

$$U_{2\text{sin}}^{(1)} = K_{\text{факт}}^{(1)} \cdot I_{2.\text{ном}} \cdot (R_2 + R_{\text{н.факт}}^{(1)}) = 6,73 \cdot 1,0 \cdot (10,5 + 12,6) = 155,46 \text{ В}.$$

В.4.3.5 Определение времени до насыщения ТТ осуществляют графически в соответствии с универсальными характеристиками (приложение Б).

В.4.3.6 Для выбора универсальной характеристики рассчитывают косинус угла ветви вторичной нагрузки ТТ по формуле (12):

- для трехфазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{\text{н.факт}}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10,5 + 6,3}{16,8} = 1;$$

- для однофазного КЗ:

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_{\text{н.факт}}}{z_{2\Sigma}} = \frac{10,5 + 12,6}{23,1} = 1.$$

В.4.3.7 Для определения времени до насыщения ТТ без учета остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения А, рассчитанные в В.4.3.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{p.\text{экв}}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A,$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 52,3 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 30,1 \text{ мс}.$$

В.4.3.8 Для определения времени до насыщения ТТ с учетом остаточной магнитной индукции в сердечнике ТТ на оси $K_{\text{п.р}}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в В.4.3.4, и на универсальных характеристиках, соответствующих рассчитанному значению $T_{p.\text{экв}}$ и cos α, определить соответствующие им значения $t_{\text{нас}}$:

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A(1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ:

$$t^{(3)}_{\text{нас}} = 6,8 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ:

$$t^{(1)}_{\text{нас}} = 5,3 \text{ мс}.$$

В.5 Сопоставление результатов расчета времени до насыщения по разным методам

Таблица В.2 — Значения времени до насыщения для трехфазного КЗ

Тип ТТ	По аналитическому методу $t_{\text{нас}}$, мс	По графическому методу по паспортным данным $t_{\text{нас}}$, мс		По графическому методу с использованием ВАХ ТТ $t_{\text{нас}}$, мс		По графическому методу с использованием характеристики намагничивания ТТ и $T_{p.\text{экв}}$ $t_{\text{нас}}$, мс
		$T_{p.\text{экв}}$	$\sum j_{a.i}$	$T_{p.\text{экв}}$	$\sum j_{a.i}$	
$K_r = 0$						
SAS 550/5G 2000/1	16,22	16,8	26,2	27,2	29,1	27,0
ТФЗМ-500Б-IV 2000/1	15,42	15,1	25,6	27,5	29,5	27,0
JK ELK СВЗ 4000/1	24,5	28,9	31,0	54,6	88,6	52,3
$K_r = 0,86$						
SAS 550/5G 2000/1	—	4,2	4,2	4,7	4,7	4,6
ТФЗМ-500Б-IV 2000/1	—	4,1	4,1	4,7	4,8	4,6
JK ELK СВЗ 4000/1	0,39	5,0	5,0	7,0	7,2	6,8

Таблица В.3 — Значения времени до насыщения для однофазного КЗ

Тип ТТ	По аналитическому методу $t_{\text{нас}}$, мс	По графическому методу по паспортным данным $t_{\text{нас}}$, мс		По графическому методу с использованием ВАХ ТТ $t_{\text{нас}}$, мс		По графическому методу с использованием характеристики намагничивания ТТ и $T_{p.\text{экв}}$ $t_{\text{нас}}$, мс
		$T_{p.\text{экв}}$	$\sum j_{a.i}$	$T_{p.\text{экв}}$	$\sum j_{a.i}$	
$K_r = 0$						
SAS 550/5G 2000/1	7,87	9,6	9,6	11,1	11,2	11,0
ТФЗМ-500Б-IV 2000/1	7,98	9,6	9,7	11,9	12,0	11,5

Окончание таблицы В.3

Тип ТТ	По аналитическому методу $t_{нас}$, мс	По графическому методу по паспортным данным $t_{нас}$, мс		По графическому методу с использованием ВАХ ТТ $t_{нас}$, мс		По графическому методу с использованием характеристики намагничивания ТТ и $T_{р.экв}$ $t_{нас}$, мс
		$T_{р.экв}$	$\sum i_{a.i}$	$T_{р.экв}$	$\sum i_{a.i}$	
JK ELK CB3 4000/1	13,24	13,0	13,2	30,9	31,6	30,1
K_r = 0,86						
SAS 550/5G 2000/1	—	3,2	3,2	3,5	3,5	3,5
ТФЗМ-500Б-IV 2000/1	—	3,2	3,2	3,7	3,7	3,6
JK ELK CB3 4000/1	—	3,9	3,9	5,4	5,4	5,3

