

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314.224

Андрей Анатольевич Яблоков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: andrewyablokov@yandex.ru

Антон Витальевич Панащатенко

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: pan.anton_@mail.ru

Екатерина Андреевна Воробьева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: v_ea@rambler.ru

Алексей Васильевич Гусенков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, Россия, Иваново, e-mail: avgus@ispu.ru

Автоматизация расчетов времени до насыщения электромагнитных трансформаторов тока при коротком замыкании

Авторское резюме

Состояние вопроса. Начиная с 2019 года при проектировании и эксплуатации систем релейной защиты и автоматики большое внимание уделяется работе электромагнитных трансформаторов тока в переходных режимах коротких замыканий. В качестве характеристики работы трансформаторов тока в таких режимах используется расчетное значение времени до насыщения магнитопровода трансформаторов тока. Данное время сравнивается с временем точной трансформации тока, необходимым для правильной и устойчивой работы устройств релейной защиты и автоматики. Учитывая, что внедрение подобных расчетов произошло недавно, с введением ГОСТ Р 58669-2019 объем опубликованных исследований по данной проблеме относительно невелик, а в имеющихся работах зачастую отсутствуют рекомендации по практическому применению предлагаемых методик для специальных случаев (например, схемы соединения вторичных обмоток трансформаторов тока «сумма токов двух звезд») и возможных способов повышения их точности, актуальным является вопрос автоматизации расчетов времени до насыщения трансформаторов тока, поскольку инженеры-проектировщики отмечают, что выполнение расчетов «ручным» способом занимает много времени и требует больших трудозатрат. Кроме того, в ГОСТ Р 58669-2019 предусмотрены допущения, предназначенные для «ручных» расчетов, которые можно избежать при автоматизации и при этом повысить итоговую точность.

Материалы и методы. Использованы методы математического анализа выражений для определения времени до насыщения магнитопроводов трансформаторов тока различных классов и выражений, составленных в соответствии с основополагающими законами теоретических основ электротехники для расчета величины нагрузки, подключенной к трансформаторам тока при различных схемах соединения вторичных обмоток и реле. Выведенные аналитические формулы проверены с использованием программного комплекса имитационного моделирования MATLAB/Simulink.

Результаты. Рассмотрены отдельные аспекты, позволяющие нивелировать существующие недостатки расчетных методик ГОСТ Р 58669-2019. Выведены и проверены аналитические формулы для определения начальной фазы периодической составляющей тока коротких замыканий, при которой достигается минимальное время до насыщения магнитопроводов трансформаторов тока (классов P, PR, TPX, TPY, TPZ) при первом и втором (в цикле автоматического повторного включения) коротких замыканиях. Приведены уточненные аналитические формулы для определения величины нагрузки, подключенной к трансформаторам тока при различных схемах соединения их вторичных обмоток и реле для всех возможных видов коротких замыканий. Рассмотрены случаи применения выведенных формул при выполнении расчетов для отдельных ветвей схемы замещения первичной сети, питающих место коротких замыканий. Выполнена программная реализация разработанных аналитических выражений и формул в едином расчетном сервисе.

Выводы. Полученные аналитические формулы могут быть использованы при осуществлении проектных расчетов в части выбора характеристик трансформаторов тока, обеспечивающих требуемое время до насыщения их магнитопроводов при заданных условиях функционирования. Результаты исследования внедрены в облачный сервис для моделирования объектов электроэнергетики «Лаборатория РЗА». Будущие исследования связаны с разработкой способов точного определения значений постоянной времени затухания аperiodической составляющей токов коротких замыканий в ветвях схемы замещения первичной сети с учетом межсистемных связей в целях повышения точности расчетов времени до насыщения магнитопроводов трансформаторов тока.

Ключевые слова: трансформаторы тока, насыщение магнитопроводов, устройство релейной защиты, автоматическое повторное включение, моделирование объектов электроэнергетики

Andrey Anatolievich Yablokov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: andrewyablokov@yandex.ru

Anton Vitalievich Panaschatenko

Ivanovo State Power Engineering University, Post graduate Student of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: pan.anton_@mail.ru

Ekaterina Andreevna Vorobyova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: v_ea@rambler.ru

Alexey Vasilievich Gusenkov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Automatic Control of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: avgus@ispu.ru

Automated calculation of time to saturation of electromagnetic current transformers during short circuits

Abstract

Background. Since 2019, when designing and operating relay protection and automation systems (RPA), much attention has been paid to the operation of electromagnetic current transformers (CTs) in transient short-circuit (SC) modes. The calculated value of the time until the CT magnetic core is saturated is used as a characteristic of CT operation in such modes. This time is compared with the time of accurate current transformation required by RPA. Considering that the introduction of such calculations has occurred recently, with the introduction of GOST R 58669-2019, the volume of published research on this issue is relatively small. The existing studies often lack recommendations for the practical application of the proposed methods for special cases (for example, the connection diagram of the secondary windings of the CT “sum of currents of two stars”) and possible ways to improve their accuracy. A topical issue is the automation of calculations of the time to saturation of the CT, since design engineers note that performing calculations “manually” takes a lot of time and requires large labor costs. In addition, GOST R 58669-2019 provides some assumptions intended for “manual” calculations, which can be avoided with automation and at the same time increase the final accuracy.

Materials and methods. The authors have used the methods of mathematical analysis to determine the time to saturation of magnetic cores of CTs of various classes and expressions compiled in accordance with the fundamental laws of the theoretical foundations of electrical engineering for calculating the magnitude of the load connected to the CT with various connection schemes of secondary windings. The derived analytical formulas have been verified using simulation modeling in the MATLAB/Simulink software package.

Results. The authors have considered some issues that make it possible to mitigate the existing shortcomings of the calculation methods of GOST R 58669-2019. The authors have developed and verified analytical formulas to determine the initial phase of the periodic component of the SC current, at which the minimum time to saturation of the CT magnetic cores (classes P, PR, TPX, TPY, TPZ) is achieved during the first and second SC. Clarified analytical formulas are given to determine the value of the load connected to the CT at various connection schemes of their secondary windings for all possible types of SC. Cases of application of the developed formulas when performing calculations for individual branches feeding the SC location are considered. Software implementation of the developed analytical expressions and formulas in a single calculation service is performed.

Conclusions. The obtained analytical formulas can be used for implementation of design calculations in terms of selecting CT characteristics that provide the required time to saturation of their magnetic cores under specified operating conditions. The research results have been implemented in the cloud service for modeling electric power facilities “RZA Laboratory”. Future research is related to the development of methods for accurately determining the values of the attenuation time constant of the aperiodic component of SC currents in branches, considering intersystem connections, to improve the accuracy of calculations of the time to saturation of CT magnetic cores.

Key words: current transformers, saturation of magnetic circuits, relay protection devices, automatic reclosing, power system modeling

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.5.028-038

Введение. Современная нормативно-техническая документация¹ предписывает обеспечение правильной работы устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) не только в установившихся, но и в переходных режимах коротких замыканий (КЗ). Выполнение этого требования при выборе и проверке трансформаторов тока (ТТ), к которым подключены быстродействующие УРЗА, осуществляется посредством сопоставления расчетного времени до насыщения магнитопровода ТТ и необходимого для правильной работы УРЗА времени точной трансформации тока. Расчеты времени до насыщения магнитопроводов ТТ «ручным» способом по методикам, описанным в ГОСТ Р 58669-2019², имеют следующие недостатки:

1. Анализ результатов расчетов времени до насыщения магнитопроводов ТТ [1] позволяет утверждать, что выполнение таких расчетов не является тривиальной задачей для проектировщиков в силу сложности используемых методик и малого распространения необходимых программных инструментов³.

