ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 71879— 2024

Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ С НОРМИРУЕМОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ И С ОГРАНИЧЕННЫМ ОСТАТОЧНЫМ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕМ

Методические указания по определению времени до насыщения при коротких замыканиях

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2025

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Акционерным обществом «Системный оператор Единой энергетической системы» (АО «СО ЕЭС»), Обществом с ограниченной ответственностью «Эльмаш (УЭТМ)» (ООО «Эльмаш (УЭТМ)»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 016 «Электроэнергетика»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2024 г. № 1928-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 (www. rst.gov.ru)

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2025

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
4 Общие положения 2
5 Определение времени до насыщения трансформаторов тока 4
Приложение А (обязательное) Требования к математическим моделям сети, созданным в специализированных программных комплексах, предназначенных для расчета электромагнитных переходных процессов для определения эквивалентной постоянной времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания 8
Приложение Б (справочное) Примеры выполнения расчетов времени до насыщения трансформаторов тока 10
Приложение В (справочное) Краткие сведения о работе трансформаторов тока в переходных режимах короткого замыкания 18
Библиография 25

Введение

Положения настоящего стандарта направлены на обеспечение выполнения требований правил [1] (пункт 128), в соответствии с которыми технические характеристики трансформаторов тока (ТТ) 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 формирования требований к минимально необходимому времени достоверного измерения значения тока, при котором обеспечивается правильная работа функций релейной защиты (РЗ), реализованных в устройстве релейной защиты и автоматики (РЗА), в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ, при создании (модернизации) комплексов и устройств релейной защиты;
- для проверки правильности функционирования устройств релейной защиты в переходных режимах при коротких замыканиях.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНДУКТИВНЫЕ ДЛЯ ЗАЩИТЫ С НОРМИРУЕМОЙ ПОГРЕШНОСТЬЮ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ И С ОГРАНИЧЕННЫМ ОСТАТОЧНЫМ ПОТОКОСЦЕПЛЕНИЕМ

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 normalized error in transient states and with limited residual flux-linkage. Guidelines for timing to saturation during short-circuits

Дата введения — 2025—02—01

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт устанавливает методы расчета времени до насыщения измерительных индуктивных трансформаторов тока для защиты[1)] с нормируемой погрешностью в переходных режимах и с ограниченным остаточным потокосцеплением (классы точности 5PR, 10PR, TPY, TPZ, TPE[2)]) при коротких замыканиях, 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 (модернизацию) комплексов и 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 26522 Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения

ГОСТ Р 58669 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

ГОСТ Р 70507.1 Трансформаторы измерительные. Часть 1. Общие технические условия

ГОСТ Р 70507.2 Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока

[1)] Требования распространяются и на ТТ «для измерения и защиты».

[2)] При использовании в качестве первичного датчика индуктивного ТТ.

Издание официальное

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.

3 Термины, определения и сокращения

3.1 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 18685, ГОСТ 26522, ГОСТ Р 58669, ГОСТ Р 70507.1, ГОСТ Р 70507.2.

3.2 Сокращения

В настоящем стандарте использованы следующие сокращения:

АПВ — автоматическое повторное включение;

ВАХ — вольтамперная характеристика трансформатора тока;

КЗ — короткое замыкание;

ЛЭП — линия электропередачи;

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 (модернизацию) комплексов и устройств релейной защиты, следует использовать один или несколько из следующих методов расчета времени до насыщения измерительных индуктивных ТТ для защиты классов точности 5PR, 10PR, TPY, TPZ, TPE при КЗ (далее — время до насыщения ТТ, $t_{нас}$):

- аналитический метод;
- графический метод по паспортным данным;
- графический метод с использованием ВАХ 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 схемно-режимные условия и расчетную точку КЗ, выполнить подготовительные расчеты.

4.2.1 К исходным данным для расчетов относятся[1)]:

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

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

R_2 — активное сопротивление вторичной обмотки ТТ;

L_2 — индуктивность рассеяния 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;

$T_{S.ном}$ — номинальная постоянная времени вторичного контура;

K_r — коэффициент остаточной намагниченности;

[1)] В соответствии с ГОСТ Р 70507.2 указанные параметры приводятся изготовителем в эксплуатационной документации на ТТ.

$K_{п.р.ном}$ — номинальный коэффициент переходного режима (только для ТТ класса точности TPY, TPZ, TPE), для ТТ классов точности 5PR, 10PR значение $K_{п.р.ном}$ необходимо принять равным единице;

$\cos \varphi_{н.ном}$ — коэффициент мощности номинальной вторичной нагрузки.

Значения активных сопротивлений необходимо привести к нормальной температуре в соответствии с ГОСТ 15150.

4.2.2 Схемно-режимные условия и расчетную точку КЗ необходимо выбирать таким образом, чтобы через проверяемый ТТ при КЗ проходил наибольший ток $I_{кз}$, при этом необходимо рассматривать внешние и внутренние КЗ.

4.2.3 Для определения значения $t_{нас}$ необходимо произвести расчеты при трехфазных КЗ, а для сетей с глухозаземленной нейтралью и при однофазных КЗ.

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

4.2.5 Расчет нагрузок во вторичных цепях ТТ, используемых в схемах устройств релейной защиты, должен осуществляться с использованием расчетных формул в соответствии с ГОСТ Р 58669[1)].

4.2.6 Эквивалентную постоянную времени $T_{а.экв}$ необходимо рассчитывать с использованием специализированных программных комплексов и созданных в них математических моделей сети, предназначенных для расчета электромагнитных переходных процессов. Требования к математическим моделям сети приведены в приложении А.

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

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

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

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

$T_{а.i}$ — 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, $T_{а.i}$ необходимо рассчитывать:

- для трехфазного КЗ по формуле

$$T_{а.i}^{(3)} = \frac{X_{1i}}{\omega \cdot R_{1i}}, \quad (2)$$

где X_{1i} — эквивалентное индуктивное сопротивление прямой последовательности i-й ветви относительно точки КЗ;

ω — угловая частота;

R_{1i} — эквивалентное активное сопротивление прямой последовательности i-й ветви относительно точки КЗ.

- для однофазного КЗ по формуле

$$T_{а.i}^{(1)} = \frac{X_{1i} + X_{2i} + X_{0i}}{\omega \cdot (R_{1i} + R_{2i} + R_{0i})}, \quad (3)$$

где X_{2i} — эквивалентное индуктивное сопротивление обратной последовательности i-й ветви относительно точки КЗ;

X_{0i} — эквивалентное индуктивное сопротивление нулевой последовательности i-й ветви относительно точки КЗ;

[1)] При этом при последовательном соединении двух идентичных вторичных обмоток ТТ значение рассчитанной нагрузки на вторичную обмотку каждого ТТ необходимо уменьшить в два раза, при параллельном соединении — увеличить в два раза.

R_{2i} — эквивалентное активное сопротивление обратной последовательности i-й ветви относительно точки КЗ;

R_{0i} — эквивалентное активное сопротивление нулевой последовательности i-й ветви относительно точки КЗ.

5 Определение времени до насыщения трансформаторов тока

5.1 Определение времени до насыщения ТТ аналитическим методом

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

5.1.2 При расчете времени до насыщения ТТ аналитическим методом:

а) необходимо определить параметр режима А в соответствии с 5.1.3;

б) необходимо определить фактическую постоянную времени вторичного контура T_S в соответствии с 5.1.4;

в) время до насыщения ТТ необходимо определять в соответствии с 5.1.5 при возникновении первого КЗ и в соответствии с 5.1.6 при возникновении второго КЗ (при неуспешном АПВ).

5.1.3 Параметр режима A необходимо вычислять по формуле

$$A = \frac{I_{1ном} \cdot K_{ном} \cdot K_{п.р.ном} \cdot \sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном} \cdot \cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_2 + z_{н.ном} \cdot \sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ} \cdot \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_2 + X_{н.факт}\right)^2}}, \quad (4)$$

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

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

5.1.4 Фактическую постоянную времени вторичного контура T_S необходимо определять по формуле

$$T_S = T_{S.ном} \frac{R_2 + z_{н.ном} \cdot \cos\varphi_{н.ном}}{R_2 + R_{н.факт}}. \quad (5)$$

5.1.5 Время до насыщения ТТ при возникновении первого КЗ необходимо рассчитывать по формуле

$$t'_{нас} = T \cdot \ln\frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T - A \cdot (1 - K_r) + 1}, \quad (6)$$

где значение T необходимо принимать равным наименьшему из величин $T_{а.экв}$ и T_S.

K_r необходимо принять равным значению, указанному в паспорте на ТТ. При отсутствии таких данных определить в соответствии с ГОСТ Р 70507.2 или принять равным 0,1[1)].

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

$$\omega \cdot T + 1 > A \cdot (1 - K_r), \quad (7)$$

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

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 графические методы по паспортным данным в соответствии с 5.2 или с использованием ВАХ ТТ в соответствии с 5.3.

[1)] Только для ТТ класса точности 5PR, 10PR, TPY, TPZ.

5.1.6 Время до насыщения ТТ при возникновении второго КЗ (при неуспешном АПВ) необходимо рассчитывать по формуле[1)]

$$t''_{\text{нас}} = T \cdot \ln \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T + A \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{T_S}} - A \cdot (1 - K_r) + 1}, \tag{9}$$

где значение T необходимо принимать равным наименьшему из величин $T_{\text{а.экв}}$ и T_S;

$t_{\text{кз1}}$ — время отключения первого КЗ (полное время ликвидации КЗ);

$t_2 = t_{\text{кз1}} + t_{\text{б.п.}}$ — время возникновения второго КЗ.

Расчет по формуле (9) допустим при соблюдении условий (10) и (11):

$$\omega \cdot T + 1 > A \cdot (1 - K_r) - A \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{T_S}}, \tag{10}$$

$$A \cdot (1 - K_r) - A \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{T_S}} > 1. \tag{11}$$

Невыполнение условия (10) означает, что насыщение магнитопровода отсутствует и время до насыщения ТТ равно бесконечности.

В случае, если условие (11) не выполняется, значение $t_{\text{нас}}$, вычисленное по формуле (9), принимает отрицательное значение, и для определения времени до насыщения ТТ следует использовать графический метод по паспортным данным в соответствии с 5.2 или с использованием ВАХ ТТ в соответствии с 5.3.