Приложение Г
(справочное)

Теоретические основы моделирования и расчета режимов работы трансформаторов тока

Г.1 Общие положения

Г.1.1 Допущения при моделировании

Моделирование и расчеты переходных и установившихся режимов работы ТТ выполняют при следующих допущениях:

- рассматривается одиночный одноступенчатый ТТ;
- сложная картина магнитного поля заменяется суммой трех магнитных потоков: Φ_0 — основной магнитный поток (взаимной индукции), $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ — потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток, соответственно [см. рисунок Г.1, а)];
- полагают, что потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ пропорциональны первичному i_1 и вторичному i_2 токам соответственно, и следовательно, можно считать постоянными индуктивности рассеяния первичной $L_{\sigma 1}$ и вторичной L_2 обмоток;
- активные сопротивления потерь на гистерезис и вихревые токи не учитываются или учитываются путем введения эквивалентных активных сопротивлений потерь в стали на гистерезис и вихревые токи, зависящих от магнитной индукции.

Относительно тока в первичной цепи в переходном режиме приняты следующие допущения:

- отсутствуют периодические вынужденные составляющие второй и последующих гармоник;
- не учитывается изменение амплитуды периодической составляющей тока (первой гармоники) в ходе переходного процесса (например, действием автоматических регуляторов возбуждения генераторов и вследствие электромеханических переходных процессов);
- на протяжении всего рассматриваемого переходного процесса свободная периодическая составляющая первичного тока повреждения отсутствует;
- рабочий ток в доаварийном режиме принимается равным нулю;
- ЛЭП представляется схемой с сосредоточенными параметрами, при этом поперечными параметрами (емкостными и активными проводимостями) пренебрегают.

Г.1.2 Схема замещения трансформатора тока и ее параметры

Схема замещения ТТ, приведенная на рисунке Г.1, б), подключена к источнику тока i_1 (первичной электрической сети) через идеальный трансформатор с номинальным коэффициентом трансформации $n_{ном}$ и содержит активное сопротивление вторичной обмотки R_2, индуктивность рассеяния вторичной обмотки L_2 и индуктивность намагничивающей ветви L_0. К зажимам вторичной обмотки подключена активно-индуктивная нагрузка $R_н$, $L_н$.

Так как первичная обмотка ТТ подключена к источнику тока, то для схемы замещения ТТ при активно-индуктивном характере сопротивления его вторичной ветви ТТ справедливы следующие уравнения:

$$\frac{d\Psi_{02}}{dt} = (R_2 + R_н) i_2 + (L_2 + L_н)\frac{di_2}{dt}; \qquad (Г.1)$$

$$i_1' - i_2 = i_0;$$

$$B = f(H),$$

где $\Psi_{02} = w_2\Phi_0$ — потокосцепление вторичной обмотки, обусловленное основным магнитным потоком Φ_0;

i_1' — приведенный ко вторичной цепи ТТ первичный ток;

i_2 — вторичный ток;

i_0 — намагничивающий ток;

$B = \frac{\Phi_0}{s}$, $H = \frac{i_0 w_2}{l}$ — магнитная индукция и напряженность магнитного поля в сердечнике, соответственно;

w_2 — число витков вторичной обмотки;

s, l — поперечное сечение магнитопровода и средняя длина магнитной силовой линии соответственно.

В расчетах переходных процессов в ТТ используются следующие обозначения:

$$L_s = L_0 + L_2 + L_н;$$

$$R_s = R_2 + R_н, \qquad (Г.2)$$

где L_2 — сумма индуктивностей намагничивающей ветви, рассеяния вторичной обмотки и нагрузки на ТТ;

R_s — суммарное активное сопротивление вторичной обмотки и нагрузки на ТТ.