2. Расчетное время до насыщения магнитопровода ТТ зависит от значения начальной фазы периодической составляющей тока КЗ (ϑ), в связи с чем ГОСТ Р 58669-2019 предполагает использование приведенных в нем графических материалов или выполнение множества расчетов при различных значениях этой фазы, что сильно затрудняет использование методики.

3. Расчеты для одного ТТ могут занимать до 30 минут, а полный расчет для всех ТТ энергообъекта – несколько недель.

4. Принята нулевая разница фаз токов отдельных ветвей схемы замещения первичной

сети, питающих точку КЗ, что оказывает влияние на итоговую точность расчетов.

5. При «ручных» расчетах часто принимаются нулевыми индуктивные сопротивления в ветви вторичного тока.

6. В эксплуатации встречаются случаи [1], не описанные в ГОСТ Р 58869-2019, например не указаны расчетные величины для определения нагрузки ТТ, соединенных по схеме «Сумма токов двух звезд».

7. В ГОСТе не приведена методика расчета времени до насыщения для ТТ новых классов точности с зазором в магнитопроводе (PR, TPY, TPZ), учитывающая особенности их работы в цикле автоматического повторного включения (АПВ).

8. Расчетными случаями КЗ, в соответствии со стандартом⁴, являются только однофазные и трехфазные КЗ, однако производители УРЗА для отдельных защит (токовой защиты нулевой последовательности, дифференциально-фазной защиты, направленной высокочастотной защиты) указывают, что при проверке ТТ расчетным может быть случай двухфазного КЗ или двухфазного КЗ на землю⁵, поскольку для ряда пусковых органов указных защит (например, по току или приращению тока обратной последовательности) действующей величиной является ток обратной последовательности, определяемый исключительно случаем двухфазного КЗ. Рассчитывая в этом случае время до насыщения магнитопровода ТТ только для трехфазного или однофазного КЗ, можно получить ложно отрицательные случаи при проверке правильности функционирования защиты (поскольку при двухфазных КЗ время до насыщения ТТ, как правило, больше, чем время до насыщения при однофазных и трехфазных КЗ, при прочих равных условиях).

¹ Постановление Правительства от 13.08.2018 г. № 937 «Об утверждении правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».

² 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. – М.: Стандартинформ, 2020. – 58 с.

³ Сайт облачного сервиса для проектирования и моделирования в электроэнергетике «Лаборатория РЗА». Раздел трансформаторов тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://labrza.ru/>; Сайт производителя УРЗА ООО «Релематика». Раздел инженерного программного обеспечения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://relematika.ru/>.

⁴ 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. – М.: Стандартинформ, 2020. – 58 с.

⁵ ООО НПП «ЭКРА». Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710, ШЭТ. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока. ЭКРА.650323.085 Д. Чебоксары 2022 (третья редакция) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cloud.ekra.ru/index.php/s/gSxo2YSYznTntFN>

Учитывая вышесказанное, актуальной задачей является разработка новых и совершенствование существующих методик расчета времени до насыщения магнитопроводов ТТ и разработка программных средств для выполнения таких расчетов.

Вывод аналитических формул для расчета времени до насыщения магнитопровода ТТ. Формула коэффициента переходного режима для ТТ с замкнутым магнитопроводом (классов Р, ТРХ) в предположении прямоугольной характеристики намагничивания имеет следующий вид:

$$K_{п.р}(t) = \sin(\alpha) e^{-\frac{t}{T_p}} \cos(\vartheta) + \cos(\alpha) \omega T_p (1 - e^{-\frac{t}{T_p}}) \cos(\vartheta) - \sin(\omega t + \alpha + \vartheta) + \cos(\alpha) \sin(\vartheta), \quad (1)$$

где α – угол нагрузки, определяемый активным и реактивным сопротивлением цепи вторичного тока ТТ, °; T_p – постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ, с; ω – угловая частота, рад/с; ϑ – начальная фаза периодической составляющей тока КЗ, °.

Используя известное тригонометрическое выражение

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin(\alpha) \cos(\beta) + \sin(\beta) \cos(\alpha), \quad (2)$$

преобразуем (1) и определим производную коэффициента переходного режима по ϑ :

$$\frac{dK_{п.р}(\vartheta)}{d(\vartheta)} = -\sin(\alpha) e^{-\frac{t}{T_p}} \sin(\vartheta) + \cos(\alpha) \omega T_p (e^{-\frac{t}{T_p}} - 1) \sin(\vartheta) + \cos(\alpha) \cos(\vartheta) + \sin(\omega t + \alpha) \sin(\vartheta) - \cos(\omega t + \alpha) \cos(\vartheta). \quad (3)$$

Разделив производную на $\sin(\vartheta)$, приравняв к нулю и выразив значение $\operatorname{ctg}(\vartheta)$, получим котангенс начальной фазы периодической составляющей тока КЗ, соответствующий максимальному значению коэффициента переходного режима:

$$\operatorname{ctg}(\vartheta) = \frac{\cos(\alpha) \omega T_p (1 - e^{-\frac{t}{T_p}}) + \sin(\alpha) e^{-\frac{t}{T_p}}}{\cos(\alpha) - \cos(\omega t + \alpha)} - \frac{\sin(\omega t + \alpha)}{\cos(\alpha) - \cos(\omega t + \alpha)}. \quad (4)$$

Используя (2) и тригонометрическое тождество

$$1 + \operatorname{ctg}^2(\vartheta) = \frac{1}{\sin^2(\vartheta)}, \quad (5)$$

преобразуем (1) к виду, содержащему только $\operatorname{ctg}(\vartheta)$ (в этом случае отсутствует необходимость

вычисления начальной фазы периодической составляющей тока КЗ):

$$K_{п.р}(t) = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{ctg}^2(\vartheta)}} \times \left(\sin(\alpha) e^{-\frac{t}{T_p}} \operatorname{ctg}(\vartheta) + \cos(\alpha) \omega T_p (1 - e^{-\frac{t}{T_p}}) \operatorname{ctg}(\vartheta) - \sin(\omega t + \alpha) \operatorname{ctg}(\vartheta) - \cos(\omega t + \alpha) + \cos(\alpha) \right). \quad (6)$$

В отдельных случаях выражение (6) можно упростить при допущении отсутствия индуктивного сопротивления цепи вторичного тока ($\alpha = 0^\circ$), так как индуктивное сопротивление вторичной обмотки (X_2) для большинства ТТ невелико. Однако, по данным, представленным в протоколах заводских испытаний и каталогах [2], существуют ТТ со значением индуктивного сопротивления, сопоставимым или даже равным величине активного сопротивления вторичной обмотки (R_2). При этом значение индуктивного сопротивления вторичной обмотки может быть определено по вольтамперной характеристике с использованием формул, приведенных в IEC 60044-6⁶. В силу предположения о небольшой величине реактивного сопротивления кабеля и необходимости поиска нужного значения в каталоге, данной составляющей сопротивления также часто пренебрегают, однако, согласно справочным данным [3], реактивное сопротивление контрольных кабелей (X_{np}) сечением от 2,5 до 16 мм² составляет 1,5–6 % от его активного сопротивления (R_{np}). Индуктивность подключенных реле мала, и этой составляющей в расчетах можно пренебречь. Учитывая вышесказанное, такое упрощение расчетов в виде нулевого значения угла α может приводить к ощутимым погрешностям, поэтому для повышения точности индуктивное сопротивление необходимо учесть при осуществлении автоматизированных расчетов (использовать автоматически из БД программы каталожные данные о реактивном сопротивлении кабеля и вторичной обмотки ТТ).