5.1.7 Если значение $t_{\text{нас}}$, полученное по результатам вычислений по аналитическому методу, составило менее 15 мс, следует использовать графические методы по паспортным данным в соответствии с 5.2 или с использованием ВАХ ТТ в соответствии с 5.3.

5.2 Определение времени до насыщения ТТ 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 необходимо построить временные диаграммы $K_{\text{п.р.}}(t)$:

а) для определения времени до насыщения ТТ при возникновении первого КЗ по формуле

$$K'_{\text{п.р.}}(t) = \frac{\omega \cdot T_{\text{а.экв}} \cdot T_S}{T_{\text{а.экв}} - T_S} \left(e^{-\frac{t}{T_{\text{а.экв}}}} - e^{-\frac{t}{T_S}} \right) \cdot \cos\varphi_{\text{КЗ}} + \sin(\varphi_{\text{КЗ}}) \cdot e^{-\frac{t}{T_S}} - \sin(\omega t + \varphi_{\text{КЗ}}),\ t \in [0, t_{\text{кз1}}], \tag{12}$$

где $\varphi_{\text{КЗ}} \in [0,90°]$ — начальная фаза периодической составляющей тока КЗ. Значение $\varphi_{\text{КЗ}}$ необходимо принимать таким, при котором определенное в соответствии с 5.2.3 время до насыщения ТТ будет минимальным;

$t_{\text{кз1}}$ — время отключения первого КЗ (полное время ликвидации КЗ);

б) для определения времени до насыщения ТТ при возникновении второго КЗ (при неуспешном АПВ) по формуле[2)]

[1)] Формула (9) учитывает насыщение ТТ при первом КЗ, что приводит к занижению результата расчета при отсутствии насыщения ТТ при первом КЗ. Для уточнения расчетов (при необходимости) следует использовать графические методы по паспортным данным в соответствии с 5.2 или с использованием ВАХ ТТ в соответствии с 5.3.

[2)] Определение времени до насыщения ТТ при возникновении второго КЗ необходимо осуществлять относительно времени возникновения второго КЗ (t_2).

$$K''_{\text{п.р.}}(t) = K_{\text{п.р.}}(t_2) + \frac{\omega \cdot T_{\text{а.экв}} T_S}{T_{\text{а.экв}} - T_S}\left(e^{-\frac{t-t_2}{T_{\text{а.экв}}}} - e^{-\frac{t-t_2}{T_s}}\right)\cdot\cos\varphi_{\text{КЗ}} + \sin(\varphi_{\text{КЗ}})\cdot e^{-\frac{t-t_2}{T_S}} - \sin\left(\omega(t-t_2)+\varphi_{\text{КЗ}}\right), \quad t \in [t_2, t_2 + t_{\text{кз2}}], \tag{13}$$

где $K_{\text{п.р.}}(t_2)$ — значение коэффициента переходного режима в момент возникновения второго КЗ, которое необходимо определять по формуле

$$K_{\text{п.р.}}(t_2) = K_{\text{п.р.max}}(t_{\text{кз1}})\cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{T_S}}, \tag{14}$$

где $t_2 = t_{\text{кз1}} + t_{\text{б.п.}}$ — время возникновения второго КЗ;

$K_{\text{п.р.max}}(t_{\text{кз1}}) = \max\{K_{\text{п.р.}}(t),\ t \in [0, t_{\text{кз1}}]\}$ — максимальное значение коэффициента переходного режима за период времени $t \in [0, t_{\text{кз1}}]$. Если $K_{\text{п.р.max}}(t_{\text{кз1}}) > A$, то значение $K_{\text{п.р.max}}(t_{\text{кз1}})$ необходимо принять равным A, определенным в соответствии с 5.1.3;

$\varphi_{\text{КЗ}} \in [0,90°]$ — начальная фаза периодической составляющей тока КЗ. Значение $\varphi_{\text{кз}}$ необходимо принимать таким, при котором определенное в соответствии с 5.2.3 время до насыщения ТТ будет минимальным;

$t_{\text{кз2}}$ — время отключения второго КЗ (полное время ликвидации КЗ).

5.2.3 Для определения времени до насыщения ТТ на оси $K_{\text{п.р.}}(t)$ временных диаграмм, построенных в соответствии с перечислениями а) и б) 5.2.2, необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, и определить соответствующие им значения ($t'_{\text{нас}}$, $t''_{\text{нас1}}$):

$$K_{\text{п.р}}(t_{\text{нас}}) = A(1 - K_r), \tag{15}$$

где K_r необходимо принимать равным значению, указанному в 5.1.5.

5.3 Определение времени до насыщения ТТ графическим методом с использованием ВАХ

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 или 0,05 от тока номинальной предельной кратности.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$K_{факт} = \frac{I_{КЗ}}{I_{1ном}}, \quad (18)$$

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

5.3.3 Параметр режима A необходимо вычислять по формуле

$$A = \frac{U_{\varepsilon}}{U_{2sin}}, \quad (19)$$

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 контура вторичного тока $z_{2\Sigma}$.

Напряжение U_{2sin} необходимо вычислять по формуле

$$U_{2sin} = K_{факт} \cdot I_{2ном} \cdot \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_2 + X_{н.факт}\right)^2}, \quad (20)$$

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

5.3.4 При применении графического метода с использованием ВАХ ТТ необходимо построить временные диаграммы $K_{п.р.}(t)$:

а) для определения времени до насыщения ТТ при возникновении первого КЗ по формуле (12);

б) для определения времени до насыщения ТТ при возникновении второго КЗ (при неуспешном АПВ) по формуле (13).

Для определения времени до насыщения ТТ на оси $K_{п.р.}$ временных диаграмм, построенных в соответствии с перечислениями а) и б) 5.3.4, необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, и определить соответствующие им значения $t_{нас}$ по формуле (15).

5.4 Примеры выполнения расчетов времени до насыщения ТТ приведены в приложении Б. Краткие сведения о работе ТТ в переходных режимах КЗ приведены в приложении В.

Приложение А
(обязательное)

Требования к математическим моделям сети, созданным в специализированных программных комплексах, предназначенных для расчета электромагнитных переходных процессов для определения эквивалентной постоянной времени затухания апериодической составляющей тока короткого замыкания

А.1 Математические модели сети, используемые для расчета электромагнитного переходного процесса при КЗ и определения величины Та (далее — модели сети), должны формироваться индивидуально для каждого из рассматриваемых объектов электроэнергетики.

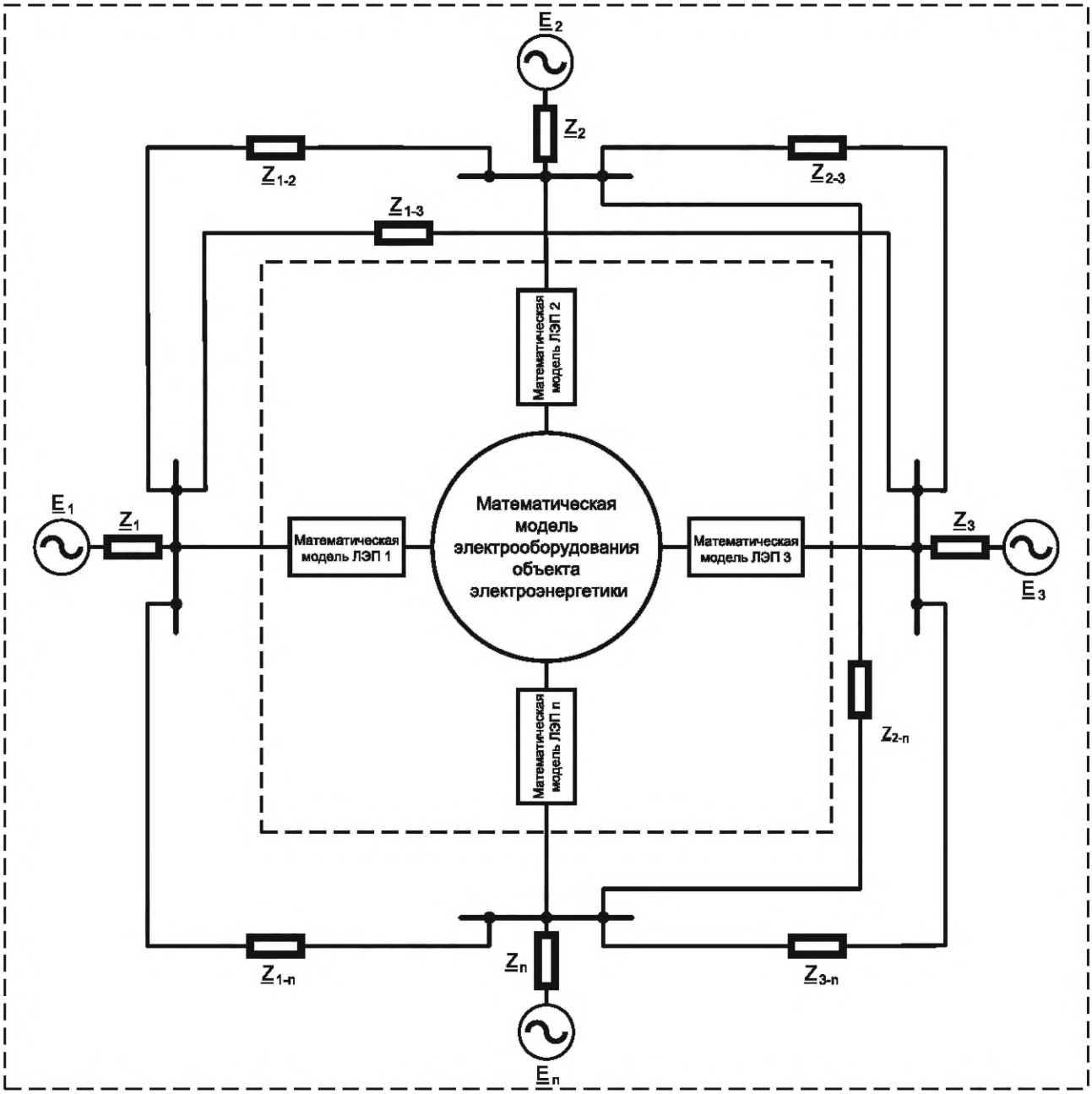
А.2 Модель сети для каждого объекта электроэнергетики должна включать в себя:

1) подробную математическую модель рассматриваемого объекта электроэнергетики и отходящих от него ЛЭП. Учитывая, что параметры моделируемых элементов электрической сети, как правило, являются определяющими для величины Та, должна быть обеспечена максимально возможная детализация математической модели;

2) эквивалент энергосистемы, приведенный к шинам объектов электроэнергетики, технологически связанных с рассматриваемым объектом, рассчитанный для максимального режима энергосистемы.

А.3 При формировании модели сети в качестве исходных данных следует принимать паспортные данные оборудования рассматриваемого объекта электроэнергетики и отходящих от него ЛЭП.

А.4 Обобщенное представление модели сети приведено на рисунке А.1.



E1, E2, E3,…En — эквивалентные ЭДС, входящие в состав эквивалента энергосистемы;

Z1, Z2, Z3,…Zn, Z1-2, Z1-3, Z2-3,…, Z1-n, Z2-n, Z3-n — эквивалентные сопротивления, входящие в состав эквивалента энергосистемы

Рисунок А.1 — Обобщенное представление модели сети

Приложение Б
(справочное)

Примеры выполнения расчетов времени до насыщения трансформаторов тока

Б.1 Пример расчета времени до насыщения ТТ типа ТРГ-УЭТМ®-500-10PR-2000/1 аналитическим методом

Б.1.1 Исходные данные:

- параметры ТТ: класс точности 10PR; $I_{1ном}$ = 2000 А; $I_{2ном}$ = 1 А; R_2 = 6,96 Ом; L_2 = 1,82 мГн; $z_{н.ном}$ = 20 Ом; ε = 10 %; $K_{ном}$ = 40; cos $\varphi_{н.ном}$ = 0,8; $T_{S.ном}$ = 0,507 с; K_r = 8,5 %;
- $I_{КЗ}^{(3)} = 23145\,А;\ \ I_{КЗ}^{(1)} = 26900\,А;$
- $T_{а.экв}^{(3)} = 0{,}128\,с;\ \ T_{а.экв}^{(1)} = 0{,}180\ с;$
- $R_{н.факт}^{(3)} = 6{,}3\ Ом;\ \ R_{н.факт}^{(1)} = 12{,}6\ Ом;$ $X_{н.факт}$ = 0;
- $t_{кз1}$ = 0,1 *с*; t_2 = 1,1 *с*; $t_{кз2}$ = 0,1 *с*.

Б.1.2 Определение параметра режима *А* для трехфазного и однофазного КЗ в соответствии с формулой (4):

- для трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{I_{1ном} \cdot K_{ном} \cdot K_{п.р.ном} \cdot \sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном} \cdot \cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_2 + z_{н.ном} \cdot \sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(3)} \cdot \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_2 + X_{н.факт}\right)^2}} =$$

$$= \frac{2000 \cdot 40 \cdot 1 \cdot \sqrt{\left(6{,}96 + 20 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(314 \cdot 0{,}00182 + 20 \cdot 0{,}6\right)^2}}{23145 \cdot \sqrt{\left(6{,}96 + 6{,}3\right)^2 + \left(314 \cdot 0{,}00182\right)^2}} = 6{,}82;$$

- для однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{I_{1ном} \cdot K_{ном} \cdot K_{п.р.ном} \cdot \sqrt{\left(R_2 + z_{н.ном} \cdot \cos\varphi_{н.ном}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_2 + z_{н.ном} \cdot \sin\varphi_{н.ном}\right)^2}}{I_{КЗ}^{(1)} \cdot \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}\right)^2 + \left(\omega \cdot L_2 + X_{н.факт}\right)^2}} =$$

$$= \frac{2000 \cdot 40 \cdot 1 \cdot \sqrt{\left(6{,}96 + 20 \cdot 0{,}8\right)^2 + \left(314 \cdot 0{,}00182 + 20 \cdot 0{,}6\right)^2}}{26900 \cdot \sqrt{\left(6{,}96 + 1{,}6\right)^2 + \left(314 \cdot 0{,}00182\right)^2}} = 3{,}97.$$

Б.1.3 Определение фактической постоянной времени вторичного контура в соответствии с формулой (5):

- для трехфазного КЗ:

$$T_S^{(3)} = T_{S.ном} \frac{R_2 + z_{н.ном} \cdot \cos\varphi_{н.ном}}{R_2 + R_{н.факт}} = 0{,}507 \cdot \frac{6{,}96 + 20 \cdot 0{,}8}{6{,}96 + 6{,}3} = 0{,}878\ с;$$

- для однофазного КЗ:

$$T_S^{(1)} = T_{S.ном} \frac{R_2 + z_{н.ном} \cdot \cos\varphi_{н.ном}}{R_2 + R_{н.факт}} = 0{,}507 \cdot \frac{6{,}96 + 20 \cdot 0{,}8}{6{,}96 + 12{,}6} = 0{,}595\ с.$$

Б.1.4 Определение времени до насыщения ТТ при возникновении первого КЗ.

Б.1.4.1 Выполнение проверки по условиям (7), (8) для трехфазного КЗ:

- по условию (7):

$\omega \cdot T_{а.экв}^{(3)} + 1 > A^{(3)} \cdot \left(1 - K_r\right);\ 314 \cdot 0{,}128 + 1 = 41{,}192 > 6{,}82 \cdot \left(1 - 0{,}085\right) = 6{,}24$ — неравенство выполняется;

- по условию (8):

$A^{(3)} \cdot (1 - K_r) > 1$; $6,82 \cdot (1 - 0,085) = 6,24 > 1$ — неравенство выполняется.

Б.1.4.2 Выполнение проверки по условиям (7), (8) для однофазного КЗ:

- по условию (7):

$\omega \cdot T^{(1)}_{\text{а.экв}} + 1 > A^{(1)} \cdot (1 - K_r)$; $314 \cdot 0,18 + 1 = 57,52 > 3,97 \cdot (1 - 0,085) = 3,64$ — неравенство выполняется;

- по условию (8):

$A^{(1)} \cdot (1 - K_r) > 1$; $3,97 \cdot (1 - 0,085) = 3,64 > 1$ — неравенство выполняется.

Б.1.4.3 Определение времени до насыщения ТТ при первом трехфазном КЗ в соответствии с формулой (6):

$$t''^{(3)}_{\text{нас}} = T \cdot \ln \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T - A^{(3)} \cdot (1 - K_r) + 1} = 0,128 \cdot \ln \frac{314 \cdot 0,128}{314 \cdot 0,128 - 6,82 \cdot (1 - 0,085) + 1} = 17,87 \text{ мс.}$$

Б.1.4.4 Определение времени до насыщения ТТ при первом однофазном КЗ в соответствии с формулой (6):

$$t''^{(1)}_{\text{нас}} = T \cdot \ln \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T - A^{(1)} \cdot (1 - K_r) + 1} = 0,18 \cdot \ln \frac{314 \cdot 0,18}{314 \cdot 0,18 - 3,97 \cdot (1 - 0,085) + 1} = 8,61 \text{ мс.}$$

Б.1.5 Определение времени до насыщения ТТ при возникновении второго КЗ (при неуспешном АПВ).

Б.1.5.1 Выполнение проверки по условиям (10), (11) для трехфазного КЗ:

- по условию (10):

$$\omega \cdot T^{(3)}_{\text{а.экв}} + 1 > A^{(3)} (1 - K_r) - A^{(3)} \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{Ts}};$$

$$314 \cdot 0,128 + 1 = 41,192 > 6,82 \cdot (1 - 0,085) - 6,82 \cdot e^{-\frac{1,1 - 0,1}{0,878}} = 4,05$$ — неравенство выполняется;

- по условию (11):

$$A^{(3)} (1 - K_r) - A^{(3)} \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{Ts}} > 1;\ 6,82 \cdot (1 - 0,085) - 6,82 \cdot e^{-\frac{1,1 - 0,1}{0,878}} = 4,05 > 1$$ — неравенство выполняется.

Б.1.5.2 Выполнение проверки по условиям (9), (10) для однофазного КЗ:

- по условию (10):

$$\omega \cdot T^{(1)}_{\text{а.экв}} + 1 > A^{(1)} (1 - K_r) - A^{(1)} \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{Ts}};\ 314 \cdot 0,18 + 1 = 57,52 > 3,97 \cdot (1 - 0,085) - 3,97 \cdot e^{-\frac{1,1 - 0,1}{0,595}} = 2,90$$ — неравенство выполняется;

- по условию (11):

$$A^{(1)} \cdot (1 - K_r) - A^{(1)} \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{Ts}} > 1;\ 3,97 \cdot (1 - 0,085) - 3,97 \cdot e^{-\frac{1,1 - 0,1}{0,595}} = 2,90 > 1$$ — неравенство выполняется.

Б.1.5.3 Определение времени до насыщения ТТ при втором трехфазном КЗ в соответствии с формулой (9):

$$t''^{(3)}_{\text{нас}} = T \cdot \ln \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T + A^{(3)} \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{Ts}} - A^{(3)} \cdot (1 - K_r) + 1} =$$

$$= 0,128 \cdot \ln \frac{314 \cdot 0,128}{314 \cdot 0,128 + 6,82 \cdot e^{-\frac{1,1 - 0,1}{0,878}} - 6,82 \cdot (1 - 0,085) + 1} = 10,12 \text{ мс.}$$

Б.1.5.4 Определение времени до насыщения ТТ при втором однофазном КЗ в соответствии с формулой (9):

$$t''^{(1)}_{\text{нас}} = T \cdot \ln \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T + A^{(1)} \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{Ts}} - A^{(1)} \cdot (1 - K_r) + 1} = 0,18 \cdot \ln \frac{314 \cdot 0,18}{314 \cdot 0,18 + 3,97 \cdot e^{-\frac{1,1 - 0,1}{0,595}} - 3,97 \cdot (1 - 0,085) + 1} = 6,15 \text{ мс.}$$

Так как полученное время до насыщения ТТ меньше 15 мс, согласно 5.1.7 следует использовать графические методы по паспортным данным в соответствии с 5.2 или с использованием ВАХ ТТ согласно 5.3.

Б.2 Пример расчета времени до насыщения ТТ типа ТРГ-УЭТМ®-500-10PR-2000/1 графическим методом по паспортным данным

Б.2.1 Исходные данные аналогичны данным, приведенным в Б.1.1.

Б.2.2 Для определения времени до насыщения ТТ при возникновении первого КЗ необходимо построить временные диаграммы $K_{п.р.}(t)$ в соответствии с формулой (12) при $\varphi_{КЗ} \in [0,90°]$.

Значение $\varphi_{КЗ}$ принято равным 10° при трехфазном КЗ и 30° при однофазном КЗ, т. к., при таких значениях определяемое в соответствии с 5.2.3 время до насыщения ТТ будет минимальным, см. рисунок Б.1.

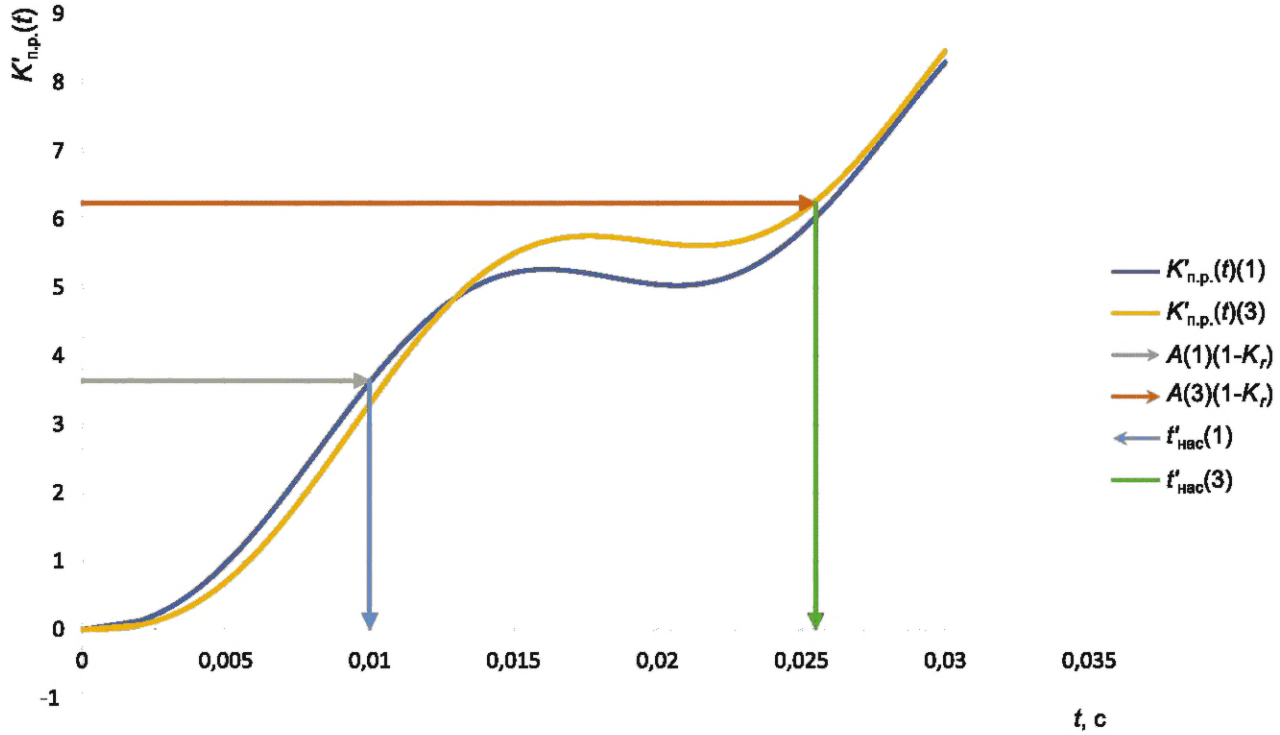


Рисунок Б.1 — Определение времени до насыщения ТТ при первом КЗ

Для определения времени до насыщения ТТ на оси $K'_{п.р.}$ необходимо отложить значения $A(1 – K_r)$, рассчитанные в Б.1.4, и определить соответствующие им значения $t'_{нас}$:

$$K'_{п.р.}(t_{нас}) = A(1 – K_r),$$

- для трехфазного КЗ минимальное время до насыщения ТТ при $\varphi_{КЗ} = 10°$:

$$t'^{(3)}_{нас} = 25{,}5 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ минимальное время до насыщения ТТ при $\varphi_{КЗ} = 30°$:

$$t'^{(1)}_{нас} = 10 \text{ мс}.$$

Б.2.3 Для определения времени до насыщения ТТ при возникновении второго КЗ (при неуспешном АПВ) необходимо построить временные диаграммы $K_{п.р.}(t)$ по формуле (13) при $\varphi_{КЗ} \in [0,90°]$. Значение $\varphi_{КЗ}$ принято равным 30° при трехфазном КЗ и 40° при однофазном КЗ, т. к., при таких значениях определяемое в соответствии с 5.2.3 время до насыщения ТТ будет минимальным, см. рисунок Б.2.

Значение коэффициента переходного режима в момент возникновения второго КЗ, которое необходимо определять по формуле (14):

- для трехфазного КЗ:

$$K_{п.р.}(t_2) = K_{п.р.max}(t_{кз1}) \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{кз1}}{T_S}} = 6{,}82 \cdot e^{-\frac{1{,}1 - 0{,}1}{0{,}878}} = 2{,}182,$$

где $K_{п.р.max}(t_{кз1}) = A^{(3)}$, т. к. $K_{п.р.max}(t_{кз1}) = 20{,}70 > A^{(3)} = 6{,}82$;

- для однофазного КЗ:

$$K_{\text{п.р.}}(t_2) = K_{\text{п.р.max}}(t_{\text{кз1}}) \cdot e^{-\frac{t_2 - t_{\text{кз1}}}{Ts}} = 3{,}97 \cdot e^{-\frac{1{,}1-0{,}1}{0{,}595}} = 0{,}741,$$

где $K_{\text{п.р.max}}(t_{\text{кз1}}) = A^{(1)}$, т. к. $K_{\text{п.р.max}}(t_{\text{кз1}}) = 19{,}72 > A^{(1)} = 3{,}97$.

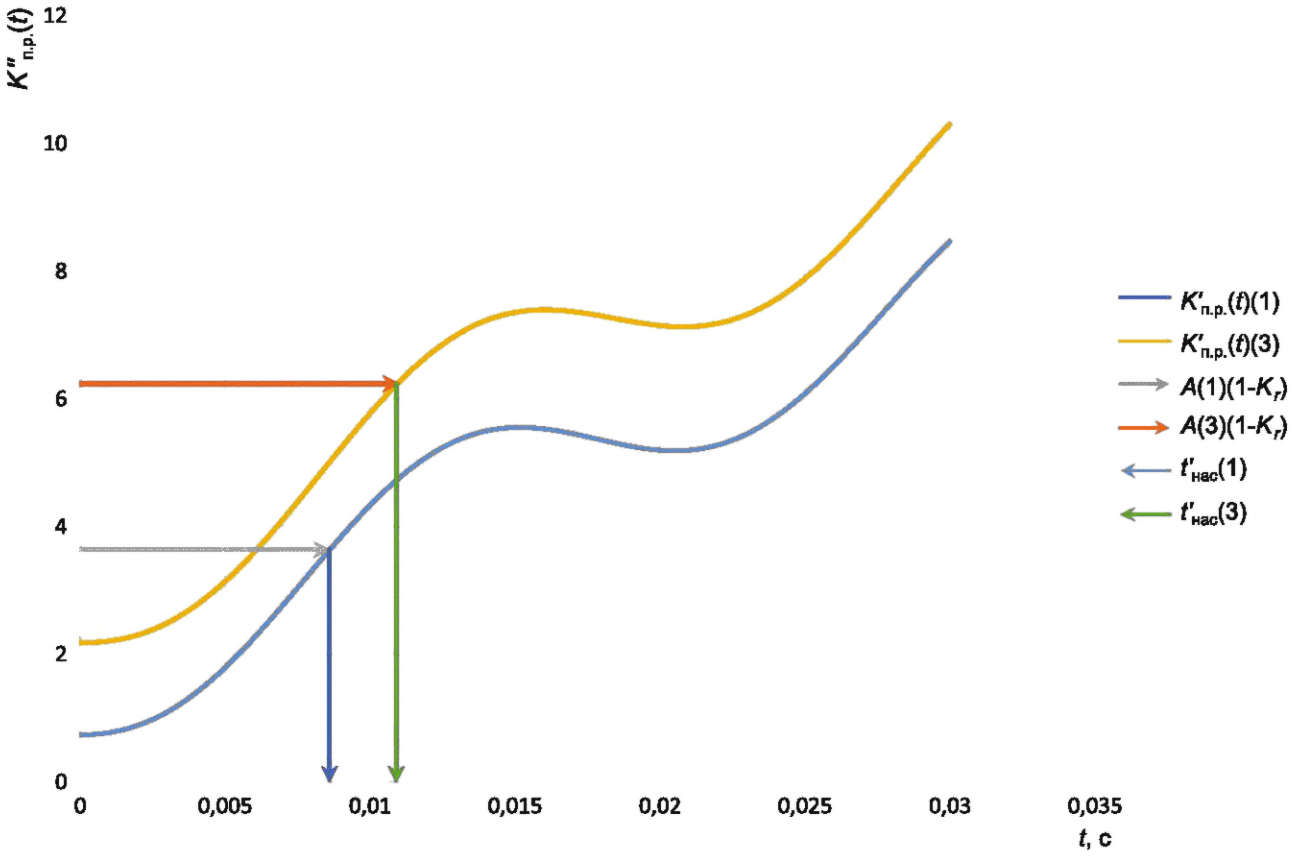


Рисунок Б.2 — Определение времени до насыщения ТТ при втором КЗ

Для определения времени до насыщения ТТ на оси $K''_{\text{п.р.}}$ необходимо отложить значения $A(1 - K_r)$, рассчитанные в Б.1.4, и определить соответствующие им значения $t''_{\text{нас}}$:

$$K''_{\text{п.р.}}(t_{\text{нас}}) = A \cdot (1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ минимальное время до насыщения ТТ при $\varphi_{\text{КЗ}} = 30°$:

$$t''^{(3)}_{\text{нас}} = 10{,}9 \text{ мс};$$

- для однофазного КЗ минимальное время до насыщения ТТ при $\varphi_{\text{КЗ}} = 40°$:

$$t''^{(1)}_{\text{нас}} = 8{,}6 \text{ мс}.$$

Б.3 Пример расчета времени до насыщения ТТ типа ТРГ-УЭТМ®-500-10PR-2000/1 графическим методом с использованием ВАХ

Б.3.1 Исходные данные аналогичны данным, приведенным в Б.1.1. ВАХ ТТ приведена на рисунке Б.3.

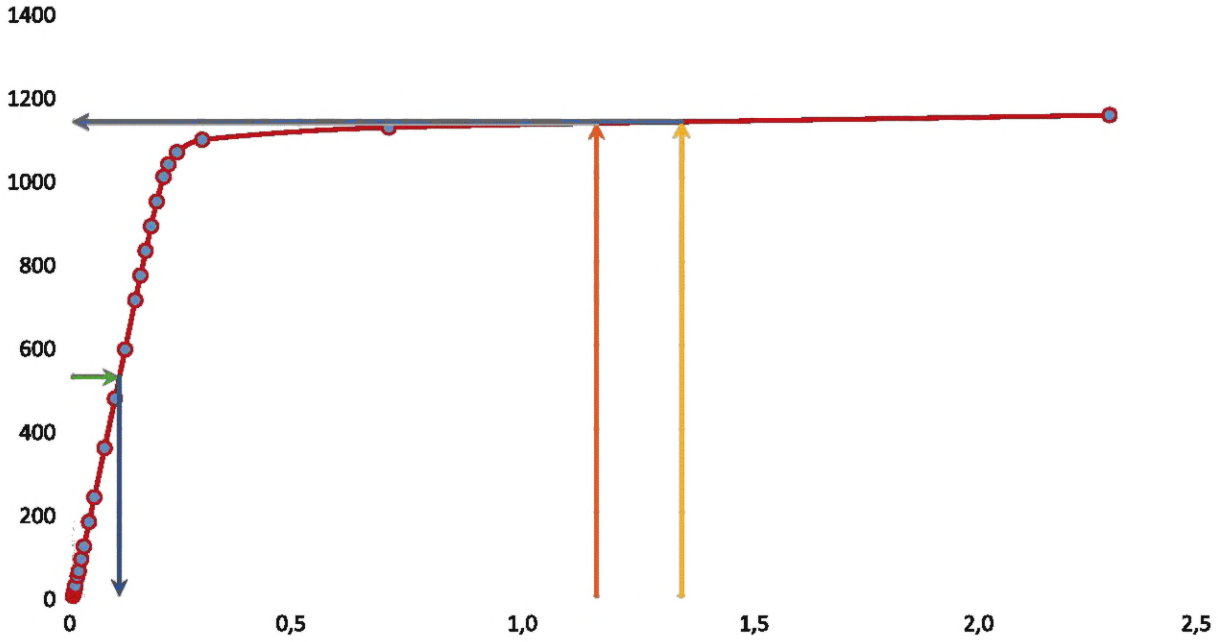


Рисунок Б.3 — Определение параметра режима А по ВАХ ТТ

Б.3.2 Выполнение проверки допустимости использования метода.

Определение фактической кратности тока КЗ в соответствии с формулой (18):

- 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, в соответствии с формулой (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 Б.3) необходимо определить значения напряжений, соответствующие рассчитанным значениям $I_{0{,}10}^{(3)}$ и $I_{0{,}10}^{(1)}$:

$$U_{10}^{(3)} = 1132 \text{ В};$$

$$U_{10}^{(1)} = 1136 \text{ В}.$$

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

$$U_{\text{лин}} = 524 \text{ В};$$

$$I_{лин} = 0{,}103А.$$

Проверка выполнения условия (16):

- для трехфазного КЗ:

$$\frac{I_{0,10}^{(3)} / U_{10}^{(3)}}{I_{лин} / U_{лин}} = \frac{1{,}157 / 1132}{0{,}103 / 524} = 5{,}200 > 3$$

- условие выполняется;
- для однофазного КЗ:

$$\frac{I_{0,10}^{(1)} / U_{10}^{(1)}}{I_{лин} / U_{лин}} = \frac{1{,}345 / 1136}{0{,}103 / 524} = 6{,}023 > 3$$

- условие выполняется.

Б.3.3 Определение параметра режима A для трехфазного и однофазного КЗ в соответствии с формулой (19):

- для трехфазного КЗ:

$$A^{(3)} = \frac{U_{\varepsilon}^{(3)}}{U_{2sin}^{(3)}} = \frac{1132}{153{,}56} = 7{,}37,$$

где $U_{2sin}^{(3)} = K_{факт}^{(3)} \cdot I_{2ном} \cdot \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}^{(3)}\right)^2 + \left(X_2 + X_{н.факт}\right)^2} = 11{,}57 \cdot 1{,}0 \cdot \sqrt{(6{,}96 + 6{,}3)^2 + (0{,}57)^2} = 153{,}56$ В;

- для однофазного КЗ:

$$A^{(1)} = \frac{U_{\varepsilon}^{(1)}}{U_{2sin}^{(1)}} = \frac{1136}{263{,}08} = 4{,}32,$$

где $U_{2sin}^{(1)} = K_{факт}^{(1)} \cdot I_{2ном} \cdot \sqrt{\left(R_2 + R_{н.факт}^{(1)}\right)^2 + \left(X_2 + X_{н.факт}\right)^2} = 13{,}45 \cdot 1{,}0 \cdot \sqrt{(6{,}96 + 12{,}6)^2 + (0{,}57)^2} = 263{,}19$ В.

Б.3.4 Для определения времени до насыщения при возникновении первого КЗ ТТ на оси $K'_{п.р.}$ временных диаграмм $K'_{п.р.}(t)$, построенных в соответствии с Б.2.2 при $\varphi_{КЗ} \in [0{,}90°]$ (значение $\varphi_{КЗ}$ принято равным 10° при трехфазном КЗ и 30° при однофазном КЗ, т. к., при таких значениях определяемое в соответствии с 5.2.3 время до насыщения ТТ будет минимальным, см. рисунок Б.4), необходимо отложить значения $A \cdot (1 - K_r)$, и определить соответствующие им значения $t'_{нас}$:

$$K'_{п.р.}(t_{нас}) = A \cdot (1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ минимальное время до насыщения ТТ при $\varphi_{КЗ} = 10°$: $t'^{(3)}_{нас} = 26{,}7$ мс;
- для однофазного КЗ минимальное время до насыщения ТТ при $\varphi_{КЗ} = 30°$: $t'^{(1)}_{нас} = 10{,}6$ мс.

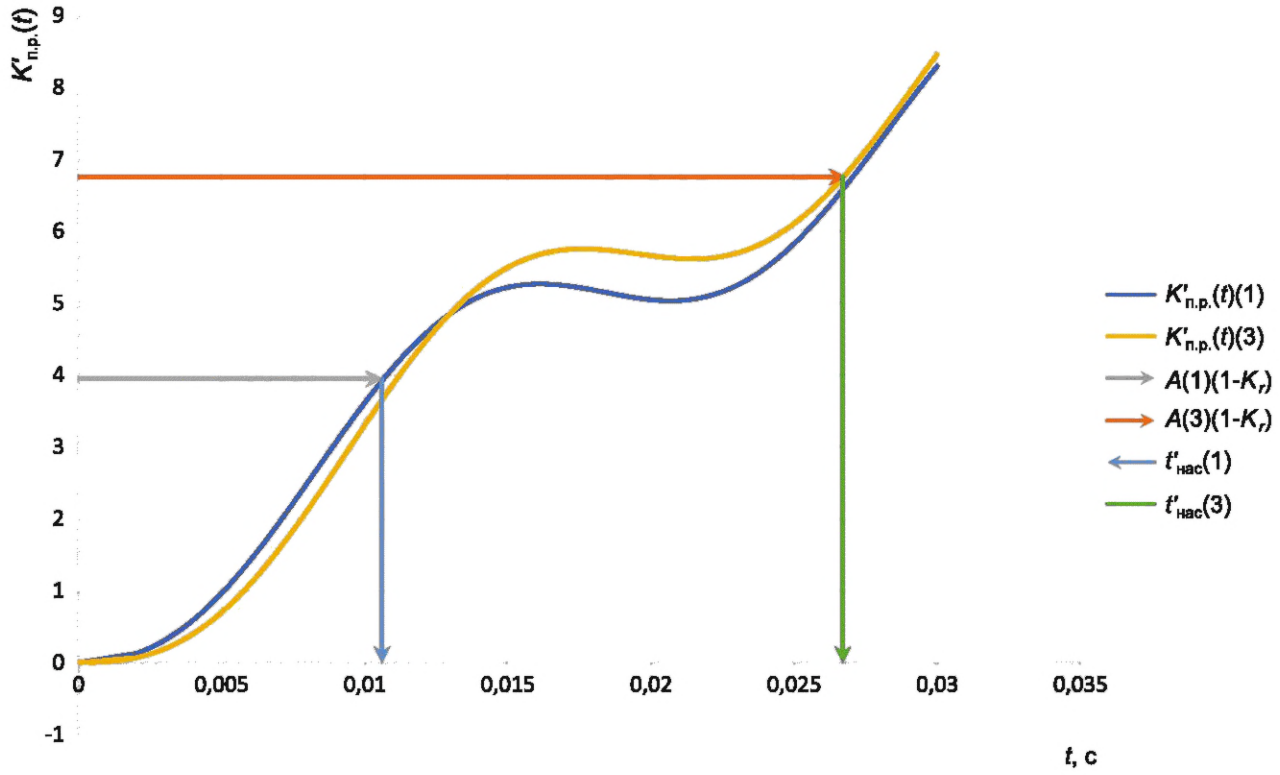


Рисунок Б.4 — Определение времени до насыщения ТТ при первом КЗ

Б.3.5 Для определения времени до насыщения ТТ при возникновении второго КЗ (при неуспешном АПВ) на оси $K''_{п.р.}$ временных диаграмм $K''_{п.р.}(t)$, построенных в соответствии с Б.2.3 при $\varphi_{КЗ} \in [0,90°]$ (значение $\varphi_{КЗ}$ принято равным 30° при трехфазном КЗ и 40° при однофазном КЗ, т. к., при таких значениях определяемое в соответствии с 5.2.3 время до насыщения ТТ будет минимальным, см. рисунок Б.5), необходимо отложить значения $A \cdot (1 - K_r)$, и определить соответствующие им значения $t''_{нас}$:

$$K''_{п.р.}(t_{нас}) = A \cdot (1 - K_r),$$

- для трехфазного КЗ минимальное время до насыщения ТТ при $\varphi_{КЗ} = 30°$: $t''^{(3)}_{нас} = 12{,}2$ мс;
- для однофазного КЗ минимальное время до насыщения ТТ при $\varphi_{КЗ} = 40°$: $t''^{(1)}_{нас} = 9{,}2$ мс.

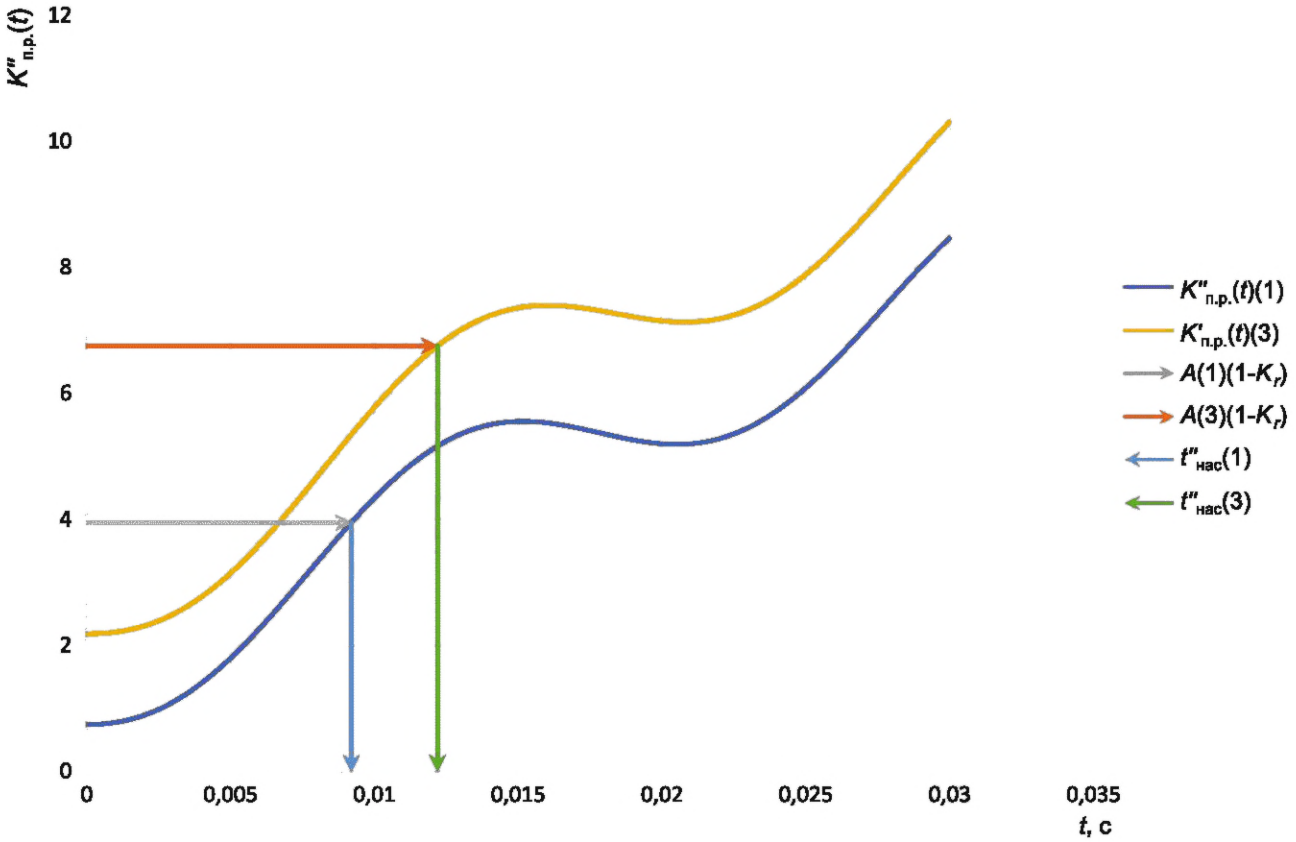


Рисунок Б.5 — Определение времени до насыщения ТТ при втором КЗ

Б.4 Результаты расчета времени до насыщения ТТ

Таблица Б.1 — Значения времени до насыщения ТТ

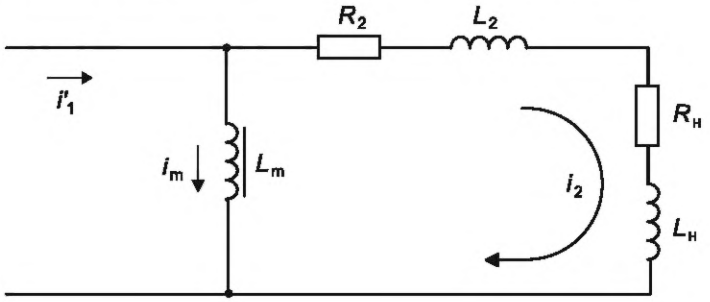
ТТ		Аналитическим методом		Графическим методом по паспортным данным		Графическим методом с использованием ВАХ ТТ	
		$t^{(3)}_{нас}$, мс	$t^{(1)}_{нас}$, мс	$t^{(3)}_{нас}$, мс	$t^{(1)}_{нас}$, мс	$t^{(3)}_{нас}$, мс	$t^{(1)}_{нас}$, мс
ТРГ-УЭТМ®-500-10PR-2000/1	При первом КЗ	17,87	8,61	25,5	10,9	26,7	10,6
	При втором КЗ	10,12	6,15	10,9	8,6	12,2	9,2

Приложение В
(справочное)

Краткие сведения о работе трансформаторов тока в переходных режимах короткого замыкания

В.1 Схема замещения ТТ и основные воздействующие факторы

Схема замещения ТТ приведена на рисунке В.1. В этой схеме приняты следующие допущения: пренебрегают активными потерями в стали сердечника трансформатора и индуктивностью рассеяния первичной обмотки.



i'_1 — приведенный ко вторичной обмотке первичный ток i_1 ($i_1' = i_1/n_{ном}$, где $n_{ном}$ — коэффициент трансформации); i_m — ток намагничивания, являющийся также и током погрешности $i_\varepsilon = i_m$; i_2 — ток вторичной цепи; L_m — индуктивность намагничивания на том участке кривой намагничивания магнитопровода, который можно считать линейным (до начала насыщения); R_2 — сопротивление вторичной обмотки постоянному току; L_2 — индуктивность рассеяния вторичной обмотки; $R_н$ — сопротивление нагрузки постоянному току; $L_н$ — индуктивность нагрузки

Рисунок В.1 — Расчетная схема

Поведение ТТ в переходном режиме определяют постоянной времени вторичного контура, образуемого индуктивностью вторичного контура, и суммарным активным сопротивлением контура

$$T_S = \frac{L_S}{R_S}, \tag{В.1}$$

где L_S — суммарная индуктивность вторичного контура.

$$L_S = L_m + L_2 + L_н, \tag{В.2}$$

где L_m — индуктивность намагничивания;

L_2 — индуктивность рассеяния вторичной обмотки;

$L_н$ — индуктивность нагрузки;

R_S — фактическое суммарное сопротивление вторичного контура постоянному току;

$$R_S = R_2 + R_н. \tag{В.3}$$

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

- отсутствуют 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).

Ток в первичной цепи в переходном режиме характеризуется, кроме эффективного значения периодической составляющей, наличием апериодической составляющей (на рисунке В.2 значения тока переходного режима приведены в относительных единицах, считая за единицу амплитуду периодической составляющей тока).

Количественно характеристики апериодической составляющей определяются двумя параметрами: фазой периодической (синусоидальной) составляющей тока в момент его возникновения $\varphi_{нач}$ и постоянной времени затухания апериодической составляющей тока T_a в сети, в которую включена первичная обмотка трансформатора.

$$i_1'(t) = \frac{I_1 \cdot \sqrt{2}}{n_{ном}} \left\{ e^{-\frac{t}{T_a}} \sin\varphi_{нач} - \sin(\omega \cdot t + \varphi_{нач}) \right\}, \quad (В.4)$$

где ω — угловая частота, соответствующая номинальной частоте напряжения сети $f_{ном}$:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{ном}. \quad (В.5)$$

Для случая, когда ток первичной обмотки с максимальным содержанием апериодической составляющей (начальное значение которой равно амплитудному значению периодической составляющей тока) выражение (В.4) для тока будет следующим:

$$i_1'(t) = \frac{I_1 \cdot \sqrt{2}}{n_{ном}} \{ e^{-\frac{t}{T_a}} - \cos(\omega \cdot t) \}, \quad (В.6)$$

где I_1 — действующее значение периодической составляющей первичного тока;

t — текущее время.

Примечание — В общем случае в первичном токе может содержаться несколько составляющих тока с разными постоянными времени затухания апериодических составляющих. В таких случаях можно применить принцип наложения, вычисляя соответствующие составляющие магнитного потока от каждой составляющей тока и определяя результат как сумму составляющих, либо использовать эквивалентную постоянную времени, например в соответствии с формулой (1).

В.2 Выражения для потокосцепления и тока погрешности

Процессы в схеме на рисунке В.1 характеризует следующее уравнение:

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{(L_2 + L_н)}{L_m} \cdot \frac{d\left(i_1' - i_m\right)}{dt} + \frac{R_S}{L_m} \cdot \left(i_1' - i_m\right). \quad (В.7)$$

Учитывая, что индуктивность ветви вторичного тока в большинстве случаев много меньше индуктивности намагничивания, т. е. $L_2 + L_н << L_S$, можно пренебречь для упрощения первым членом в правой части уравнения и рассматривать уравнения для тока намагничивания и потокосцепления магнитопровода в следующем виде:

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{R_S}{L_m}\left(i_1' - i_m\right) = \frac{i_1' - i_m}{T_S}, \quad (В.8)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = R_S \cdot \left(i - i_m\right). \quad (В.9)$$

Для установившегося режима первичного тока решениями будут:

$$i_m(t) = - I_{m.max} \sin(\omega t), \quad (В.10)$$

$$\psi(t) = -\psi_{max} \sin(\omega t), \quad (В.11)$$

где

$$I_{m.max} = \frac{I_1\sqrt{2}}{n_{ном} \cdot \omega \cdot T_S}, \quad (В.12)$$

$$\Psi_{max} = \frac{I_1\sqrt{2} \cdot R_S}{n_{ном} \cdot \omega}. \quad (В.13)$$

Для переходного режима удобно выразить решение в безразмерной форме в виде переходного коэффициента, приняв за базовые значения амплитудные значения установившегося режима. Безразмерная функция времени будет одинаковой и для тока погрешности, и для потокосцепления

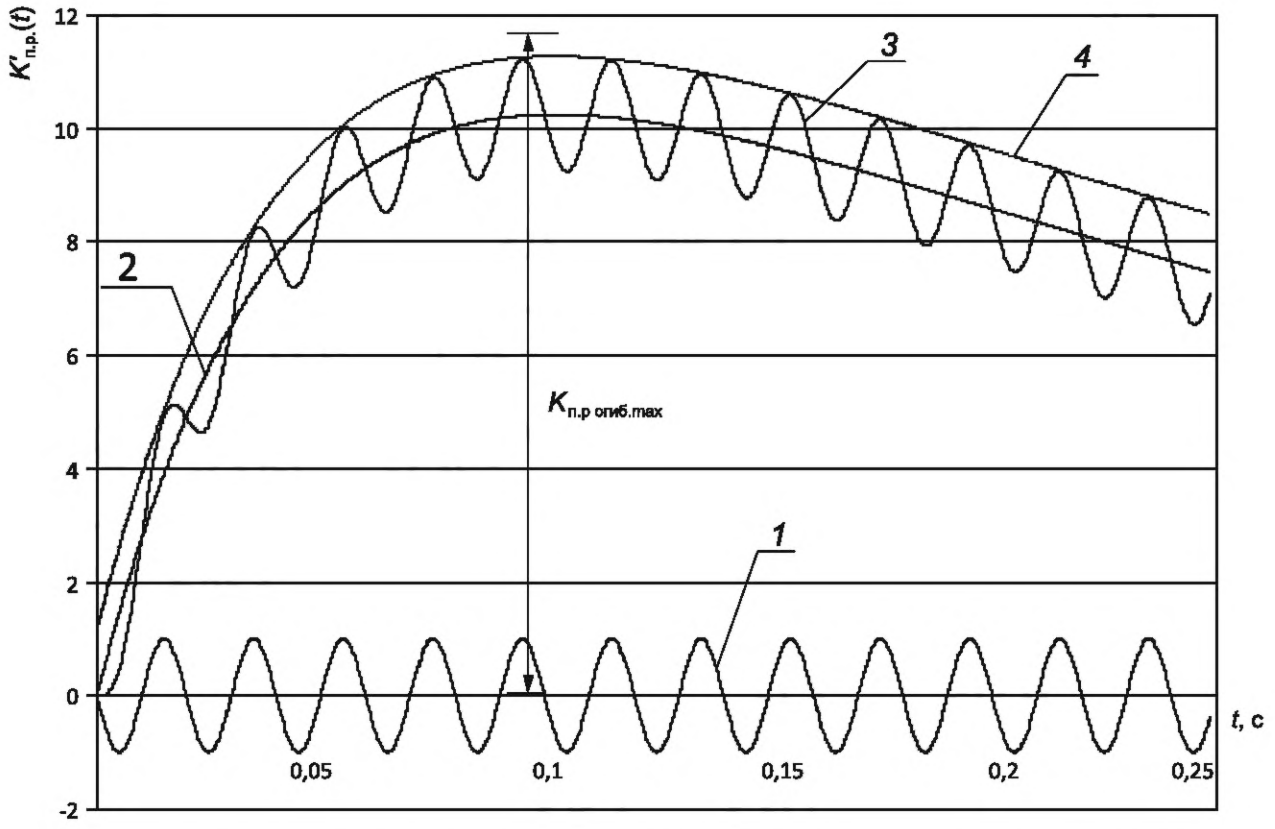
$$K_{\text{п.р}}(t)=\frac{i_m(t)}{I_{m.\max}}=\frac{\Psi(t)}{\Psi_{\max}}. \tag{В.14}$$

Полное решение для $K_{\text{п.р.}}(t)$ составит:

$$K_{\text{п.р}}(t)=\frac{\omega\cdot T_a\cdot T_S}{T_a-T_S}\left(e^{-\frac{t}{T_a}}-e^{-\frac{t}{T_S}}\right)+\frac{\omega\cdot T_S}{1+(\omega\cdot T_S)^2}\left\{e^{-\frac{t}{T_S}}-\sqrt{1+(\omega\cdot T_S)^2}\sin\left(\omega\cdot t+\operatorname{arctg}\frac{1}{\omega\cdot T_S}\right)\right\}. \tag{В.15}$$

После упрощений, связанных с тем, что, как правило, $\omega\cdot T_S >> 1$, выражение (В.15) принимает вид:

$$K_{\text{п.р.}}(t)=\frac{\omega\cdot T_a\cdot T_S}{T_a-T_S}\left(e^{-\frac{t}{T_a}}-e^{-\frac{t}{T_S}}\right)-\sin(\omega\cdot t). \tag{В.16}$$



1 — периодическая составляющая потокосцепления; *2* — апериодическая составляющая потокосцепления; *3* — результирующее потокосцепление переходного режима КЗ; *4* — огибающая

Рисунок В.2 — Пример изменения потокосцепления во времени

Мгновенное значение погрешности переходного режима в каждый момент времени принимает значение большее, по сравнению с амплитудой полной погрешности установившегося режима, и максимум мгновенной погрешности соответствует $K_{\text{п.р.огиб.max}}$ (рисунок В.2).

Для упрощения определения максимального значения $K_{\text{п.р.огиб.max}}$ можно принять его равным максимуму огибающей линии к линии $K_{\text{п.р.}}(t)$.

Выражение для огибающей:

$$K_{\text{п.р. огиб}}(t) = \frac{\omega \cdot T_a \cdot T_S}{T_a - T_S}\left(e^{-\frac{t}{T_a}} - e^{-\frac{t}{T_S}}\right) + 1. \quad \text{(В.17)}$$

Момент наступления максимума огибающей равен:

$$t_{\max} = \frac{T_a \cdot T_S}{T_a - T_S} \ln \frac{T_a}{T_S} \quad \text{(В.18)}$$

и значение максимума определяют по выражению (В.17) подстановкой (В.18). После преобразований:

$$K_{\text{п.р. огиб.max}} = \frac{\omega \cdot T_a \cdot T_S}{T_a - T_S}\left[\left(\frac{T_a}{T_S}\right)^{\frac{T_S}{T_S - T_a}} - \left(\frac{T_a}{T_S}\right)^{\frac{T_a}{T_S - T_a}}\right] + 1. \quad \text{(В.19)}$$

Фактически коэффициент $K_{\text{п.р.}}(t)$ показывает, во сколько раз апериодическая составляющая тока КЗ увеличивает потокосцепление по сравнению с тем, какое было бы при периодическом токе при той же нагрузке. В номинальных данных трансформатора есть коэффициент $K_{\text{п.р.ном}}$, который характеризует точку на ВАХ, до которой изготовитель должен обеспечить отсутствие насыщения при всех прочих параметрах, равных номинальным. Условием отсутствия насыщения трансформатора в эксплуатации при конкретных параметрах нагрузки и первичной сети, которые могут отличаться от номинальных, является

$$\frac{A \cdot (1 - K_r)}{K_{\text{п.р. max}}} \geq 1, \quad \text{(В.20)}$$

где A — коэффициент, учитывающий соотношение между максимально допустимыми параметрами ТТ и реальными параметрами в месте его установки:

$$A = \frac{I_{1\text{ном}} \cdot K_{\text{ном}} \cdot K_{\text{п.р.ном}} \sqrt{(R_2 + R_{\text{н.ном}})^2 + (X_2 + Z_{\text{н.ном}} \cdot \sin \varphi_{\text{н.ном}})^2}}{I_{\text{кз}} \cdot \sqrt{(R_2 + R_{\text{н.факт}})^2 + \omega^2 \cdot (L_2 + L_{\text{н.факт}})^2}}, \quad \text{(В.21)}$$

где $I_{\text{кз}}$ — реальное значение периодической составляющей тока первичной обмотки при КЗ;

$R_{\text{н.ном}}$ и $R_{\text{н.факт}}$ — номинальное и фактическое сопротивления нагрузки постоянному току;

$Z_{\text{н.ном}} \cdot \sin\varphi_{\text{н.ном}}$ и $L_{\text{н.факт}}$ — номинальная и фактическая индуктивные составляющие сопротивления нагрузки;

R_2 — сопротивление вторичной обмотки постоянному току;

X_2 — индуктивное сопротивление вторичной обмотки;

$K_{\max}$ — максимальная предельная кратность;

L_2 — индуктивность рассеяния вторичной обмотки (если ею нельзя пренебречь).

В тех случаях, когда условие (В.21) не удается выполнить, потребителю важно знать время до насыщения. Оно определяется из уравнения

$$K_{\text{п.р.огиб}}(t) - A \cdot (1 - K_r) = 0. \quad \text{(В.22)}$$

Ввиду трансцендентности выражения (В.17) для $K_{\text{п.р.огиб.}}(t)$ точное решение уравнения может быть найдено численными методами, например методом последовательных приближений. Для приближенной оценки времени до насыщения ($t'_{\text{нас}}$) может быть применено упрощенное выражение

$$t_{\text{нас}} = T \cdot \ln \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T - A \cdot (1 - K_r) + 1}, \quad \text{(В.23)}$$

где T — наименьшее из двух значений постоянных времени T_a и T_S.

Выражение (В.23) имеет решение при условии соблюдения двух неравенств:

$$\omega \cdot T + 1 > A \cdot (1 - K_r), \tag{В.24}$$

$$A \cdot (1 - K_r) > 1. \tag{В.25}$$

При подстановке реальных значений они могут не всегда быть удовлетворены. Невыполнение первого неравенства (В.24) несет физический смысл, что точка пересечения кривой изменения потокосцепления с уровнем насыщения отсутствует, то есть насыщения не наступает и соответственно не существует и время насыщения.

При невыполнении второго неравенства (В.25) точка пересечения уровня насыщения с огибающей кривой изменения потокосцепления находится в отрицательной области оси времени, так как уровень насыщения меньше, чем амплитуда периодической составляющей потокосцепления. В этом случае $A \cdot (1 - K_r) < 1$ и сердечник трансформатора будет насыщаться знакопеременно на каждый полупериод тока промышленной частоты.

Выражение (В.23) дает несколько меньшее значение времени до насыщения, чем точное решение уравнения (В.17), что гарантированно обеспечивает отсутствие насыщения ТТ до этого времени. Если требуется более точная оценка, или время до насыщения составило менее 15 мс, следует применять другие, например численные, методы для решения уравнений (В.8) и (В.9).

В.3 Работа в циклах АПВ

Для ТТ, предназначенных для установки в тех точках сетей, где возможно применение при КЗ АПВ, нормируется стандартный цикл, состоящий из двух КЗ и бестоковой паузы между ними (см. рисунок В.3). В качестве наиболее тяжелых условий рассматриваются такие, когда в обоих КЗ апериодическая составляющая имеет одну и ту же полярность. При этих условиях трансформатор считают удовлетворяющим нормированным требованиям, если он выдерживает показатели, характеризующие класс точности в течение времени $t'_{нас}$ и $t''_{нас}$, где $t'_{нас}, t''_{нас}$ — больше или равно минимально необходимому времени достоверного измерения значения тока, при котором обеспечивается правильная работа функций релейной защиты, реализованных в устройстве релейной защиты и автоматики, в переходных режимах, сопровождающихся насыщением ТТ, в первом и во втором КЗ соответственно.

Весь промежуток времени работы трансформатора в этом случае состоит из нескольких интервалов. Каждый из интервалов времени может рассматриваться по отдельности, но с учетом начальных условий, созданных в результате процесса во время предыдущего интервала.

Выражение (В.16) для интервала времени после t_2 (время возникновения второго КЗ), принимает вид:

$$K_{п.р}(t) = K_{п.р}(t_2) + \frac{\omega \cdot T_a \cdot T_S}{T_a - T_S}\left(e^{-\frac{t-t_{нач}}{T_a}} - e^{-\frac{t-t_{нач}}{T_S}}\right) - \sin\left[\omega \cdot (t - t_{нач})\right], \tag{В.26}$$

где $K_{п.р.}(t_2)$ — значение коэффициента переходного режима в момент возникновения второго КЗ;

t_2 — время возникновения второго КЗ.

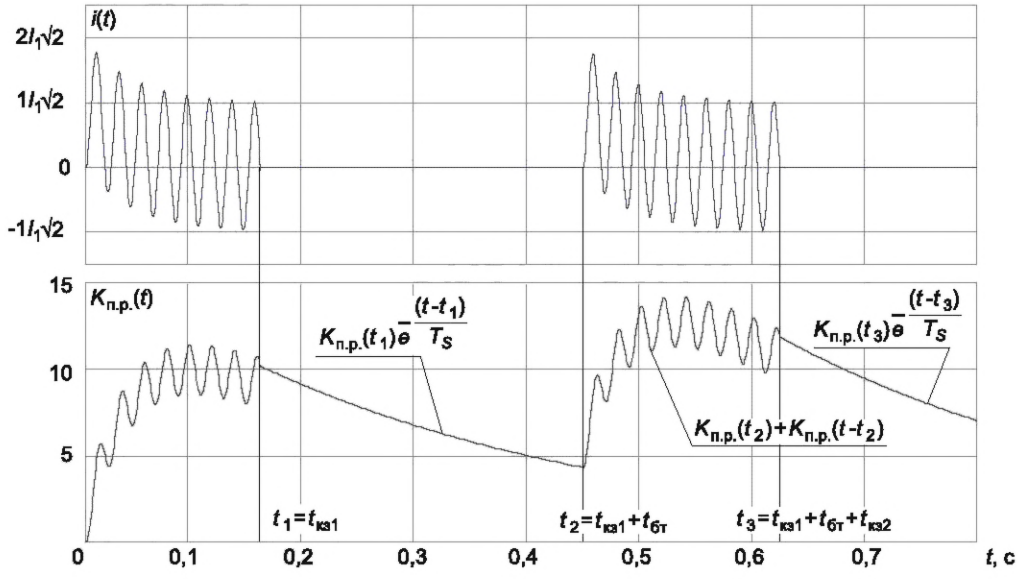


Рисунок В.3 — Работа ТТ в цикле АПВ

Для момента времени возникновения первого КЗ также, как и при одиночном КЗ, $K_{п.р.}(0) = 0$. Для второго КЗ в цикле АПВ в начальный момент времени равен $t_2 = t_{кз1} + t_{б.п}$, $K_{п.р.}(t_2)$ равен значению коэффициента переходного режима в момент окончания бестоковой паузы.

Во время бестоковой паузы $K_{п.р.}(t)$ изменяется (затухает) по экспоненциальному закону, начиная от такого значения, какое он имел в момент прекращения тока, с постоянной времени вторичного контура, причем отсчет времени идет от начала бестоковой паузы:

$$K_{п.р}(t) = K_{п.р}(t_{кз1}) \cdot e^{-\frac{t-t_{кз1}}{T_S}}. \quad (B.27)$$

B.4 Выражения для определения погрешностей

Для трансформаторов класса TPY, TPE нормируется наибольшее значение мгновенной погрешности в переходном режиме ε_{max}, %, которое составляет

$$\varepsilon_{max} = \frac{\max\left(K_{п.р.}(t)\right)}{\omega \cdot T_S} \cdot 100\ \%, \quad (B.28)$$

где $\max(K_{п.р.}(t))$ — максимальное значение $K_{п.р.}(t)$ во всем интервале времени.

Для трансформаторов класса TPZ нормируется периодическая составляющая погрешности $\varepsilon_{ac\ max}$, %, выражающаяся как

$$\varepsilon_{ac\ max} = \frac{1}{\omega \cdot T_S} \cdot 100\ \%. \quad (B.29)$$

Полученные значения не должны превышать значений, указанных в ГОСТ Р 70507.2. Выражения (B.28) и (B.29) справедливы только при отсутствии насыщения магнитопровода трансформатора.

B.5 Работа при достижении уровня насыщения

Положение о равенстве $K_{п.р.}(t)$ для тока погрешности и для потокосцепления (B.14) справедливо только на участке кривой намагничивания (ВАХ), которую можно считать линейной, т. е. от нуля до начала участка насыщения. При достижении уровня насыщения характер их изменения становится различным. Если насыщение ограничивает рост потокосцепления, то ток погрешности (ток намагничивания) резко возрастает. На рисунке B.4 приведен тот же пример, что на рисунке B.3, но с заданным уровнем насыщения, соответствующим $K_{п.р.}(t) = 9$.

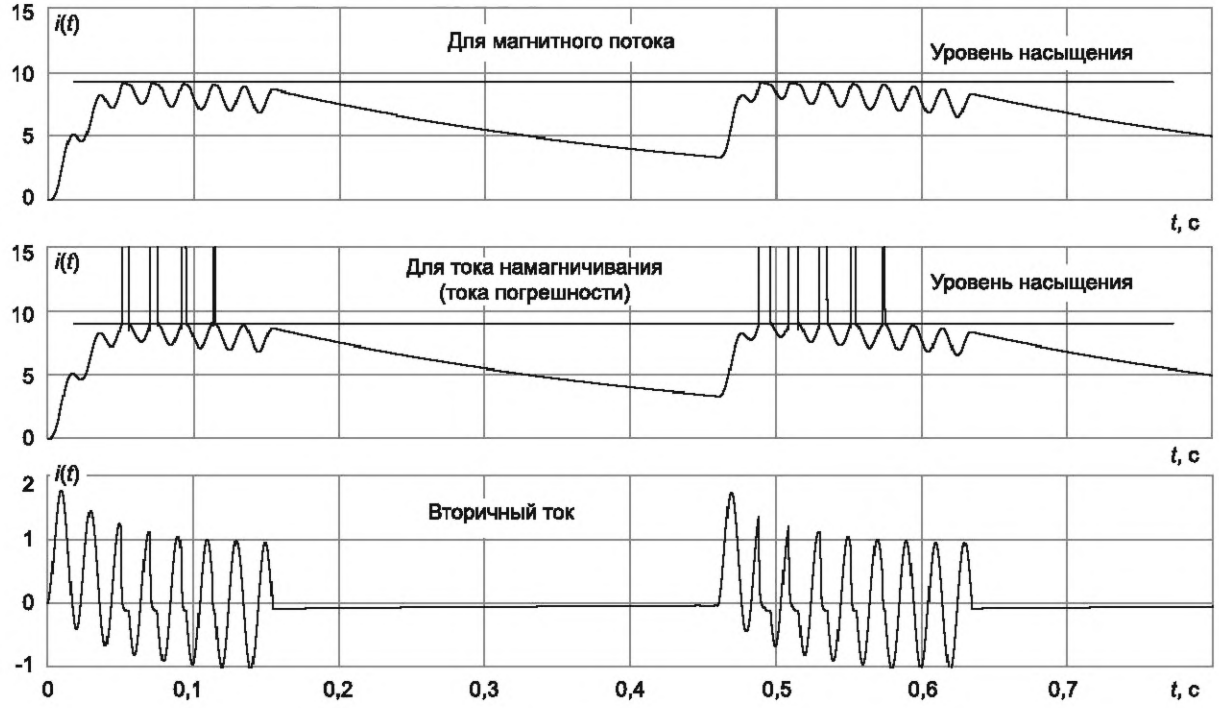


Рисунок B.4 — Работа ТТ при наличии насыщения

После момента достижения уровня насыщения процесс во вторичном контуре уже не соответствует выражениям (В.15), (В.16), (В.17) до самого конца протекания тока КЗ, несмотря на то что потокосцепление может снизиться ниже уровня насыщения раньше. Для бестоковой паузы можно считать применимым выражение (В.27), с той разницей, что за начальное значение следует принимать уровень насыщения.

Значение времени до насыщения в первом КЗ можно определить по выражению (В.23). Для времени насыщения во втором КЗ $t''_{нас}$ следует учесть начальное значение в момент начала второго КЗ $K_{п.р.}(t_2)$:

$$t''_{нас} = T \cdot \ln \frac{\omega \cdot T}{\omega \cdot T + K_{п.р.}(t_2) - A(1 - K_r) + 1}. \quad (В.30)$$

Неравенства (В.24) и (В.25) в этом случае принимают вид:

$$\omega \cdot T + 1 > A(1 - K_r) - K_{п.р.}(t_2), \quad (В.31)$$

$$A(1 - K_r) - K_{п.р.}(t_2) > 1. \quad (В.32)$$

Библиография

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

УДК 621.311:006.354 ОКС 27.010-01

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

Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *И.А. Королева*
Компьютерная верстка *И.Ю. Литовкиной*

Сдано в набор 19.12.2024. Подписано в печать 22.01.2025. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,72. Уч-изд. л. 3,10.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

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