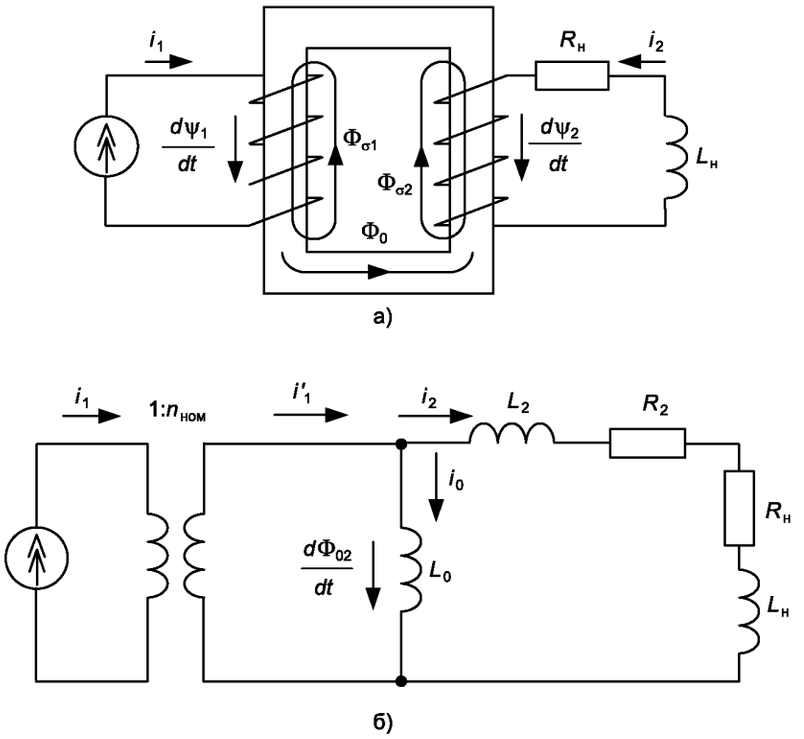


Рисунок Г.1 — Трансформатор тока, а), и его схема замещения, б)

Г.1.3 Режим работы трансформатора тока при коротком замыкании

Г.1.3.1 Режим работы ТТ при КЗ в первичной сети определяется характеристикой намагничивания сердечника (зависимостью $B(H)$ с учетом остаточной магнитной индукции B_r), параметрами ТТ (числом витков вторичной обмотки w_2, поперечным сечением сердечника s, средней длиной силовой линии l, активными сопротивлениями вторичной обмотки R_2 и нагрузки $R_н$, индуктивностями вторичной обмотки L_2 и нагрузки $L_н$), а также фактической кратностью первичного тока ТТ:

$$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}}, \quad (Г.3)$$

где $I_{КЗ}$ — действующее значение периодической составляющей тока КЗ;

$I_{1.ном}$ — номинальный первичный ток ТТ.

При наличии в токе КЗ одной апериодической составляющей необходимо учитывать постоянную времени ее затухания:

$$T_p = \frac{L_1}{R_1}, \quad (Г.4)$$

где L_1, R_1 — параметры контура первичного тока.

Кроме того, на режим работы ТТ влияет постоянная времени вторичного контура ТТ:

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}, \quad (Г.5)$$

и относительное содержание апериодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени:

$$\beta_0 = \frac{I_{a.0}}{I_m}, \quad (Г.6)$$

где $I_{a.0}$ — начальное значение апериодической составляющей тока КЗ;

I_m — амплитуда периодической составляющей тока КЗ.

Приведенный ко вторичной цепи ТТ первичный ток с апериодической составляющей с учетом начальной фазы периодической составляющей описывается уравнением:

$$i'_1 = i'_{m1}\left[e^{-\frac{t}{T_p}}\cos\vartheta - \cos(wt+\vartheta)\right], \quad (Г.7)$$

где i'_{m1} — амплитуда приведенной к вторичной цепи периодической составляющей первичного тока;

ϑ — начальная фаза периодической составляющей первичного тока в момент возникновения КЗ ($t = 0$). Часто в расчетах ее принимают равной нулю, что соответствует максимальному относительному содержанию апериодической составляющей в первичном токе.

Г.1.3.2 Сердечники большинства отечественных ТТ изготовлены из холоднокатаной текстурованной электротехнической стали, обладающей высокой прямоугольностью характеристики намагничивания. Для такой стали допустимость замены характеристики намагничивания ПХН при расчете времени до насыщения ТТ объясняется тем, что пренебрежение частными циклами петель гистерезиса и намагничивающим током до колена кривой намагничивания вносит в расчеты времени до насыщения незначительную погрешность, не превышающую 2 % от номинального вторичного тока. Однако применение ПХН — аппроксимации характеристики намагничивания в расчетах времени до насыщения ТТ должно быть обосновано, например, с помощью следующего критерия.