Выражение (6) справедливо для ТТ с замкнутым магнитопроводом (аналогичным образом выводятся формулы для ТТ с зазором в магнитопроводе в предположении спрямленной характеристики намагничивания) перед началом первого цикла АПВ, при этом не менее важными с точки зрения оценки правильной работы УРЗА являются расчеты времени до насыщения при повторном включении на КЗ. При неуспешном АПВ коэффициент переходного режима определяется суммой значений коэффициентов переходного режима, соответствующих первому и второму КЗ:

⁶ IEC 60044-6 (1992-03). Instrument Transformers, Part 6: Requirements protective current transformers for transient performance.

$$K_{п.р}^{АПВ}(t) = K_{п.р \max} e^{-\frac{t+t_{б.п}}{T_s}} + K_{п.р}^{2КЗ}(t), \quad (7)$$

где $K_{п.р \max}$ – максимальное значение коэффициента переходного режима на интервале времени существования первого КЗ, о.е.; $t_{б.п}$ – время бестоковой паузы между первым и вторым КЗ, с; T_s – постоянная времени вторичного контура ТТ, с.

В первом слагаемом учитывается экспоненциальное размагничивание магнитопровода ТТ в бестоковой паузе и на интервале времени существования второго КЗ, при этом само значение $K_{п.р \max}$ может быть рассчитано с использованием формул (1) или (6). Отдельно стоит отметить, что значение $K_{п.р}$, соответствующее моменту ликвидации первого КЗ, может быть не максимальным на рассматриваемом интервале времени, а поскольку момент ликвидации КЗ не может быть достоверно известен, при расчетах необходимо использовать максимальное значение на отрезке существования первого КЗ ($K_{п.р \max}$). В случае, если насыщение магнитопровода ТТ наблюдается ранее момента ликвидации первого КЗ, $K_{п.р \max}$ принимается соответствующим насыщению магнитопровода ТТ (равным параметру А в ГОСТ Р 58669-2019). Такая подстановка необходима, поскольку физически максимально возможное фактическое значение индукции в магнитопроводе ТТ, характеризующее расчетным значением $K_{п.р \max}$, не может быть выше, чем значение индукции насыщения его магнитопровода, характеризующее значением параметра режима А.

Постоянную времени вторичного контура ТТ можно определить по выражению

$$T_s = \frac{L_s}{R_s}, \quad (8)$$

где $L_s = L_m + L_2 + L_{н.факт}$ – индуктивность вторичного контура, определяемая индуктивностью намагничивания вторичной обмотки и фактической нагрузки, Гн; $R_s = R_2 + R_{н.факт}$ – активное сопротивление вторичного контура, определяемое как сумма активного сопротивления вторичной обмотки ТТ и фактически подключенной нагрузки, Ом.

Трансформаторы тока с замкнутым магнитопроводом имеют высокое значение T_s и практически не размагничиваются к моменту возникновения второго КЗ [4]. Более того, для случаев неуспешного АПВ при расчетах времени до насыщения ТТ принимается их безусловное насыщение при первом КЗ. Таким образом, значение первого слагаемого в выражении (7) для ТТ с замкнутым магнитопроводом считается неизменным и принимается равным максимально возможной остаточной магнитной индукции магнитопровода ТТ. Эта величина для различных конструктивных типов ТТ лежит в диапазоне от 35 до 95 % (от значения индукции насыщения магнитопровода данного ТТ) [1].

Данное обстоятельство служит серьезным ограничением при обеспечении требуемого времени точной трансформации тока ТТ с замкнутым магнитопроводом и обосновывает актуальность увеличивающегося применения ТТ, предназначенных для работы в переходных режимах [5, 6]. Отдельно стоит отметить, что на практике встречаются ТТ с замкнутым магнитопроводом, выполненным из анизотропной стали, их характеристики приближаются к ТТ с разрезом в магнитопроводе. Формулы коэффициента переходного режима, выведенные при предположении прямоугольной характеристики намагничивания для таких ТТ, могут быть не применимы согласно используемого в ГОСТ Р 58669-2019 критерия, при этом в стандарте не описан алгоритм действий для таких случаев, в связи с чем пренебрегают возможной погрешностью и используют в расчетах предположение о прямоугольной характеристике намагничивания ТТ. Более правильно для таких ТТ использовать формулы, выведенные в предположении спрямленной характеристики намагничивания, представленные в табл. 1.

В отличие от ТТ с замкнутым магнитопроводом, для ТТ с зазором в магнитопроводе величина T_s при номинальной нагрузке указывается в паспорте и может быть пересчитана при фактической нагрузке по следующему выражению:

$$T_s = \frac{T_{s.ном} (R_2 + Z_{н.ном} \cos(\varphi_{н.ном}))}{R_2 + R_{н.факт}} - \frac{\frac{Z_{н.ном} \sin(\varphi_{н.ном})}{\omega} + \frac{X_{н.факт}}{\omega}}{R_2 + R_{н.факт}}, \quad (9)$$

где $T_{s.ном}$ – номинальная постоянная времени вторичного контура при номинальной нагрузке, с; $Z_{н.ном}$ – номинальное полное сопротивление нагрузки ТТ, Ом; $\varphi_{н.ном}$ – номинальный угол нагрузки, подключенной к вторичной обмотке ТТ, °; $X_{н.факт}$ – фактическое индуктивное сопротивление нагрузки ТТ, Ом.

За счет наличия зазора в магнитопроводе постоянная времени вторичного контура таких ТТ существенно ниже, чем у ТТ с замкнутым магнитопроводом, что обеспечивает их быстрое размагничивание в бестоковую паузу. Второе слагаемое в выражении (7), характеризующее работу ТТ при повторном включении на КЗ, может быть рассчитано по формулам, аналогичным для первого КЗ, но на интервале времени от момента возникновения второго КЗ до его ликвидации.

В табл. 1 представлены выведенные аналитические формулы для определения коэффициента переходного режима и котангенса начальной фазы периодической составляющей тока КЗ. Пример графической проверки выведенных формул, указанных в табл. 1, представлен на рис. 1.