Замена реальной характеристики намагничивания прямоугольной допустима, если в условиях 10(5) %-ной погрешности ТТ при заданных значениях кратности синусоидального тока и сопротивления вторичной цепи ТТ рабочая точка последнего находится выше точки перегиба (излома) реальной характеристики намагничивания.

Этому условию соответствует увеличение проводимости ветви намагничивания ТТ при 10(5) %-ной погрешности $y_{10(5)}$ в 3 и более раза по сравнению с проводимостью на ненасыщенном участке кривой $y_{лин}$. Отношение проводимостей — коэффициент нелинейности:

$$k_{лин} = \frac{y_{10(5)}}{y_{лин}}. \qquad (Г.8)$$

Значение проводимости $y_{лин}$ вычисляют по ВАХ ТТ как отношение тока намагничивания $I_{0лин}$ к напряжению $U_{лин}$ на середине линейного участка характеристики.

Если расчет выполняют по ВАХ ТТ, то при токе намагничивания $I_{10(5)}$, составляющем 10(5) % от тока КЗ $I_{КЗ}$, находят соответствующее ему значение напряжения $U_{10(5)}$. Затем вычисляют проводимость намагничивающей ветви по выражению:

$$y_{10(5)} = \frac{I_{10(5)}}{U_{10(5)}}. \qquad (Г.9)$$

Условие допустимости расчетов по ПХН при этом имеет вид:

$$k_{нелин} = \frac{y_{10(5)}}{y_{лин}} \geq 3. \qquad (Г.10)$$

Г.1.3.3 Для современных холоднокатаных сталей условие допустимости расчетов по ПХН выполняется, если амплитуда магнитной индукции в сердечнике при напряженности магнитного поля $H_{10(5)}$, соответствующей 10(5) %-ной погрешности ТТ, превышает 1,8 Тл. Значения H_{10} и H_5 вычисляют по выражениям:

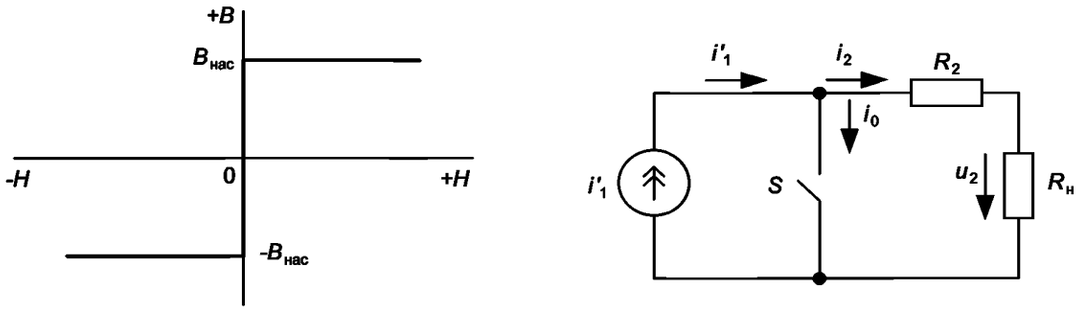
$$H_{10} = 0{,}1I'_к \cdot \frac{w_2}{l}; \quad H_5 = 0{,}05I'_к \cdot \frac{w_2}{l}. \qquad (Г.11)$$

Если амплитуда магнитной индукции B_m, соответствующая для современных электротехнических холоднокатаных сталей вычисленным значениям H_{10} или H_5, оказывается не ниже, чем 1,8 Тл, то условие допустимости расчетов по ПХН выполнено.

Г.1.3.4 В переходных режимах КЗ часто заменяют намагничивающую ветвь ТТ классов Р и ТРХ ключом S, управляемым значениями магнитной индукции насыщения $\pm B_{нас}$, т. е. элементом с идеальной ПХН, которая в пределах $\pm B_{нас}$ совпадает с осью магнитных индукций B, а вне указанных пределов представляет собой отрезки прямых линий, параллельных оси абсцисс H, где H — напряженность магнитного поля. Вид ПХН приведен на рисунке Г.2 (а).

Схема замещения ТТ с ПХН принимает вид, приведенный на рисунке Г.2 (б), где i_0 — намагничивающий ток. До насыщения ТТ намагничивающий ток i_0 отсутствует, а после насыщения (замыкания ключа S) резко возрастает. Замена реальной характеристики намагничивания ПХН удобна для определения времени до насыщения ТТ, так как последнее при этом определяется первичным током, приведенным ко вторичной цепи и параметрами ветви вторичного тока.

Расчет времени до насыщения ТТ может быть значительно упрощен при использовании коэффициента переходного режима $K_{п.р}(t)$ (см. [3]).



а) б)

Рисунок Г.2 — Идеальная прямоугольная характеристика ПХН, а), и схема замещения ТТ с ПХН, б), при активном характере сопротивления ветви вторичного тока

Г.2 Коэффициент переходного режима трансформаторов тока с прямоугольной характеристикой намагничивания

Коэффициентом переходного режима $K_{п.р}(t)$ называют функцию, характеризующую изменение во времени отношения мгновенного значения потокосцепления при наличии в первичном токе ТТ апериодической составляющей $\Psi_{п.р}$ к амплитудному значению потокосцепления Ψ_m, которое имело бы место при токе КЗ, не содержащем апериодической составляющей:

$$K_{п.р}(t) = \Psi_{п.р} / \Psi_m . \qquad (Г.12)$$

Коэффициент $K_{п.р}(t)$ показывает, во сколько раз при заданных значениях периодической составляющей первичного тока и сопротивления ветви вторичного тока потокосцепление $\Psi_{п.р}$ (и магнитная индукция $B_{п.р}$ в магнитопроводе ТТ) возрастает в переходном процессе по отношению к потокосцеплению Ψ_m, соответствующему отсутствию в токе апериодической составляющей (за счет подмагничивания магнитопровода апериодической составляющей первичного тока ТТ).

$K_{п.р}(t)$ вычисляют при условии отсутствия насыщения манитопровода ТТ в переходном режиме.

Г.3 Расчет $K_{п.р}(t)$ при наличии в токе короткого замыкания одной апериодической составляющей

Г.3.1 В общем случае при наличии в токе КЗ одной свободной апериодической составляющей, изменяющейся по экспоненциальному закону, выражение первичного тока ТТ при КЗ соответствует уравнению (Г.7).

У ТТ с ПХН индуктивностью намагничивающей ветви пренебрегают, то есть полагают, что $L_0 = \infty$. Тогда до насыщения сердечника $i_2 = i'_1$.

Г.3.2 В случае активно-индуктивного характера сопротивления ветви вторичного тока ТТ с момента возникновения КЗ в первичной сети до момента насыщения сердечника ТТ, то есть в течение времени до насыщения ТТ, справедливо уравнение:

$$(L_2 + L_н)\frac{di'_1}{dt} + (R_2 + R_н)i'_1 = \frac{d\Psi_2}{dt}. \qquad (Г.13)$$

Г.3.3 Амплитуда потокосцепления вторичной обмотки ТТ в установившемся режиме при синусоидальном первичном токе равна:

$$\Psi_{2m} = \frac{I'_{m1} z_{2\Sigma}}{\omega}. \qquad (Г.14)$$

Г.3.4 После интегрирования уравнения (Г.13) в пределах от 0 до t при токе, описываемом уравнением (Г.7), и деления полученного выражения для изменения потокосцепления вторичной обмотки ТТ во время переходного процесса $\Delta\Psi_2(t)$ на Ψ_{2m} получают уравнение следующего вида для коэффициента переходного режима:

$$K_{п.р}(t) = \frac{\Delta\Psi_2(t)}{\Psi_{2m}} = \sin\alpha \cdot \cos\vartheta \cdot e^{-\frac{t}{T_p}} + \cos\alpha \cdot \cos\vartheta \cdot \omega \cdot T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right) - \sin(\omega \cdot t + \alpha + \vartheta) + \cos\alpha \cdot \sin\vartheta, \qquad (Г.15)$$

где α — угол сопротивления ветви вторичного тока ТТ;

$$\sin\alpha = \frac{\omega \cdot (L_2 + L_н)}{z_{2\Sigma}};$$

$$\cos\alpha = \frac{R_2 + R_н}{z_{2\Sigma}};$$

$z_{2\Sigma} = \sqrt{(R_2 + R_н)^2 + (\omega \cdot L_2 + \omega \cdot L_н)^2}$ — полное сопротивление ветви вторичного тока ТТ.