Таблица 1. Сводная таблица выведенных аналитических формул

ТТ класса Р, ТРХ ($X_2, X_{н.факт} \neq 0$)	
$K_{н.р}(t)$	$\sin(\alpha) e^{\frac{t}{T_p}} \cos(\vartheta) + \cos(\alpha) \omega T_p (1 - e^{\frac{t}{T_p}}) \cos(\vartheta) - \sin(\omega t + \alpha + \vartheta) + \cos(\alpha) \sin(\vartheta)$
$\text{ctg}(\vartheta)$	$\frac{\cos(\alpha) \omega T_p (1 - e^{\frac{t}{T_p}}) + \sin(\alpha) e^{\frac{t}{T_p}} - \sin(\omega t + \alpha)}{\cos(\alpha) - \cos(\omega t + \alpha)}$
$K_{н.р}(t)$ (модиф.)	$\frac{1}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2(\vartheta)}} \left(\text{ctg}(\vartheta) \left(\sin(\alpha) e^{\frac{t}{T_p}} + \cos(\alpha) \omega T_p (1 - e^{\frac{t}{T_p}}) - \sin(\omega t + \alpha) \right) - \cos(\omega t + \alpha) + \cos(\alpha) \right)$
ТТ класса Р, ТРХ ($X_2, X_{н.факт} = 0$)	
$K_{н.р}(t)$	$\omega T_p (1 - e^{\frac{t}{T_p}}) \cos(\vartheta) - \sin(\omega t + \vartheta) + \sin(\vartheta)$
$\text{ctg}(\vartheta)$	$\frac{\omega T_p (1 - e^{\frac{t}{T_p}}) - \sin(\omega t)}{1 - \cos(\omega t)}$
$K_{н.р}(t)$ (модиф.)	$\frac{1}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2(\vartheta)}} \left(\text{ctg}(\vartheta) \left(\omega T_p (1 - e^{\frac{t}{T_p}}) - \sin(\omega t) \right) - \cos(\omega t) + 1 \right)$
ТТ класса PR, ТРУ, ТРЗ	
$K_{н.р}(t)$	$\omega T_s \left(\frac{e^{\frac{t}{T_s}}}{T_p - T_s} \left(\cos(\vartheta) T_p e^{\frac{t}{T_s} \frac{t}{T_p}} + \frac{\omega T_s \sin(\vartheta) (T_p - T_s) - T_s \cos(\vartheta) (1 + \omega^2 T_s T_p)}{1 + \omega^2 T_s^2} \right) - \right.$ $\left. - \frac{\omega T_s \sin(\omega t + \vartheta) + \cos(\omega t + \vartheta)}{1 + \omega^2 T_s^2} \right)$
$\text{ctg}(\vartheta)$	$\frac{(1 + \omega^2 T_s^2) T_p e^{\frac{t}{T_p}} - e^{\frac{t}{T_s}} T_s (1 + \omega^2 T_s T_p) - (T_p - T_s) (\omega T_s \sin(\omega t) + \cos(\omega t))}{(T_p - T_s) \left(\omega T_s \left(e^{\frac{t}{T_s}} - \cos(\omega t) \right) + \sin(\omega t) \right)}$
$K_{н.р}(t)$ (модиф.)	$\omega T_s \frac{1}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2(\vartheta)}} \left(\frac{e^{\frac{t}{T_s}}}{T_p - T_s} \left(\text{ctg}(\vartheta) T_p e^{\frac{t}{T_s} \frac{t}{T_p}} + \frac{\omega T_s (T_p - T_s) - T_s \text{ctg}(\vartheta) (1 + \omega^2 T_s T_p)}{1 + \omega^2 T_s^2} \right) - \right.$ $\left. - \frac{\omega T_s (\sin(\omega t) \text{ctg}(\vartheta) + \cos(\omega t)) + \cos(\omega t) \text{ctg}(\vartheta) - \sin(\omega t)}{1 + \omega^2 T_s^2} \right)$
ТТ класса PR, ТРУ, ТРЗ (упрощенная запись) *	
$K_{н.р}(t)$	$\frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} (e^{\frac{t}{T_p}} - e^{\frac{t}{T_s}}) \cos(\vartheta) + \sin(\vartheta) e^{\frac{t}{T_s}} - \sin(\omega t + \vartheta)$
$\text{ctg}(\vartheta)$	$\frac{T_p T_s \omega (e^{\frac{t}{T_p}} - e^{\frac{t}{T_s}}) - \sin(\omega t) (T_p - T_s)}{(T_p - T_s) (e^{\frac{t}{T_s}} - \cos(\omega t))}$
$K_{н.р}(t)$ (модиф.)	$\frac{1}{\sqrt{1 + \text{ctg}^2(\vartheta)}} \left(\text{ctg}(\vartheta) \left(\frac{\omega T_p T_s}{T_p - T_s} (e^{\frac{t}{T_p}} - e^{\frac{t}{T_s}}) - \sin(\omega t) \right) + e^{\frac{t}{T_s}} - \cos(\omega t) \right)$

* На основе выражений для расчета $K_{н.р}(t)$, представленных в IEC 61869-100:2017⁷.⁷ International standard IEC 61869-100:2017. Guidance for application of current transformers in power system protection, 2017.

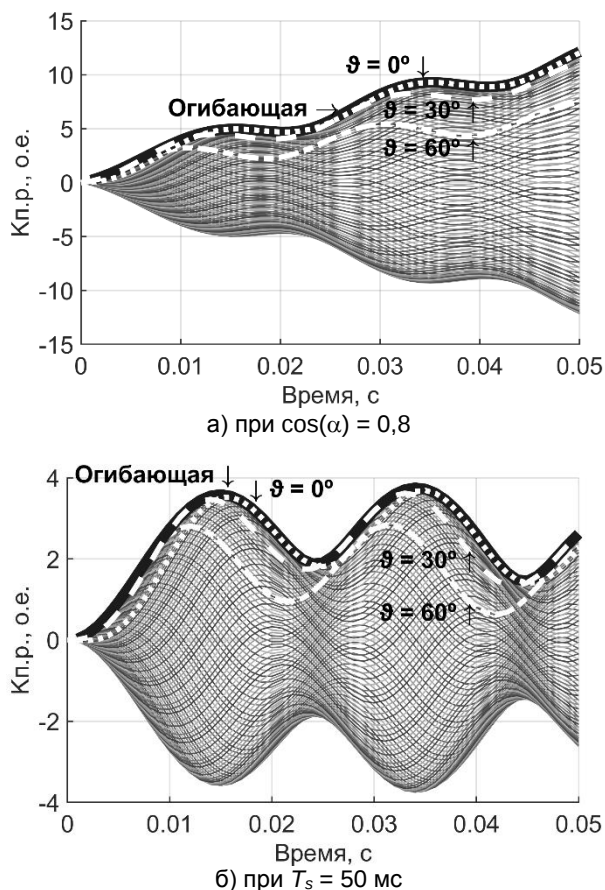


Рис. 1. Семейства кривых коэффициента переходного режима, построенных при различных значениях начальной фазы периодической составляющей тока КЗ, взятых с шагом в 3° , и их огибающая, построенная с использованием выведенных формул: для ТТ класса Р при ненулевой индуктивной нагрузке (а); для ТТ класса ТРУ (б)

Анализируя представленные графики (рис. 1), можно заметить, что по аналитическим выражениям точно строится огибающая к семейству кривых. Кроме графической проверки, выражения были проверены с использованием собственного скрипта [7], выполняющего расчеты времени до насыщения магнитопроводов ТТ, путем варьирования значения начальной фазы периодической составляющей тока КЗ с шагом в 1 градус. В 100 % случаев полученное в скрипте минимальное время до насыщения магнитопровода ТТ и соответствующий этому времени угол КЗ совпадал с результатами, полученными с использованием выведенных аналитических выражений.