Г.3.5 У большинства современных ТТ сверхвысокого напряжения класса Р, являющихся источниками информации для микропроцессорных устройств релейной защиты, индуктивность рассеяния вторичной обмотки ТТ L_2 пренебрежимо мала, причем нагрузка также имеет активный характер. Тогда уравнение для $K_{п.р}(t)$ принимает вид:

$$K_{п.р}(t) = \frac{\Delta\Psi_2(t)}{\Psi_{2m}} = \omega T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right) \cdot \cos\vartheta - \sin(\omega t + \vartheta) + \sin\vartheta. \quad (Г.16)$$

Г.3.6 В частном случае максимального относительного содержания апериодической составляющей в первичном токе (начальная фаза периодической составляющей тока КЗ $\vartheta = 0$) уравнения (Г.15) и (Г.16) преобразуют к виду:

- при активно-индуктивном характере сопротивления вторичной цепи ТТ:

$$K_{п.р}(t) = \sin\alpha \cdot e^{-\frac{t}{T_p}} + \cos\alpha \cdot \omega \cdot T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right) - \sin(\omega \cdot t + \alpha); \quad (Г.17)$$

- активном характере сопротивления вторичной цепи ТТ:

$$K_{п.р}(t) = \omega \cdot T_p \left(1 - e^{-\frac{t}{T_p}}\right) - \sin(\omega t). \quad (Г.18)$$

Г.3.7 Универсальные характеристики ТТ классов Р и ТРХ для определения коэффициента переходного режима $K_{п.р}(t)$ ТТ при активно-индуктивном и активном характерах сопротивления вторичной цепи определяют в соответствии с приложением Б с учетом уравнения (Г.15). Характеристики построены для начальных фаз периодической составляющей тока КЗ ϑ, при которых время до насыщения ТТ получается наименьшим.

Универсальные характеристики построены для частного случая наличия в первичном токе апериодической составляющей с постоянной времени затухания T_p в диапазоне от 0,03 до 0,3 с.

Г.4 Расчет $K_{п.р}(t)$ с использованием эквивалентной постоянной времени затухания апериодических составляющих тока короткого замыкания

Г.4.1 В реальных условиях на электростанциях и подстанциях в суммарном токе КЗ содержатся токи, имеющие разные постоянные времени затухания апериодических составляющих. Расчет коэффициента переходного режима $K_{п.р}(t)$ в этом случае часто выполняют с использованием одной эквивалентной постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ.

Г.4.2 Условием эквивалентности $T_{р.экв}$ является тождественность расчетного коэффициента реальному значению в любой момент времени переходного режима. Однако теоретически заменить сумму экспонент одной невозможно. В настоящем стандарте приближенный расчет выполняют по методике, описанной в [3].

Г.4.3 Основным допущением в расчете является пренебрежение сдвигом по фазе между периодическими составляющими токов КЗ в ветвях. При этом условии периодическая составляющая суммарного тока КЗ равна арифметической сумме периодических составляющих токов отдельных ветвей:

$$I_\Sigma = \sum_{i=1}^{n} I_i, \quad (Г.19)$$

где I_Σ — действующее значение суммарной периодической составляющей тока КЗ;

I_i — действующее значение периодической составляющей тока КЗ i-й ветви, $i = 1, 2, \ldots, n$.

Г.4.4 Постоянную времени затухания апериодической составляющей тока в каждой из i-й ветвей, питающих место КЗ, и эквивалентную постоянную времени $T_{р.экв}$ вычисляют согласно 4.2.7.

Г.4.5 Расчет с использованием эквивалентной постоянной времени $T_{р.экв}$ требует меньших затрат времени, чем приведенный ниже расчет по сумме воздействий апериодических составляющих токов КЗ в отдельных ветвях, питающих точку КЗ. Однако в первом случае получают меньшее время до насыщения, чем во втором. По этой причине рекомендуется вначале выполнить расчет времени до насыщения ТТ с использованием эквивалентной постоянной времени. Затем, если полученное время недостаточно для правильного функционирования релейной защиты, следует выполнить расчет по сумме воздействий апериодических составляющих токов в отдельных ветвях.

Г.5 Расчет $K_{п.р}(t)$ по индивидуальному изменению апериодических составляющих тока в ветвях, питающих точку короткого замыкания

Г.5.1 Расчет выполняют в следующей последовательности.

Г.5.2 Выполняют расчет постоянных времени затухания апериодической составляющей тока каждой из *i*-й ветвей, питающих место КЗ.

Сумма апериодических составляющих имеет вид:

$$i_{a.\Sigma} = \sum_{i=1}^{n} I_{a0i} \cdot e^{-\frac{t}{T_{p.i}}}, \qquad (Г.20)$$

где I_{a0i} — начальное значение апериодической составляющей в *i*-й ветви;

$T_{p.i}$ — постоянная времени затухания апериодической составляющей тока в *i*-й ветви.

Г.5.3 Путем преобразований можно получить уравнение для расчета $K_{п.р}(t)$ ТТ с ПХН при активно-индуктивном характере нагрузки и различных начальных фазах периодической составляющей первичного тока:

$$K_{п.р}(t) = \sum_{i=1}^{n} I_{k.i^*} \left\{ \sin\alpha \cdot \cos\vartheta \cdot e^{-\frac{t}{T_{p.i}}} + \cos\alpha \cdot \cos\vartheta \cdot \omega \cdot T_{p.i} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{p.i}}} \right) \right\} - \sin(\omega \cdot t + \alpha + \vartheta) + \cos\alpha + \sin\vartheta, \qquad (Г.21)$$

где $I_{к.i^*} = \frac{I_{к.i}}{I_{к.\Sigma}}$ — доля тока в *i*-й ветви по отношению к суммарному току КЗ $I_{к.\Sigma}$.

Г.5.4 В частном случае активного характера сопротивления вторичной цепи (α = 0) уравнение (Г.21) преобразуют к виду:

$$K_{п.р}(t) = \sum_{i=1}^{n} I_{к.i^*} \left\{ \cos\vartheta \cdot \omega \cdot T_{p.i} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{p.i}}} \right) \right\} - \sin(\omega \cdot t + \vartheta) + \sin\vartheta. \qquad (Г.22)$$

Г.5.5 Если при активном характере сопротивления во вторичной цепи (α = 0) относительное содержание апериодической составляющей в токах ветвей, питающих точку КЗ, максимально и одинаковы начальные фазы периодической составляющей токов в указанных ветвях (ϑ_i = 0), то уравнение (Г.22) преобразуют к виду:

$$K_{п.р}(t) = \sum_{i=1}^{n} I_{к.i^*} \left\{ \omega \cdot T_{p.i} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{p.i}}} \right) \right\} - \sin(\omega \cdot t). \qquad (Г.23)$$

Г.6 Методы решения уравнения переходного процесса в трансформаторах тока

Г.6.1 Возможность насыщения ТТ в установившемся режиме КЗ учитывают с помощью параметра режима *A*, отражающего соотношение между номинальными параметрами ТТ и реальными его параметрами в месте его установки, определяемого как

$$A = \frac{\Psi_{нас}}{\Psi_m} = \frac{B_{нас}}{B_m} = \frac{U_{нас}}{U_{2sin}}, \qquad (Г.24)$$

где ψ_m — потокосцепление вторичной обмотки, созданное установившейся вынужденной периодической составляющей вторичного тока при идеальной трансформации и заданном сопротивлении ветви вторичного тока;

$\Psi_{нас}$ — потокосцепление насыщения вторичной обмотки ТТ, созданное вторичным током ТТ при идеальной трансформации первичного тока и заданном сопротивлении ветви вторичного тока, включая нагрузку;

$B_{нас}$ — магнитная индукция насыщения;

$B_m = \frac{I'_1 \cdot z_2}{\omega \cdot w_2 \cdot S}$ — магнитная индукция, созданная установившейся вынужденной периодической составляющей вторичного тока при идеальной трансформации и заданном сопротивлении ветви вторичного тока;

$U_{нас}$ — напряжение на вторичной обмотке, соответствующее насыщению сердечника;

$U_{2sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot z_{2\Sigma}$ — напряжение, равное ЭДС вторичной обмотки при вторичном номинальном токе $I_{2ном}$, кратности синусоидального тока $K_{факт}$ и суммарном сопротивлении ветви вторичного тока $z_{2\Sigma}$.