Дополнительно выражения были проверены с использованием имитационной модели ТТ и при проведении реальных экспериментов. При фиксированных параметрах модели изменялось значение начальной фазы периодической составляющей тока КЗ для поиска значения, при котором наблюдается минимальное время до насыщения магнитопровода. Так же как и в случае с расчетным скриптом, результаты, полученные по выведенным формулам, совпали с результатами имитационного моделирования и реальных экспериментов.

Выведенные аналитические формулы позволяют получать максимальное значение коэффициента переходного режима в любой заданный момент времени без необходимости проведения множества расчетов, что, в свою очередь, позволяет определять при расчетах минимально возможные времена до насыщения магнитопроводов ТТ.

Особенности расчетов при использовании различных ветвей, питающих место КЗ.

При возникновении КЗ оно подпитывается от нескольких ветвей, имеющих различные установившиеся значения периодической составляющей тока КЗ и постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ. Суммарный ток этих ветвей содержит несколько экспонент, сложенных в одну эквивалентную величину, которая сама по себе снижается не экспоненциально. Эквивалентирование составляющих тока КЗ снижает точность выполняемых расчетов (что особенно актуально для КЗ, возникающих на шинах электростанций) [1]. Повысить точность расчетов возможно за счет использования выражений для токов отдельных ветвей. Анализируя формулы, представленные в табл. 1, можно заметить, что при различных параметрах токов в ветвях, питающих место КЗ, для каждой отдельной ветви будет свое значение начальной фазы периодической составляющей тока КЗ, при котором наблюдается максимально возможное значение коэффициента переходного режима в этой ветви. Однако физически получить «наихудшие» значения фазы во всех ветвях одновременно не представляется возможным, поскольку момент КЗ един для всех ветвей. При расчетах времени до насыщения магнитопровода ТТ следует принять одно расчетное значение фазы, которое, в свою очередь, также может быть получено с использованием выражений, представленных в табл. 1, но содержащих составляющие для отдельных ветвей. Пример записи формул с учетом отдельных ветвей для ТТ с замкнутым магнитопроводом (аналогичным образом выводятся формулы для ТТ классов PR, TPY, TPZ) представлен в табл. 2.

Из-за разницы фаз (φ_i) токов ветвей моменты (углы) возникновения КЗ, соответствующие максимальному значению апериодической составляющей в токе КЗ, различаются. Фазы токов зависят от соотношения индуктивного и активного сопротивлений ветви, которое выражается величиной T_p . Минимальное и максимальное значения T_p , согласно справочным данным [8], составляет 15 и 400 мс соответственно. Разница фаз токов при указанных предельных значениях T_p составляет не более 11 градусов [9]. Разница же значений полного тока для этих граничных случаев составляет не более 2,1 % и при «ручных» расчетах времени до насыщения ТТ может не учитываться. В выражениях, представленных в табл. 2, разница фаз токов ветвей определяется относительно базисной ветви.

Под базисной ветвью понимается ветвь, для которой начальная фаза периодической составляющей тока КЗ соответствует максимальному значению коэффициента переходного режима ($\varphi_i = 0^\circ$). При автоматизированных расчетах

можно учесть разницу фаз токов ветвей за счет итерационных расчетов с варьированием базисной ветви и выбором комбинации с максимальным коэффициентом переходного режима.

Таблица 2. Пример записи аналитических формул для нескольких ветвей, питающих место КЗ

ТТ класса Р, ТРХ ($X_2, X_{н.факт} \neq 0$)	
$K_{п.р}(t)$	$\sum_{i=1}^N \left[\frac{I_{K3,i}}{I_{K3,\Sigma}} \left(\sin(\alpha) e^{-\frac{t}{T_{p,i}}} \cos(\vartheta + \varphi_i) + \cos(\alpha) \omega T_{p,i} (1 - e^{-\frac{t}{T_{p,i}}}) \cos(\vartheta + \varphi_i) - \right. \right. \\ \left. \left. - \sin(\omega t + \alpha + \vartheta + \varphi_i) + \cos(\alpha) \sin(\vartheta + \varphi_i) \right) \right]$
$ctg(\vartheta)$	$\sum_{i=1}^N \left[\frac{I_{K3,i}}{I_{K3,\Sigma}} \left(\frac{\sin(\alpha) e^{-\frac{t}{T_{p,i}}} \cos(\varphi_i) + \cos(\alpha) \omega T_{p,i} (1 - e^{-\frac{t}{T_{p,i}}}) \cos(\varphi_i) - \sin(\omega t + \alpha + \varphi_i) + \cos(\alpha) \sin(\varphi_i)}{\cos(\alpha) \cos(\varphi_i) - \cos(\omega t + \alpha + \varphi_i) - \sin(\alpha) e^{-\frac{t}{T_{p,i}}} \sin(\varphi_i) - \cos(\alpha) \omega T_{p,i} (1 - e^{-\frac{t}{T_{p,i}}}) \sin(\varphi_i)} \right) \right]$
$K_{п.р}(t)$ (модиф.)	$\frac{1}{\sqrt{1 + ctg^2(\vartheta)}} \sum_{i=1}^N \left[\frac{I_{K3,i}}{I_{K3,\Sigma}} \left(\left(ctg(\vartheta) \times \right. \right. \right. \\ \left. \left. \times \left(\sin(\alpha) e^{-\frac{t}{T_{p,i}}} \cos(\varphi_i) + \cos(\alpha) \omega T_{p,i} (1 - e^{-\frac{t}{T_{p,i}}}) \cos(\varphi_i) + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \cos(\alpha) \sin(\varphi_i) - \sin(\omega t + \alpha + \varphi_i) \right) - \right. \right. \\ \left. \left. - \sin(\alpha) e^{-\frac{t}{T_{p,i}}} \sin(\varphi_i) - \cos(\omega t + \alpha + \varphi_i) + \cos(\alpha) \cos(\varphi_i) - \right. \right. \\ \left. \left. - \cos(\alpha) \omega T_{p,i} (1 - e^{-\frac{t}{T_{p,i}}}) \sin(\varphi_i) \right) \right]$
где φ_i – разница фаз базовой и i -й ветвей, °	

Уточненные формулы для расчета нагрузки, подключенной к выводам трехфазной группы ТТ. Не менее важным параметром, оказывающим влияние на время до насыщения магнитопровода ТТ, является величина подключенной нагрузки при различных видах КЗ. В табл. 3 приведены полные и упрощенные аналитические формулы для расчета нагрузки, под-

ключенной к группе трехфазных ТТ, при различных схемах соединения их вторичных обмоток и всех видах КЗ, в том числе для схем «Сумма токов двух звезд». Представленные в табл. 3 формулы выведены с использованием уравнений по первому и второму закону Кирхгофа, составленных для контуров, образуемых вторичными обмотками ТТ и подключенными нагрузками, с учетом нулевого провода (при наличии).

Таблица 3. Сводная таблица формул для расчета нагрузки, подключенной к трехфазной группе ТТ

Схема соединения вторичных обмоток ТТ «Полная звезда»	
Для любого вида КЗ	$\dot{Z}_{ТТ}^k = \dot{Z}_{ПР}^k + \dot{Z}_P^k + \sum R_{ПЕР}^k + \frac{j_2^A + j_2^B + j_2^C}{j_2^k} (\dot{Z}_{ПР}^0 + \dot{Z}_P^0 + \sum R_{ПЕР}^0)$
$K^{(1)*}$	$\dot{Z}_{ТТ}^k = 2 \cdot R_{ПР} + R_P^k + R_P^0 + 2 \cdot \sum R_{ПЕР}$
$K^{(2)}, K^{(3)}$	$\dot{Z}_{ТТ}^k = R_{ПР} + R_P^k + \sum R_{ПЕР}$
$K^{(1,1)}$	$\dot{Z}_{ТТ}^k = R_{ПР} + R_P^k + \sum R_{ПЕР} \quad (\text{при } X_{0\Sigma} \rightarrow \infty)$ $\dot{Z}_{ТТ}^k = R_{ПР} + R_P^k + \sum R_{ПЕР} + (1 + e^{j60^\circ}) \cdot (R_{ПР} + R_P^0 + \sum R_{ПЕР}) \quad (\text{при } X_{0\Sigma} \rightarrow 0)$
Схема соединения вторичных обмоток ТТ «Треугольник»	
Для любого вида КЗ	$\dot{Z}_{ТТ}^k = - \left(\frac{\sum j_{2,фаз} - 2 \cdot j_2^k}{j_2^k} \right) (\dot{Z}_{ПР}^k + \dot{Z}_P^k + \sum R_{ПЕР}^k)$
$K^{(1)}$	$\dot{Z}_{ТТ}^k = 2 \cdot R_{ПР} + 2 \cdot R_P^k + 2 \cdot \sum R_{ПЕР}$
$K^{(2)}, K^{(3)}$	$\dot{Z}_{ТТ}^k = 3 \cdot R_{ПР} + 3 \cdot R_P^k + 3 \cdot \sum R_{ПЕР}$
$K^{(1,1)}$	$\dot{Z}_{ТТ}^k = 3 \cdot R_{ПР} + 3 \cdot R_P^k + 3 \cdot \sum R_{ПЕР} \quad (\text{при } X_{0\Sigma} \rightarrow \infty)$ $\dot{Z}_{ТТ}^k = (2 - e^{j60^\circ}) (R_{ПР} + R_P^k + \sum R_{ПЕР}) \quad (\text{при } X_{0\Sigma} \rightarrow 0)$

Окончание табл. 3

Схема соединения вторичных обмоток ТТ «Сумма токов двух звезд»	
Для любого вида КЗ	$\dot{Z}_{\text{ТТ}}^k = \frac{i_2^{k1} + i_2^{k2}}{i_2^{k1}} (\dot{Z}_{\text{ПР}}^k + \dot{Z}_{\text{Р}}^k + \sum R_{\text{ПЕР}}^k) + \frac{i_2^{A1} + i_2^{A2} + i_2^{B1} + i_2^{B2} + i_2^{C1} + i_2^{C2}}{i_2^{k1}} (\dot{Z}_{\text{ПР}}^0 + \dot{Z}_{\text{Р}}^0 + \sum R_{\text{ПЕР}}^0)$
$K^{(1)}$	$\dot{Z}_{\text{ТТ}}^k = 4 \cdot R_{\text{ПР}} + 2 \cdot R_{\text{Р}}^k + 2 \cdot R_{\text{Р}}^0 + 4 \cdot \sum R_{\text{ПЕР}}$
$K^{(2)}, K^{(3)}$	$\dot{Z}_{\text{ТТ}}^k = 2 \cdot R_{\text{ПР}} + 2 \cdot R_{\text{Р}}^k + 2 \cdot \sum R_{\text{ПЕР}}$
$K^{(1,1)}$	$\dot{Z}_{\text{ТТ}}^k = 2 \cdot R_{\text{ПР}} + 2 \cdot R_{\text{Р}}^k + 2 \cdot \sum R_{\text{ПЕР}} \quad (\text{при } X_{0\Sigma} \rightarrow \infty)$ $\dot{Z}_{\text{ТТ}}^k = 2 \cdot R_{\text{ПР}} + 2 \cdot R_{\text{Р}}^k + 2 \cdot \sum R_{\text{ПЕР}} + (2 + 2 \cdot e^{j60^\circ}) (R_{\text{ПР}} + R_{\text{Р}}^0 + \sum R_{\text{ПЕР}}) \quad (\text{при } X_{0\Sigma} \rightarrow 0)$
*Формулы для отдельных КЗ получены преобразованием формулы для любого вида КЗ с учетом соотношений токов при конкретных КЗ и следующих допущений: $X_{\text{ПР}} = (1,5 - 6\%) R_{\text{ПР}} \rightarrow \dot{Z}_{\text{ПР}}^{k,0} \approx R_{\text{ПР}}^k = R_{\text{ПР}}^0 = R_{\text{ПР}},$ $\text{imag}(\dot{Z}_{\text{Р}}^{k,0}) = 0 \rightarrow \dot{Z}_{\text{Р}}^{k,0} = R_{\text{Р}}^{k,0},$ $\sum R_{\text{ПЕР}}^k = \sum R_{\text{ПЕР}}^0 = \sum R_{\text{ПЕР}} = 0,05 \text{ Ом},$ где $\dot{Z}_{\text{ТТ}}^k$ – полное сопротивление, подключенное к ТТ k-й фазы, Ом; $\dot{Z}_{\text{ПР}}^k$ – полное сопротивление провода k-й фазы, Ом; $\sum R_{\text{ПЕР}}^k$ – суммарное переходное активное сопротивление контактов в проводе k-й фазы, Ом; $\dot{Z}_{\text{Р}}^k$ – полное сопротивление реле, установленного в проводе k-й фазы, Ом; $i_2^{A(B,C)}$ – полный ток, протекающий в проводе фазы А(В,С), А; i_2^k – полный ток, протекающий в проводе k-й фазы, А; $i_2^{A(B,C)1,2}$ – полный ток, протекающий в проводе фазы А(В,С) первого или второго ТТ, рассматриваемого в схеме «Сумма токов двух звезд», А; i_2^{k1} – полный ток, протекающий в проводе k-й фазы ТТ, рассматриваемого в схеме «Сумма токов двух звезд», А; $\dot{Z}_{\text{ПР}}^0$ – полное сопротивление нулевого провода, Ом; $\sum R_{\text{ПЕР}}^0$ – суммарное переходное активное сопротивление контактов в нулевом проводе, Ом; $\dot{Z}_{\text{Р}}^0$ – полное сопротивление реле, установленного в нулевом проводе, Ом; $X_{\text{ПР}}$ – индуктивное сопротивление провода, Ом; $X_{0\Sigma}$ – эквивалентное сопротивление нулевой последовательности, входящее в состав шунта КЗ, Ом.	

В записи формул для отдельных КЗ при схеме «Сумма токов двух звезд» в качестве упрощения было принято, что токи, протекающие через соединенные ТТ, одинаковы по величине и имеют одинаковое значение T_p . На практике токи, протекающие по нагрузке от различных ТТ, не равны друг другу, что, в свою очередь, обуславливает сильное различие расчетных сопротивлений нагрузки для каждого из ТТ. Минимальное время до насыщения может наблюдаться не при минимальном или максимальном значении тока КЗ (максимальном или минимальном значении сопротивления нагруз-

ки соответственно) (табл. 4), в связи с чем уверенно сделать итоговый вывод о правильности работы УРЗА в таких условиях затруднительно без выполнения дополнительного моделирования, чем и обуславливается сложность анализа работы таких ТТ.

Расчетные формулы для определения нагрузок при различных КЗ были выведены и для ТТ, соединенных по схемам «Неполная звезда» и «Неполный треугольник», но, учитывая редкость применения данных схем, в табл. 3 они не представлены.

Таблица 4. Пример результатов расчетов времени до насыщения магнитопроводов ТТ, соединенных по схеме «Сумма токов двух звезд»

Величина тока трехфазного КЗ, протекающего через рассматриваемый ТТ относительно тока КЗ, протекающего через второй ТТ, %	При отсутствии остаточной намагниченности (0 %), мс		При наличии остаточной намагниченности (86 %), мс	
	ТГ-220	SAS-500/5G	ТГ-220	SAS-500/5G
10	29,4	45,6	4,8	5,6
30	26,4	29,2	4,2	5,6
50	∞	25,9	9,9	5,3
70	∞	14,5	11,6	5,0
100	∞	11,6	14,1	4,7

Разработка программных средств для автоматизации расчетов. Использование выведенных аналитических формул позволило автоматизировать графические методы расчетов времени до насыщения магнитопровода ТТ в виде программного расчетного сервиса⁸, внешний вид которого представлен на рис. 2.

Программа подразумевает ввод исходных данных о ТТ в табличном формате (или загрузку из встроенной базы данных). Программа интегрирована с модулем расчета токов КЗ, позволяющим также определять значения T_p в месте установки ТТ. Размещая проверяемые ТТ в нужных местах имитационной модели проектируемого энергообъекта, автоматически рассчитываются необходимые данные о токах КЗ.

Лаборатория РЗА

Главная

Модель сети

Трансформаторы тока

БД

СОПТ

Инструменты

О нас

Проект

Расчет

Справка

Расчет параметров

Выбор

Проверка

Время до насыщения

Универсаль ТТ

Наименование объекта ЭЗ

Данные КЗ

Наименование ТТ

Марка ТТ

Определить коэффициент предельной кратности ТТ по ВАР

Параз. или посл. соединение

Класс точности

Верхний

Нижний

Смешан

Смешан

Кном

К12 ном

Ка

Сторона (При наличии)

Линия (При наличии)

вт (При наличии)

Схема соединения

Параз. или посл. соединение

Данные по фазам

в Устройство в

Выбор из БД

Наименование устройства РЗА

Защиты

t насыщения вх кз

t насыщения вы кз

Проверка

Тест ТТ2

TA2

ТЭЗМ-500-6-IV

Тест ТТ3

TA3

JK EL C83

Тест ТТ4

TA4

ТРГ-УТМ-6-500-10P

5P

10P

5P

10P

1000

2000

4000

2000

1

1

1

1

30

30

20

30

0.8

0.8

0.8

0.8

0.35

18

20

40

1

1

1

1

0.86

0.86

0.0082

0.86

1.3

1.2

4000

4000

Сумма токов двуп

Полная звезда

Полная звезда

Полная звезда

Нет данных

Нет данных

Нет данных

Нет данных

в Устройство в

в Устройство в

в Устройство в

в Устройство в

РЗА

Терминал

Терминал

Терминал

РЗА

ДЗТ, МТЗ, УРОВ ВН

ДЗТ, МТЗ, УРОВ ВН

ДЗТ, МТЗ, УРОВ ВН

0.01

0.005

0.005

0.005

0.01

0.005

0.005

0.005

a)

ТТ № 1 / Фазы

	№ 1	№ 2	№ 3
Учитывать при расчёте	☒	☒	☒
Фаза	A	B	C
R_2^*	0м	7.51	7.51
X_2^*	0м	0	0
T_2	с		
BAX	B(A)		
B(N)	T(A/N)		
Замер нагрузки керн	-		
В Нагрузку В	В Нагрузку В	В Нагрузку В	В Нагрузку В
Материал жил кабеля	Медь	Медь	Медь
Параметры контрольного кабеля			
Кожух	шт.	1	1
Резле фаз	0м	0	0
Резле оплывов	0м	0	0

6)

Рис. 2. Внешний вид интерфейсов ввода общих (а) и данных по фазам (б) разработанного программного сервиса, реализующего выведенные аналитические выражения и способы расчета времени до насыщения магнитопроводов ТТ

Данные о токах КЗ могут быть также внесены пользователем в табличном формате. Стоит отметить, что расчеты времени до насыщения магнитопроводов ТТ при проектных работах часто связаны с расчетом токов КЗ для

выбора первичного оборудования и/или параметров срабатывания УРЗА, что делает функционал размещения ТТ на имитационной модели очень удобным и сокращает время и трудозатраты при выполнении расчетов. Программа позволяет рассчитывать все классы ТТ (Р, РR, ТРХ, ТРУ, ТРZ) как при ликвидации первого КЗ, так и в цикле АПВ. Для повышения точности выполняемых расчетов программа позволяет автоматически использовать каталожные данные об индуктивном сопротивлении кабелей и соответствующие расчетные формулы. Повышение точности также достигается выполнением расчетов по отдельным ветвям, питающим точку КЗ, за счет автоматического определения T_p отдельных ветвей и учета фактических значений фаз токов в этих ветвях.

Разработанная программа вычисляет значения и фазы токов, протекающих во вторичных цепях трехфазной группы ТТ, что позволяет использовать представленные в табл. 3 полные формулы для расчета нагрузки. При расчетах доступны все возможные группы соединения вторичных обмоток ТТ, а при размещении ТТ на имитационной модели энергообъекта имеется возможность автоматически рассчитать время до насыщения магнитопровода ТТ при всех возможных видах КЗ. Такой подход позволяет повысить точность расчетов, особенно для ТТ, соединенных по схеме «сумма токов двух звезд», поскольку учитывается реальное распределение токов между двумя ТТ и соответствующие значения подключенной нагрузки.

Выводы. Предложенный комплекс исследований направлен на создание аналитических выражений для определения начальной фазы периодической составляющей тока КЗ, при котором достигается минимальное время до насыщения магнитопроводов ТТ (классов Р, PR, TPX, TPY, TPZ) при первом и втором (в цикле АПВ) КЗ. Использование этих выражений существенно упрощает проведение расчетов времени до насыщения магнитопроводов ТТ за счет отсутствия необходимости проведения множества однотипных расчетов при различных значениях начальной фазы периодической составляющей тока КЗ или ручного использования графических материалов. Выведенные выражения и выполненный анализ расчетов при использовании отдельных ветвей позволяет также повысить точность таких расчетов. Приведенные формулы расчета величины нагрузки для схем соединения трехфазных групп ТТ «Сумма токов двух звезд», «Неполная звезда» и «Неполный треугольник» позволяют расширить применение требований ГОСТ Р 58669-2019 для таких редких, но все еще встречаемых случаев эксплуатации ТТ. Приведенные формулы расчета нагрузки для случаев двухфазных КЗ позволяют точно определить время до насыщения ТТ при таких КЗ, что исключает ложно отрицательные

⁸ Сайт облачного сервиса для проектирования и моделирования в электроэнергетике «Лаборатория РЗА». Раздел трансформаторов тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://labrza.ru/>

результаты проверки совместной работы ТТ и УРЗА, реагирующих на составляющие токов при таких КЗ (например, ТЗНП, ДФЗ или НВЧЗ). Использование общих формул для расчета нагрузок с учетом вторичных токов позволит повысить точность расчетов, особенно для ТТ, соединенных по схеме «Сумма токов двух звезд».

Результаты исследования внедрены в облачный сервис для моделирования объектов электроэнергетики⁹ и доступны для использования инженерам-проектировщикам. Использование разработанной программы позволяет повысить точность расчетов и существенно сократить время и трудозатраты на их выполнение.

Список литературы

1. **Анализ** результатов исследований времени до насыщения магнитопроводов трансформаторов тока электроэнергетических объектов / А.А. Яблоков, А.В. Панащенко, Н.А. Родин, А.С. Лифшиц // Релейная защита и автоматизация. – 2023. – № 2(51).
2. **Королев Е.П., Либерзон Э.М.** Расчеты допустимых нагрузок в токовых цепях релейной защиты. – М.: Изд-во «Энергия», 1980. – 208 с.
3. **Проектирование** кабельных сетей и проводок / под общ. ред. Г.Е. Хромченко. – М.: Энергия, 1980. – 383 с.
4. **Определение** остаточных магнитных индукций в тороидальных сердечниках трансформаторов тока класса Р для релейной защиты / А.А. Дегтярев, С.Л. Кузнецов, Н.А. Дони, А.А. Шурупов // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3(44). – С. 44–57. – EDN QTYAM.
5. **Соловьев В.А. Колобродов Е.Н., Рыбин Д.С.** Особенности работы дифференциальной защиты при подключении к ТТ с различными классами точности // Электрические станции. – 2023. – № 9. – С. 26–34.
6. **О применении** трансформаторов тока с немагнитными зазорами для устройств релейной защиты / В.С. Воробьев, В.В. Москаленко, А.И. Расщепляев и др. // Энергетик. – 2022. – № 5. – С. 20–26. – EDN MVVPAJ.
7. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022615025 Российская Федерация. Программа для определения времени до насыщения магнитопроводов трансформаторов тока: дата поступления 21.03.22; в реестре программ для ЭВМ 29.03.22 / А.А. Яблоков, А.В. Панащенко, Е.Е. Готовкина; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».
8. **Электротехнический** справочник: в 3 т. / под общ. ред. И.Н. Орлова. – 7-е изд., испр. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985–1988. Т. 3: в 2 кн., кн. 1: Производство и распределение электрической энергии. – 1988. – 878 с.
9. **Математическое** моделирование переходных процессов электроэнергетических систем: лабораторный практикум / А.Е. Аржанникова, А.А. Братолубов, В.П. Голов и др.; Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2019. – 148 с. – EDN GSCIOU.
10. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025619089 Российская Федерация. Облачный сервис «Лаборатория РЗА»: дата поступления

19.03.25; в реестре программ для ЭВМ 14.04.25 / А.С. Лифшиц, А.А. Яблоков, А.Ю. Мурзин и др.; заявитель и правообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Лаборатория РЗА».

References

1. Yablokov, A.A., Panashchenko, A.V., Rodin, N.A., Lifshits, A.S. Analiz rezul'tatov issledovaniy vremeni do насыshcheniya magnitoprovodov transformatorov toka elektroenergeticheskikh ob'ektov [Analysis of the results of studies of the time to saturation of magnetic cores of current transformers of electric power facilities]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2023, no. 2(51).
2. Korolev, E.P., Liberzon, E.M. *Raschety dopustimyykh nagruzok v tokovykh tsepyakh releynoy zashchity* [Calculations of permissible loads in current circuits of relay protection]. Moscow: Izdatel'stvo «Energiya», 1980. 208 p.
3. Khromchenko, G.E. (ed.) *Proektirovaniye kabel'nykh setey i provodok* [Design of cable networks and wiring]. Moscow: Energiya, 1980. 383 p.
4. Degtyarev, A.A., Kuzhekov, S.L., Doni, N.A., Shurupov, A.A. Opredeleniye ostatochnykh magnitnykh induktsiy v toroidal'nykh serdchnikakh transformatorov toka klassa R dlya releynoy zashchity [Determination of residual magnetic inductions in toroidal cores of class P current transformers for relay protection]. *Releynaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2021, no. 3(44), pp. 44–57. EDN QTYAM.
5. Solov'ev, V.A., Kolobrodov, E.N., Rybin, D.S. Osobennosti raboty differentsial'noy zashchity pri podklyuchenii k TT s razlichnymi klassami tochnosti [Features of differential protection operation when connected to CTs with different accuracy classes]. *Elektricheskie stantsii*, 2023, no. 9, pp. 26–34.
6. Vorob'ev, V.S., Moskalenko, V.V., Rasshcheplyayev, A.I., Nudel'man, G.S., Onisova, O.A., Navolochnyy, A.A., Naumov, I.A. O primenении transformatorov toka s nemagnitnymi zazorami dlya ustroystv releynoy zashchity [On use of current transformers with non-magnetic gaps for relay protection devices]. *Energetik*, 2022, no. 5, pp. 20–26. EDN MVVPAJ.
7. Yablokov, A.A., Panashchenko, A.V., Gotovkina, E.E. *Programma dlya opredeleniya vremeni do насыshcheniya magnitoprovodov transformatorov toka* [Program for determination of time to saturation of current transformer magnetic circuits]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM [Certificate of state registration of computer program]. No. 2022615025 RF, 2022.
8. Orlov, I.N. (ed.) *Elektrotekhnicheskiiy spravochnik: v 3 t., t. 3: v 2 kn., kn. 1: Proizvodstvo i raspredeleniye elektricheskoy energii* [Electrical engineering handbook: in 3 vols., vol. 3: in 2 books, book 1: Production and distribution of electrical energy]. Moscow: Energoatomizdat, 1985–1988. 878 p.
9. Arzhannikova, A.E., Bratolyubov, A.A., Golov, V.P., Il'ichev, N.B., Katulin, A.V., Kormilitsyn, D.N., Molchagina, K.D., Moskvina, I.A., Ogorelyshev, N.A., Sidorov, A.V. *Matematicheskoye modelirovaniye perekhodnykh protsessov elektroenergeticheskikh sistem* [Mathematical modeling of transient processes in electric power systems]. Ivanovo, 2019. 148 p.
10. Lifshits, A.S., Yablokov, A.A., Murzin, A.Yu., Petrov, A.E., Panashchenko, A.V. *Oblachnyy servis «Laboratoriya RZA»* [Cloud service “RZA Laboratory”]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM [Certificate of state registration of computer program]. No. 2025619089 RF, 2025.

⁹ Сайт облачного сервиса для проектирования и моделирования в электроэнергетике «Лаборатория РЗА». Раздел трансформаторов тока [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://labrza.ru/>