Г.6.2 Время до насыщения ТТ (первый момент насыщения) ТТ с ПХН определяют путем решения трансцендентного уравнения переходного процесса в ТТ:

$$A(1 - K_r) = K_{п.р}(t), \qquad (Г.25)$$

где *A* — параметр режима работы ТТ, определяемый по уравнению (Г.24);

$K_{п.р}(t) = \Psi_{п.р} / \Psi_m$ — коэффициент переходного режима;

$K_r = \frac{B_r}{B_{нас}}$ — коэффициент остаточной магнитной индукции, то есть отношение остаточной магнитной индукции B_r к магнитной индукции насыщения $B_{нас}$. Указанный коэффициент можно вычислить также по отношению напряжений или потокосцеплений.

Выражение, стоящее в левой части уравнения (Г.25), показывает, во сколько раз разность потокосцепления насыщения и остаточного потокосцепления больше амплитуды потокосцепления в установившемся режиме при синусоидальном первичном токе, заданном сопротивлении ветви вторичного тока и идеальной трансформации. Выражение, стоящее в правой части уравнения, показывает, во сколько раз потокосцепление (напряжение или магнитная индукция) возрастает при переходном процессе за счет влияния свободных апериодических составляющих. Равенство левой и правой частей уравнения достигается в момент насыщения магнитопровода ТТ.

Г.6.3 Решение уравнения (Г.25) может быть выполнено аналитически, графически или с помощью специализированного программного обеспечения.

Г.6.4 Аналитическое решение уравнения (Г.25) возможно в частных случаях, например, при максимальном содержании апериодической составляющей в первичном токе и активном характере нагрузки ТТ.

Аналитический расчет усложняется при учете возможности возникновения КЗ не в момент перехода периодической составляющей тока КЗ через амплитудное значение. ТТ может насыщаться быстрее при других начальных фазах периодической составляющей первичного тока (см. [3]).

Г.6.5 Графическое решение уравнения (Г.25) с помощью универсальных характеристик, определяемых в соответствии с приложением Б, для ручных расчетов является более приемлемым.

Учет различия начальных значений и постоянных времени затухания апериодических составляющих в токах КЗ в ветвях, питающих точку КЗ, можно производить следующими способами:

1) с использованием в расчете $K_{\text{п.р}}(t)$ эквивалентной постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ $T_{р.\text{экв}}$ (см. [3]);

2) по индивидуальному изменению апериодических составляющих тока в ветвях, питающих точку КЗ [в общем случае по уравнению (Г.21)].

Расчет по индивидуальному изменению апериодических составляющих токов КЗ в отдельных ветвях позволяет получить более точные результаты по сравнению с расчетами, выполненными с использованием эквивалентной постоянной времени. Однако затраты времени на расчет по указанной сумме выше, чем по первому способу.

Г.6.6 Анализ универсальных характеристик, определяемых в соответствии с приложением Б, показывает, что при времени до насыщения около 8 мс оно почти не зависит от значения $T_р$. Поэтому, если время до насыщения с использованием $T_{р.\text{экв}}$ составило менее 8 мс, уточнение этого времени с учетом индивидуального изменения апериодических составляющих токов КЗ в отдельных ветвях нецелесообразно.

Библиография

[1] Правила технологического функционирования электроэнергетических систем (утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 13 августа 2018 г. № 937)

[2] ДИН ЕН 10107—2014 Листы и полосы из электротехнической стали с ориентированной зернистой структурой, поставляемые в полностью обработанном состоянии (Grain-oriented electrical steel strip and sheet delivered in the fully processed state)

[3] МЭК 61869-2:2012 Трансформаторы измерительные. Часть 2. Дополнительные требования к трансформаторам тока (Instrument transformers — Part 2: Additional requirements for current transformers)

УДК 621.311:006.354 ОКС 27.010

Ключевые слова: релейная защита, трансформатор тока для защиты, насыщение, короткое замыкание

БЗ 11—2019/145

Редактор *Н.В. Верховина*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *М.И. Першина*
Компьютерная верстка *Е.О. Асташина*

Сдано в набор 21.11.2019. Подписано в печать 16.01.2020. Формат 60×84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 6,98. Уч.-изд. л. 5,93.
Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru