

О СТАНДАРТИЗАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К ТРАНСФОРМАТОРАМ ТОКА И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИМ УСТРОЙСТВАМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

КУЖЕКОВ С.Л., главный инженер ООО НПФ «Квазар»

ДЕГТЯРЕВ А.А., ведущий инженер ООО НПФ «Квазар»

ДОНИ Н.А., директор по научной работе ООО НПП «ЭКРА»

ШУРУПОВ А.А., заведующий отделом разработки подстанционного оборудования ООО НПП «ЭКРА»

В настоящее время проводится обсуждение проектов стандартов, связанных с требованиями к трансформаторам тока (ТТ) для релейной защиты. Указанные проекты относятся к функционированию ТТ и быстродействующих устройств релейной защиты (УРЗ) в переходных режимах с наличием в первичном токе апериодической составляющей, сопровождающихся насыщением магнитопроводов электромагнитных ТТ. При этом затронуты вопросы стандартизации технических характеристик ТТ, выбора ТТ и испытаний УРЗ в переходных режимах. Тематика проектов стандартов имеет высокую актуальность, что подтверждается Руководящими документами Правительства и Минэнерго Российской Федерации.

В статье приведен анализ понятия «критерий насыщения ТТ классов Р и PR в переходном режиме» и терминов «номинальная и максимальная предельные кратности первичного тока», а также выражения для выбора номинальной предельной кратности ТТ классов Р и PR, сформулированы замечания по методологии испытаний быстродействующих УРЗ в переходных режимах КЗ с наличием в первичных токах ТТ апериодической составляющей и предложены расчетные значения остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ класса Р.

Ключевые слова: трансформаторы тока, быстродействующие устройства релейной защиты, насыщение трансформаторов тока, переходные режимы

ON THE STANDARDIZATION OF REQUIREMENTS FOR CURRENT TRANSFORMERS AND HIGH-SPEED RELAY PROTECTION DEVICES IN TRANSIENT SHORT CIRCUIT CONDITIONS

S.L. KUZNEKOV, A.A. DEGTYAREV, N.A. DONI, AND A.A. SHURUPOV

The article analyzes the concept of «saturation criterion for CTs of classes P and PR in transient mode» and the terms «nominal and maximum limiting ratios of the primary current», as well as expressions for choosing the nominal limiting ratios of CTs of classes P and PR, comments are made on the methodology for testing high-speed URZ in transient short-circuit modes with the presence of an aperiodic component in the primary currents of the CT and the calculated values of the residual magnetic induction in the magnetic circuits of class R CT are proposed.

Keywords: current transformers, high-speed relay protection devices, saturation of current transformers, transient conditions

В связи с требованиями Руководящих документов правительства и Минэнерго Российской Федерации, в частности [1], выполняются работы по обеспечению правильного функционирования быстродействующих устройств релейной защиты (УРЗ) в переходных режимах коротких замыканий (КЗ) с наличием в токе апериодической составляющей, сопровождающихся насыщением сердечников электромагнитных трансформаторов тока (ТТ). В соответствии с этим в 2020–2021 гг. для объектов электроэнергетики ЕЭС России, на которых существуют повышенные риски неправильной работы быстродействующих устройств релейной защиты (РЗ) в переходных режимах коротких замыканий (КЗ), выполнялись расчеты времени до насыщения ($t_{\text{нас}}$) ТТ класса Р (без немагнитного зазора в магнитопроводе). На основании проведенных расчетов предписывалось определить требования к техническим характеристикам быстродействующих защит в части минимально необходимого времени достоверного измерения значения тока ТТ ($t_{\text{рз}}$), при котором обеспечивается правильная работа указанных защит.

В настоящее время проводится обсуждение проектов стандартов, связанных с требованиями к техническим характеристикам ТТ [2], выбора ТТ [3] и испытаний УРЗ в переходных режимах КЗ [4].

Цель статьи заключается в анализе положений, выдвинутых в указанных проектах стандартов, относящихся к терминологии, а также к методикам выбора ТТ для релейной защиты и испытаний быстродействующих УРЗ в переходных режимах КЗ.

Условия проверки соответствия параметров ТТ и быстродействующих УРЗ в переходных режимах КЗ – важный элемент выбора технических характеристик указанных устройств. Анализ показал, что условия правильного функционирования быстродействующих устройств РЗ при насыщении магнитопроводов ТТ в переходных режимах имеют следующий вид.

В переходных режимах КЗ в зоне действия защиты время до насыщения ТТ ($t_{\text{нас.1}}$) должно удовлетворять условию:

$$t_{\text{нас.1}} \geq t_{\text{рз.1}} \quad (1)$$

где $t_{\text{рз.1}}$ – время достоверного измерения тока ТТ функцией защиты при КЗ в зоне действия.

При КЗ вне зоны действия защита не должна срабатывать, поэтому радикальным условием, исключающим излишнее срабатывание защиты, является соотношение:

$$t_{\text{нас.2}} \geq t_{\text{откл.}} \quad (2)$$

где $t_{\text{нас.2}}$ – время до насыщения ТТ в переходном режиме внешнего КЗ;

$t_{\text{откл.}}$ – время отключения внешнего КЗ быстродействующей защитой поврежденного элемента системы.

Из-за неопределенности значения времени отключения внешнего КЗ условие (2) практически не реализуемо.

В настоящее время в ряде устройств РЗ используется специальный блокирующий орган (БО), распознающий режимы КЗ вне зоны действия защиты. При наличии такого органа условие (2) для всех электромагнитных ТТ принимает вид:

$$t_{\text{нас.2}} \geq t_{\text{БО}} \quad (3)$$

где $t_{\text{БО}}$ – время достоверного измерения тока ТТ функцией БО.

Если в устройстве защиты БО отсутствует, то правильное функционирование РЗ должно обеспечиваться выбором уставок по уточненным методикам. В указанных методиках должны учитываться повышенные погрешности ТТ в переходных режимах, обусловленные наличием в токах КЗ апериодической составляющей.

В случае использования в качестве источника информации о токе ТТ с немагнитным зазором в магнитопроводе условие правильной работы защиты без БО при КЗ вне зоны имеет вид:

$$A \cdot (1 - K_r) \geq K_{\text{н.р}}(t_{\text{max}}), \quad (4)$$

где A – параметр режима работы ТТ; $K_{\text{н.р}}(t_{\text{max}})$ – значение коэффициента переходного режима работы ТТ в момент достижения максимума погрешностей t_{max} ; K_r – коэффициент остаточной намагниченности (обозначения приняты в соответствии с отечественным стандартом [5]).

Если условие (4) выполняется, то ТТ с немагнитным зазором соответствует требованиям со стороны УРЗ. В противном случае необходимо либо выбрать другой ТТ, либо выбрать уставки защит с учетом повышенных погрешностей ТТ в переходных режимах. Расчет указанных погрешностей представляет собой самостоятельную задачу и в рамках данной статьи не рассматривается.

О критерии насыщения ТТ в переходном режиме

Критерием насыщения в стандарте [6] и в проекте стандарта [2] является достижение потокоцеплением взаимной индукции ТТ уровня насыщения Ψ_{SAT} , соответствующего полному насыщению материала магнитопровода. Так как УРЗ могут правильно функционировать только до определенных степеней насыщения материала магнитопровода, то в расчетах и в анализе поведения УРЗ используются допустимые значения намагничивающего тока ТТ i_0 , а также ЭДС вторичной обмотки e_2 .

В стандарте [6] и проекте стандарта [2] допустимое предельное мгновенное значение i_0 , отнесенное к амплитуде периодической составляющей первичного тока, обозначено как i_{ε} . Допустимое действующее значение намагничивающего тока ТТ обозначают как I_{ε} .

У ТТ с немагнитным зазором классов ТРХ, ТРУ в переходных режимах нормируют максимальные допустимые мгновенные погрешности, обозначаемые как $\hat{\varepsilon}_{\text{max}}$. Для ТТ класса ТРЗ нормированы погрешности по амплитуде переменной составляющей вторичного тока, обозначаемые как $\hat{\varepsilon}_{\text{ac}}$. Для ТТ классов Р и РР в [6] нормированы значения комплексной (полной) погрешности ε_c при периодическом токе. Понятие номинальной предельной кратности тока $K_{\text{ном}}$ используется только для ТТ классов Р и РР. В условиях допустимых погрешностей ТТ с немагнитным зазором классов ТРХ, ТРУ, ТРЗ характеризуются номинальной кратностью периодической составляющей K_{ssc} тока КЗ (при номинальной апериодической составляющей).

В проекте стандарта [2] нормируются погрешности в переходном режиме для ТТ классов ТРХ, ТРУ, ТРЗ, причем для всех ТТ используется понятие номинальной предельной кратности тока $K_{\text{ном}}$ при отсутствии в первичном токе апериодической составляющей.

В качестве характеристики ТТ в стандарте [6] и в проекте стандарта [2] используется время достижения измеряемым

током допустимых погрешностей t_{al} и $t_{нас}$, т.е. достижения намагничивающим током допустимого значения. Данная характеристика удобна при испытаниях, если имеется возможность измерения первичного и вторичного токов ТТ.

Так как мгновенное значение ЭДС вторичной обмотки ТТ равно производной потокосцепления вторичной обмотки ТТ, взятой с противоположным знаком:

$$e = -\frac{d\Psi_2}{dt},$$

то в качестве характеристики ТТ в [6,7] используются допустимые действующие значения ЭДС вторичной обмотки. Для ТТ классов Р и PR используется:

$$E_{ALF} = K_{ном} \cdot I_{2ном} \cdot |R_2 + R_{н,ном}| \quad (5)$$

а для ТТ классов TPX, TPY, TPZ:

$$E_{al} = K_{ssc} \cdot K_{п,р,ном} \cdot I_{2ном} \cdot |R_2 + R_{н,ном}| \quad (6)$$

причем в соответствии с [7]:

$$E_{al} \approx E_{ALF}, \quad (7)$$

где $R_2, R_{ном}$ – активное сопротивление вторичной обмотки и номинальное сопротивление нагрузки ТТ (принято имеющим активный характер); $K_{п,р,ном}$ – номинальное значение коэффициента переходного режима.

Следует отметить, что в общем случае следует учитывать активно-индуктивный характер сопротивлений вторичной обмотки и нагрузки.

Практическое использование значений EALF целесообразно, если имеются достаточно точные значения $K_{ном}$, так как паспортные их значения часто приводятся со существенным запасом. Представляется, что производители должны приводить в технической документации значения ЭДС вторичных обмоток ТТ в точке перегиба ВАХ и значения коэффициента перехода от указанных ЭДС к EALF.

Терминология, относящаяся к требованиям ТТ в переходных режимах КЗ

Необходимость уточнения терминологии связана с неоднозначными подходами к расчетам времени до насыщения ТТ, предписанными [1]. Производители УРЗ в соответствии с требованиями [16] разрабатывают методы проверки и выбора ТТ с учетом специфики реализации отдельных защит, в частности [11]. Новизна проблемы и контроль исполнения требований [16] при разработке проектной документации привели к большому объему запросов производителям защит от проектных организаций и предприятий МЭС о подтверждении работоспособности планируемых к установке защит с учетом результатов выполненных расчетов, на которые не всегда можно было дать аргументированные ответы.

Хотя в подзаголовке к [2] сделана ссылка на стандарт МЭК по требованиям к ТТ в переходных режимах [6], фактически имеются противоречия между указанными документами. В частности, можно отметить следующее. С одной стороны, в [6] в одну группу объединены ТТ классов Р и PR, а в [2] в одной группе находятся ТТ классов PR, TPY и TPZ. Вследствие этого в [2] на все электромагнитные ТТ распространено понятие предельной кратности первичного тока. С другой стороны, в [6], в отличие от [2], на ТТ класса

Р не распространяется понятие постоянной времени вторичного контура T_s .

Представляется, что различие в терминологии объясняется стремлением исключить необходимость проведения испытаний реальных ТТ при высоких кратностях токов в переходных режимах с наличием апериодической составляющей. Такой подход следует отнести к временной мере до создания специального испытательного стенда для переходных режимов.

Предельная кратность первичного тока и предельное вторичное напряжение ТТ классов Р и PR

Важная характеристика рассматриваемых ТТ – предельная кратность первичного тока. Понятия предельной кратности и номинальной предельной кратности в установившемся режиме работы (при отсутствии апериодической составляющей в первичном токе) определены в [8]:

- предельная кратность ТТ – наибольшее значение кратности первичного тока, при котором полная погрешность при заданной вторичной нагрузке не превышает 10 %;
- номинальная предельная кратность ТТ $K_{ном}$ – гарантируемая ТТ предельная кратность при номинальной вторичной нагрузке.

В проекте ГОСТ Р [2] предложено использовать два понятия предельной кратности:

- номинальная предельная кратность $K_{ном}$ при номинальной вторичной нагрузке;
- максимальная предельная кратность K_{max} при номинальной вторичной нагрузке.

При этом приведено выражение, устанавливающее связь между этими понятиями:

$$K_{max} = K_{п,р,max} \cdot K_{ном} \quad (8)$$

где $K_{п,р,max}$ – максимальное значение коэффициента переходного режима.

Отмечено, что указанный коэффициент равен отношению потокосцепления насыщения, к потокосцеплению, соответствующему току погрешности при токе номинальной предельной кратности, не содержащем апериодической составляющей. Таким образом, максимальная предельная кратность K_{max} является характеристикой ТТ в переходном режиме.

Однако в соответствии с [5] следует различать два понятия: коэффициент переходного режима $K_{п,р}(t)$ и параметр режима работы ТТ А.

Коэффициентом переходного режима $K_{п,р}(t)$ называют отношение мгновенного значения потокосцепления вторичной обмотки ТТ в переходном режиме $\Psi_2(t)$ к амплитуде потокосцепления вторичной обмотки Ψ_{2m} , которая имела бы место при идеальной трансформации первичного тока, т.е. при отсутствии насыщения сердечника. Указанное отношение показывает, во сколько раз при заданных значениях периодической составляющей первичного тока и сопротивления ветви вторичного тока потокосцепление (и магнитная индукция в сердечнике ТТ) возрастают в переходном процессе по отношению к установившемуся режиму.

Параметр режима работы ТТ А определяется по выражению [10]:

$$A = \frac{\Psi_{нас}}{\Psi_m} = \frac{B_{нас}}{B_m} = \frac{U_{нас}}{U_{2sin}}, \quad (9)$$

где $\Psi_{\text{нас}}, \Psi_m$ – соответственно, потокоцепление насыщения вторичной обмотки ТТ и потокоцепление вторичной обмотки, созданное вторичным током ТТ при идеальной трансформации первичного тока и заданном сопротивлении ветви вторичного тока, включая нагрузку; $B_{\text{нас}}$ – магнитная индукция насыщения; $B_m = (I_1 \cdot z_2) / (\omega \cdot w_2 \cdot S)$ – магнитная индукция, созданная вторичным током ТТ при идеальной трансформации первичного тока и заданном сопротивлении ветви вторичного тока, включая нагрузку; $U_{\text{нас}}$ – напряжение на вторичной обмотке, соответствующее насыщению сердечника; $U_{2\text{sin}} = K_{\text{факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma}$ – напряжение на вторичной обмотке при вторичном номинальном токе $I_{2\text{ном}}$, кратности синусоидального тока $K_{\text{факт}}$ и суммарном сопротивлении вторичного контура $z_{2\Sigma}$.

В России ТТ класса Р выбирают по условию 10%-й погрешности в установившемся режиме, т.е. по условию равенства единице значения параметра режима работы ТТ А. По указанной причине, строго говоря, в выражении (5) проектов стандарта (2–4) вместо $K_{\text{п.р.макс}}$ следует использовать параметр режима работы ТТ А. Так как в условиях насыщения ТТ в переходном режиме значение $K_{\text{п.р.макс}}$ равно значению параметра А, то $K_{\text{макс}} = K_{\text{ном}}$ и в использовании $K_{\text{макс}}$ нет необходимости.

В технических характеристиках существующих ТТ класса Р встречаются заниженные паспортные значения номинальной предельной кратности первичного тока $K_{\text{ном}}$ (в ряде случаев до 40 % и более). Расчет показал, что у ряда ТТ при токе, соответствующем $K_{\text{ном}}$, и сопротивлении нагрузки, равном $z_{\text{ном}}$, амплитуда магнитной индукции может быть значительно ниже значения, соответствующего моменту достижения допустимых погрешностей. По этой причине расчетные значения времени до насыщения ТТ, полученные по паспортным данным, могут быть существенно занижены, что приводит к необоснованному выводу о необходимости замены ТТ класса Р.

Например, у отечественных многопредельных ТТ, имеющих ответвления от вторичной обмотки с целью регулирования коэффициента трансформации, вопреки требованиям стандарта на ТТ [9], могут быть указаны одинаковые паспортные значения $K_{\text{ном}}$ и $z_{\text{ном}}$ для разных ответвлений. В результате ТТ с высоким коэффициентом трансформации оказывается недогруженным и, соответственно, фактическое время до его насыщения значительно больше, чем при тех же условиях у того же ТТ с низким коэффициентом трансформации. Очевидно, что целесообразно приводить фактические значения номинальной предельной кратности тока и номинального сопротивления нагрузки для многопредельных ТТ с ответвлениями от вторичной обмотки, а не одинаковые их паспортные значения.

По указанной причине следует различать паспортное $K_{\text{ном.пасп}}$ и фактическое $K_{\text{ном.факт}}$ значения номинальной предельной кратности.

Выше отмечено, что производители ТТ должны приводить значения тока и напряжения в точке перегиба U_K , практически равные E_K , а также коэффициента пересчета U_K в U_{ALF} .

Расчет $K_{\text{ном.факт}}$ производится в следующем порядке [11, 12]:

1. Вычисляется паспортное значение напряжения, соответствующее нормированной погрешности ε (10 или 5 %):

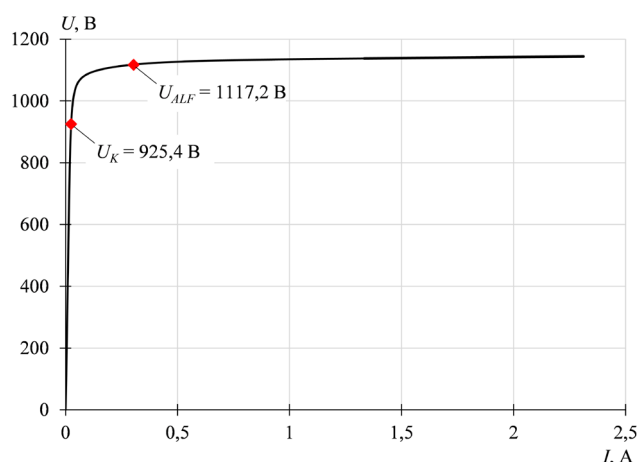


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика ТТ типа SAS 500/5G 2000/1

$$U_{\text{ALF.пасп}} = K_{\text{ном.пасп}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot \sqrt{(R_2 + 0,8 \cdot z_{\text{н.ном}})^2 + (X_2 + 0,6 \cdot z_{\text{н.ном}})^2}, \quad (10)$$

где значения 0,8 и 0,6 соответствуют нормированному коэффициенту мощности номинальной вторичной нагрузки ТТ;

2. Путем пересчета U_K в U_{ALF} определяется фактическое напряжение насыщения ТТ при синусоидальном токе. При пересчете в соответствии с [6] используется выражение

$$U_{\text{ALF}} = F \cdot U_K,$$

где коэффициент F по данным [7] зависит от свойств материала сердечника. Практические значения варьируются в диапазоне:

- от 1,2 до 1,3 для сердечников без зазора,
- около 1,1 для сердечников с зазором;

3. Вычисляется отношение фактического и паспортного значений напряжения по выражению:

$$K_{U,\text{ALF}} = \frac{U_{\text{ALF}}}{U_{\text{ALF.пасп}}}; \quad (11)$$

4. Производится расчет фактической номинальной предельной кратности тока ТТ $K_{\text{ном.факт}}$ по выражению:

$$K_{\text{ном.факт}} = K_{U,\text{ALF}} \cdot K_{\text{ном.пасп}}. \quad (12)$$

Фактическое напряжение U_{ALF} ТТ класса Р в установившемся режиме при отсутствии апериодической составляющей в первичном токе и номинальной нагрузке вычисляется по выражению:

$$U_{\text{ALF}} = K_{\text{ном.факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot \sqrt{(R_2 + 0,8 \cdot z_{\text{н.ном}})^2 + (X_2 + 0,6 \cdot z_{\text{н.ном}})^2} = K_{\text{ном.факт}} \cdot I_{2\text{ном}} \cdot z_{2\Sigma\text{ном}}. \quad (13)$$

Пример 1

Определение $K_{\text{ном.факт}}$ ТТ типа SAS 500/5G 2000/1 по показаниям прибора CT-Analyzer и с помощью предложенной методики. Вых ТТ типа SAS 500/5G 2000/1, полученная с помощью прибора, приведена на рис. 1.

Пояснения к рис. 1:

- точка U_K на ВАХ соответствует точке перегиба (излома), которая определена путем расчетов с помощью следующего критерия из [6]: ЭДС трансформатора тока при но-

минальной частоте, которая, будучи увеличенной на 10 %, приводит к увеличению среднеквадратичного значения намагничивающего тока на 50 %;

■ точка UALF на ВАХ, определена путем расчетов с помощью следующего критерия из [7]: это точка на ВАХ, в которой уменьшение напряжения на 5 % приводит к уменьшению намагничивающего тока в 5 раз.

Расчет значения $K_{ном.факт}$ производится в следующей последовательности:

■ коэффициент пересчета в данном случае равен:

$$F = \frac{U_{ALF}}{U_K} = \frac{1117,2}{925,4} \approx 1,21;$$

■ паспортные данные ТТ SAS 500/5G 2000/1: $I_{1,ном} = 2000$ А; $Z_{ном} = 40$ Ом; $K_{ном} = 20$;

■ фактические данные по показаниям прибора СТ-Analyzer: $R_2 = 5,55$ Ом; $K_{ном.факт} = 25,7$;

■ определим $K_{ном.факт}$ с помощью подхода, приведенного выше:

$$U_{ALF.пасп} = K_{ном.пасп} \cdot I_{2,ном} \cdot \sqrt{(R_2 + 0,8 \cdot Z_{н,ном})^2 + (X_2 + 0,6 \cdot Z_{н,ном})^2} = 20 \cdot 1 \cdot \sqrt{(5,55 + 0,8 \cdot 40)^2 + (0 + 0,6 \cdot 40)^2} = 891,3 \text{ В};$$

$$K_{U,ALF} = \frac{U_K \cdot F}{U_{ALF.пасп}} = \frac{925,4 \cdot 1,21}{891,3} \approx 1,26;$$

$$K_{ном.факт} = K_{U,ALF} \cdot K_{ном.пасп} = 1,26 \cdot 20 = 25,2.$$

Видно, что значения $K_{ном.факт}$, определенные с помощью прибора СТ-Analyzer и по предложенной методике, достаточно близки.

Расчет времени до насыщения ТТ класса Р в переходном режиме

Расчет времени до насыщения ТТ класса Р в переходном режиме с целью проверки соответствия характеристик ТТ условиям функционирования быстродействующих УРЗ, по мнению авторов, должен производиться с использованием фактического предельного вторичного напряжения UALF. факт при наличии в токе апериодической составляющей и фактической нагрузки $Z_{н, факт}$. Значение UALF. факт определяется на основе положения, изложенного ниже.

Метод базисных параметров ТТ класса Р, предложенный профессором А.Д. Дроздовым [13], базируется на приближенном равенстве магнитных индукций в магнитопроводе ТТ в условиях насыщения синусоидальным током при номинальном сопротивлении нагрузки и при сопротивлении нагрузки, отличающемся от номинального. Распространив положения указанного метода на переходный режим с апериодической составляющей в первичном токе ТТ и наличием остаточной магнитной индукции B_r в магнитопроводе, в условиях насыщения можно установить приближенное равенство магнитных индукций в магнитопроводе ТТ в условиях насыщения синусоидальным током при номинальном сопротивлении нагрузки $B_{нас.ном.sin}$ и с наличием в токе апериодической составляющей при нагрузке, отличающейся от номинального значения $B_{нас.факт.перех}$:

$$B_{нас.факт.перех} \approx B_{нас.ном.sin} \quad (14)$$

Тогда порядок расчета параметра А ТТ класса Р в переходном режиме с учетом фактического значения номинальной предельной кратности следующий:

1. Вычисляется фактическое напряжение $U_{2,син}$ на вторичной обмотке при протекании периодического тока КЗ:

$$U_{2,син} = K_{факт} \cdot I_{2,ном} \cdot Z_{2\Sigma факт} \quad (15)$$

где $K_{факт} = I_{КЗ}/I_{1,ном}$ – фактическая кратность тока КЗ; $I_{КЗ}$ – действующее значение периодической составляющей тока КЗ; $I_{2,ном}$ – номинальный вторичный ток ТТ; $Z_{2\Sigma факт}$ – фактическое суммарное сопротивление ветви вторичного тока ТТ;

2. По выражению (13) вычисляется фактическое номинальное значение напряжения $U_{ALF.факт}$, соответствующее нормированному значению ε_c (10 или 5 %);

3. Вычисляется значение параметра режима А без учета остаточной магнитной индукции B_r :

$$A = \frac{U_{ALF.факт}}{U_{2,син}} \quad (16)$$

а также параметра режима A_r с учетом B_r :

$$A_r = A \cdot (1 - K_r) \quad (17)$$

По зависимости $K_{н.р}(t)$ при полученных значениях А и A_r можно найти $t_{нас}$ и выполнить проверку соответствия характеристик ТТ условиям функционирования быстродействующих УРЗ.

Выбор характеристик ТТ класса Р и с немагнитным зазором

Выбор характеристик ТТ класса Р и с немагнитным зазором в проекте ГОСТ Р «Методические указания по определению параметров электромагнитных трансформаторов тока для обеспечения правильного функционирования релейной защиты в переходных режимах» [3] базируется на использовании выражений для номинальной предельной кратности ТТ класса Р (выражения (3) и (4) в проекте стандарта [3]):

$$K_{ном} \geq \frac{\omega T_a (1 - e^{-\frac{t_{до}}{T_a}}) + 1}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{КЗ}}{I_{1,ном}} \quad (18)$$

$$K_{ном} \geq \max \left\{ \frac{\omega T_a (1 - e^{-\frac{t_{до}}{T_a}}) - \sin(\omega \cdot t_{до})}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{КЗ}}{I_{1,ном}} \right\} \quad (19)$$

где $T_a, I_{КЗ}$ – постоянная времени затухания апериодической составляющей и действующее значение периодической составляющей тока КЗ, соответственно.

В приведенных выше выражениях в числителях первой дроби приведены два различных варианта формул для расчета значений $K_{н.р}$ в момент времени, равный $trз$ для ТТ класса Р: в первом случае – это выражение для огибающей, а во втором – для максимального содержания апериодической составляющей. То есть в общем случае выражение (18) и (19) можно записать следующим образом;

$$K_{ном} \geq \frac{K_{н.р}(t_{до})}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{КЗ}}{I_{1,ном}} \quad (20)$$

При этом в проекте стандарта [3] отсутствуют четкие рекомендации, в каком случае нужно использовать то или

иное выражение. Кроме того, оба выражения не учитывают наихудшее значение угла θ , что особенно важно на начальном участке кривой $K_{n,p}(t)$.

Наиболее общие рекомендации по расчету $K_{n,p}(t_{p3})$ изложены в [7], согласно которым кривая коэффициента переходного режима разбивается по оси времени на три характерных участка. Для каждого участка используются свой подход к расчету значения $K_{n,p}(t_{p3})$. Принадлежность к конкретному участку определяется заданным значением t_{p3} для устройства релейной защиты в расчетном режиме КЗ.

Первый участок кривой – это интервал от нуля до момента времени, соответствующего первому касанию кривой $K_{n,p}(t_{p3})$ (построенной с учетом наихудшего значения угла θ в каждый момент времени) своей огибающей. Приближенно этот интервал равен от 0 до 14 мс.

По результатам испытаний УРЗ производства НПП «ЭКРА» можно уверенно сказать, что для дифференциальных защит трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов, шин и ошинок значения t_{p3} меньше 10 мс. То есть значения t_{p3} для указанных защит соответствует первому участку.

Таким образом, использование на первом участке кривой $K_{n,p}(t_{p3})$ выражения для огибающей приведет к неоправданному завышению требуемого значения $K_{ном}$ (и часто к невозможности выбора ТТ класса Р, а в некоторых случаях и ТТ класса PR) практически для всех дифференциальных защит.

С учетом указанного выше можно предложить три варианта расчета $K_{n,p}(t_{p3})$:

- рассчитывать $K_{n,p}(t_{p3})$ по методике и формулам, приведенным в шестом разделе [7]. Конечно, расчет по указанной методике для первого участка очень громоздкий и труден для понимания;

- в [11] дана следующая рекомендация: «если значение t_{p3} меньше 10 мс, то коэффициент переходного режима $K_{n,p}(t_{p3})$ для ТТ класса Р рекомендуется определять по значениям t_{p3} и T_p с помощью диаграмм зависимости $K_{n,p}$ от времени, приведенным в Приложении А ГОСТ Р 58669-2019» (данные кривые построены с учетом наихудшего значения угла θ в каждый момент времени). Обоснованность такого подхода (на первом участке) и для ТТ класса PR (ТРУ) подтверждена расчетным путем и отмечена в [12]. При этом значение погрешности определения $K_{n,p}(t_{p3})$ из-за неучета T_s не превышает 2,5 %.

Если t_{p3} больше 10 мс, то расчет выполняется с помощью выражения для огибающей (для ТТ класса PR (ТРУ) выражение для огибающей должно учитывать значение T_s);

- расчет $K_{n,p}(t_{p3})$ на первом участке кривой коэффициента переходного режима ($t_{p3} < 10$ мс) выполняется по выражению для максимального содержания апериодической составляющей, т.е. без учета наихудшего значения угла θ в каждый момент времени.

При использовании последнего варианта, как показали расчеты, получаются несколько заниженные значения $K_{ном}$.

Пример 2

Определить требуемое значение $K_{ном}$ для ТТ стороны ВН дифференциальной защиты трехобмоточного понижающего трансформатора в режиме трехфазного КЗ в зоне действия.

Исходные данные: $I_{кз} = 4239$ А; $T_p = 0,05$ с; $t_{p3} = 3$ мс; предварительно по нагрузке присоединения выбрано значение номинального первичного тока $I_{1,ном} = 400$ А.

1) Значение $K_{n,p}(t_{p3})$ рассчитывается по методике и формулам, приведенным в шестом разделе Технического доклада МЭК [7] (первый вариант, из указанных выше). Тогда наихудшее значение угла θ в момент времени t_{p3} равно $75,6^\circ$, а $K_{n,p}(t_{p3})$ при указанном значении θ равно 0,426.

С помощью выражения (20) определим $K_{ном}$:

$$K_{ном} = \frac{K_{n,p}(t_{p3})}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{кз}}{I_{1,ном}} = \frac{0,426}{1 - 0,86} \cdot \frac{4239}{400} \approx 32.$$

2) Значение $K_{n,p}(t_{p3})$ определим с помощью диаграмм зависимости $K_{n,p}$ от времени, приведенным в Приложении А [5] (второй вариант, из указанных выше). По рис. Б1, лист 1 из Приложения А в [5] получим:

$$K_{n,p}(t_{p3}) = K_{n,p}(0,003) \approx 0,41.$$

Тогда $K_{ном}$:

$$K_{ном} = \frac{K_{n,p}(t_{p3})}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{кз}}{I_{ном}} = \frac{0,41}{1 - 0,86} \cdot \frac{4239}{400} \approx 31.$$

3) Определим $K_{ном}$ с помощью выражения для максимального содержания апериодической составляющей $K_{n,p}(t)$ (выражение (4) в проекте стандарта [3] или третий вариант, из указанных выше):

$$K_{ном} = \frac{\omega T_p (1 - e^{-\frac{t_{p3}}{T_p}}) - \sin(\omega t_{p3})}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{кз}}{I_{1,ном}} = \frac{314 \cdot 0,05 \cdot (1 - e^{-\frac{0,003}{0,05}}) - \sin(314 \cdot 0,003)}{1 - 0,86} \cdot \frac{4239}{400} \approx 8.$$

4) Определим $K_{ном}$ с помощью выражения для огибающей $K_{n,p}(t)$ (выражение (3) в проекте стандарта [3]):

$$K_{ном} = \frac{\omega T_p (1 - e^{-\frac{t_{p3}}{T_p}}) + 1}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{кз}}{I_{1,ном}} = \frac{314 \cdot 0,05 \cdot (1 - e^{-\frac{0,003}{0,05}}) + 1}{1 - 0,86} \cdot \frac{4239}{400} \approx 145.$$

Таким образом, наилучшим по трудоемкости и обоснованности из трех вариантов определения $K_{n,p}(t_{p3})$, приведенных выше, авторы статьи считают второй, который рекомендуется в МУ НПП «ЭКРА».

Проект стандарта [3] требует выбирать значение номинальной предельной кратности из ряда стандартных значений указанного в [2]. При получении значения $K_{ном}$ больше максимального в соответствии с [2], т.е. больше 30, в п. 8.1 предлагается скорректировать номинальный первичный ток ТТ и повторить расчет по выражению (3).

Вычислительный эксперимент показал, что сохранение указанного выше требования может привести к невозможности выбора ТТ классов Р и PR. Выход из данной ситуации возможен, если выбор номинальной предельной кратности будет производиться с учетом полного сопротивления вторичной обмотки, а также полного фактического и полного номинального значений сопротивлений нагрузки по выражению:

$$K_{ном} \geq \frac{K_{n,p}(t_{p3})}{1 - K_r} \cdot \frac{I_{кз, факт} \cdot |Z_2 + Z_{н, факт}|}{I_{1,ном} \cdot |Z_2 + Z_{н, ном}|}, \quad (21)$$

где $Z_2, Z_{н.факт}, Z_{н.ном}$ – соответственно, полное сопротивление вторичной обмотки, фактическое и номинальное полное сопротивления нагрузки выбираемого ТТ.

Значение сопротивления Z_2 должно определяться производителем при разработке и изготовлении нового ТТ. При выборе характеристик ТТ на этапе проектирования, как правило, можно пренебречь индуктивным сопротивлением рассеяния вторичной обмотки, а ее активное сопротивление задавать ориентировочно с помощью коэффициента K_{R2} , который можно принять равным в 20–80 % от номинальной нагрузки, или рассчитать по R_2 выражению, приведенному в [15].

Указанная доработка формул (18) и (19) в ряде случаев позволит подобрать $K_{ном}$ из ряда допустимых значений [2], т.е. не более 30, за счет увеличения номинальной вторичной нагрузки ТТ (но не более допустимого значения, т.е. до 100 Ом). В примере 3 активное сопротивление обмотки вычислено по выражению: $R_2 = K_{R2} \cdot Z_{н.ном}$, где K_{R2} принят равным 0,5.

Пример 3

Определить требуемое значение $K_{ном}$ для ТТ в схеме дистанционной защиты от КЗ на землю в режиме удаленного КЗ.

Исходные данные: $I_{КЗ} = 5000$ А; $Z_{н.факт} = 2,5$ Ом; $T_p = 0,03$ с; $t_{рз} = 10$ мс; предварительно по нагрузке ВЛ выбрано значение номинального первичного тока $I_{1.ном} = 2000$ А.

1) Определим $K_{ном}$ с помощью выражения (18):

$$K_{ном} = \frac{\omega T_p (1 - e^{-\frac{t_{рз}}{T_p}}) + 1}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}} = \frac{314 \cdot 0,03 \cdot (1 - e^{-\frac{0,01}{0,03}}) + 1}{1 - 0,86} \cdot \frac{5000}{2000} \approx 66.$$

Видно, что $K_{ном}$ превышает наибольшее значение (40), указанное в проекте стандарта [2].

2) Определим $K_{ном}$ с помощью выражения (21). При этом примем, что значение полного сопротивления нагрузки $Z_{н.ном} = 40$ Ом, сопротивление вторичной обмотки ТТ имеет активный характер, $K_{R2} = 0,5$.

$$K_{ном} = \frac{\omega T_p (1 - e^{-\frac{t_{рз}}{T_p}}) + 1}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}} \cdot \frac{|K_{R2} Z_{н.ном} + Z_{н.факт}|}{|K_{R2} Z_{н.ном} + Z_{н.ном}|} = \frac{314 \cdot 0,03 \cdot (1 - e^{-\frac{0,01}{0,03}}) + 1}{1 - 0,86} \cdot \frac{5000}{2000} \cdot \frac{20 + 2,5}{20 + 40} \approx 25.$$

Видно, что $K_{ном}$ не превышает наибольшее значение, указанное в проекте стандарта [2].

На основании изложенного считаем, что выбор номинальной предельной кратности ТТ класса ТРУ должен производиться по выражению:

$$K_{ном} \geq \frac{1}{1 - k_r} \cdot \frac{I_{КЗ}}{I_{1.ном}} \cdot \frac{|Z_2 + Z_{н.факт}|}{|Z_2 + Z_{н.ном}|}, \quad (20)$$

т.е. также должно учитываться отношение модулей полных сопротивлений ветви вторичного тока ТТ.

В проекте стандарта [3] необходимо дать пояснение, как определить требуемое значение T_s для ТТ класса PR, если АПВ не используется и выражение (4) из указанного проекта не является расчетным. По мнению авторов статьи, так как параметры ТТ класса PR не нормируются в переходных режимах КЗ, то значение постоянной времени вторичного контура (T_s) для них целесообразно определять исходя из

требований к мгновенной погрешности для ТТ класса ТРУ. Как показали исследования, у ТТ класса 10PR требуемое значение T_s должно составлять:

- для первых ступеней дистанционных защит линий электропередачи по условию правильной работы при КЗ в конце зоны не менее 270 мс;
- для остальных быстродействующих защит, в первую очередь, дифференциальных, не менее 182 мс, т.е. как у ТТ класса ТРУ.

Таким образом, минимальное значение постоянной времени T_s для быстродействующих защит с учетом некоторого расчетного запаса целесообразно принять равным 300 мс.

Имеются также следующие неясности:

- не ясно, как получено выражение (9), имеющее вид:

$$K_{п.р.ном} = \frac{\omega T_a T_{с.ном} (e^{-\frac{t_{рз}}{T_a}} - e^{-\frac{t_{рз}}{T_{с.ном}}})}{(T_a - T_{с.ном}) (1 - e^{-\frac{t_{рз}}{T_{с.ном}}})} + 1;$$

- необходимо дать пояснение как определить требуемое значение T_s для ТТ класса PR, если режим АПВ не рассматривается и выражение (4) не является расчетным. Кроме того должны быть приведены расчетные выражения $K_{п.р.}(t_{рз})$ для первого и второго КЗ в цикле АПВ при $t_{рз}$, превышающем и не превышающем время существования КЗ.

В проекте стандарта [4] «Требования к работе устройств релейной защиты ЛЭП 110 кВ и выше в переходных режимах, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока» приведены требования к испытаниям терминалов микропроцессорных защит линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения с помощью симуляторов. Предлагается использовать при испытаниях исключительно математические модели ТТ и их программные реализации. В основу испытаний положены базовые модели ТТ, которые далее пересчитываются к расчетным условиям. На основании таких испытаний предложено делать выводы о допуске в практику эксплуатации реальных устройств релейной защиты в условиях переходных процессов, сопровождающихся насыщением магнитопроводов ТТ.

Имеются нижеследующие замечания по документу.

1. Полноценные тестовые испытания устройств РЗА в переходных режимах с реальными ТТ возможны только в условиях специального испытательного центра, который в России отсутствует. Использование математических моделей ТТ при аттестационных испытаниях допустимо только после их соответствующей верификации, например, путем предварительной проверки совместной работы реальных ТТ, с параметрами, соответствующими их математической модели, с реальными УРЗ в условиях опытной эксплуатации.

2. При положительных результатах опытной эксплуатации представляется, что тестовые испытания с применением программно-аппаратного комплекса реального времени (ПАК РВ) должен осуществлять не специализированный испытательный центр с ничем не обоснованным условием исключения вмешательства разработчика устройств, как предлагается в проекте стандарта, а производитель УРЗ в ходе работы межведомственной комиссии (МВК). Они должны представлять собой дополнительные функциональные испытания на этапе подготовки УРЗ к аттестации

у потребителя. При отсутствии ПАК РВ у производителя УРЗ ему должна быть предоставлена возможность выбора соответствующей производственно-технической базы для проведения испытаний.

3. Рекомендации производителя по t_{p3} в разных режимах КЗ для одной и той же защиты могут отличаться. Поэтому требование проекта стандарта по настройке модели для каждого отдельного опыта (расчет напряжения насыщения или параметров магнитопровода) приводит к тому, что при КЗ в разных точках ВЛ или разных видах КЗ в одной точке испытания защит проводятся фактически с новыми ТТ, что противоречит реальным условиям эксплуатации.

Правильно было бы в соответствии с требованиями производителя УРЗ определить требуемые параметры ТТ для всех расчетных режимов и видов КЗ по времени трз (для данного объекта защиты), а затем выбрать из них наилучшие, которые и следует использовать при настройке модели ТТ для испытаний. Сами же испытания должны проводиться для всех режимов и видов КЗ для одной модели ТТ.

4. Программы испытаний, предложенные в проекте стандарта, должны быть исключены из основного текста стандарта, и размещены в Приложении, которое можно оперативно корректировать на основе опыта проведения испытаний.

5. Собственник или иной законный владелец объекта электроэнергетики, на котором планируются к установке быстродействующие защиты ЛЭП 110 кВ и выше, или владелец УРЗ не должен быть лицом, заинтересованным в проведении испытаний. По существующим нормативам на объектах электроэнергетики должна устанавливаться только аттестованная соответствующим образом продукция.

6. Предлагаемая в проекте стандарта методика использования базовых моделей ТТ применительно к испытуемым защитам не обоснована теоретическими положениями, соответствующими математическими преобразованиями и экспериментальными данными. Не приведены ни обоснование предлагаемой методики масштабирования, ни ссылка на работу, в которой такое обоснование приведено. Нет обоснования выбора базовых ВАХ ТТ.

В качестве базовых принятых модели ТТ с нереальными габаритами (сечение сердечника, длина силовой линии). Например, в табл. А.21 длина силовой линии сердечника равна 5 см. Вряд ли целесообразно проводить ответственные испытания реальных устройств РЗА, опираясь на модели ТТ, не имеющие ничего общего с реальными устройствами. В отраслевом стандарте ФСК ЕЭС предписано использовать параметры реальных ТТ, что представляется более обоснованным подходом.

Указано, что при напряженности магнитного поля 50 А/м амплитуда магнитной индукции в сердечнике ТТ равна 1,95 Тл. Однако у реальной холоднокатаной электротехнической стали марки 3408 по данным Новолипецкого металлургического завода амплитуда магнитной индукции при такой напряженности магнитного поля составляет 1,55 Тл. По данным компании TRENCH у аналогичной электротехнической стали при амплитуде магнитной индукции 1,9 Тл напряженность магнитного поля равна 1000 А/м, т.е. ошибка в напряженности магнитного поля достигает 20 000 %.

Вычисление средней длины силовой линии в магнитопроводе ТТ предложено производить по значению маг-

нитной индукции, а не по напряженности магнитного поля. В результате ошибка в вычислении указанной длины, как показывают расчеты, может превышать 100 % и более.

ВАХ базовых моделей ТТ сняты не до точек, соответствующих погрешности $\varepsilon = 10\%$. Поэтому использование ВАХ принятых базовых моделей ТТ при испытаниях не является обоснованным. Например, в табл. А.2 при напряжении насыщения 150 В и кратности тока КЗ, равной 15 (табл. А.3), действующее значение намагничивающего тока должно быть равным 1,5 А. Однако ВАХ снята до значения указанного тока 0,075 А. Не ясно, каким образом обоснован масштаб по намагничивающему току ТТ. Неясно также, почему в той же таблице (и аналогичных) приведены параметры реальных ТТ (токи, сопротивления) и базовой модели с нереальной длиной силовой линии.

7. В табл. А.18 с целью моделирования ТТ с немагнитным зазором приведены данные базового ТТ, не имеющего немагнитного зазора. Очевидно, что следовало привести данные базового ТТ с немагнитным зазором.

8. В табл. А.21, А.26 значение амплитуды магнитной индукции в сердечниках базовых моделей двух ТТ при $\varepsilon = 10\%$ составило 1,95 Тл и 1,4 Тл, соответственно. Не ясно, чем объясняется такая разница в значениях амплитуды магнитной индукции базовых ТТ при указанной ε .

9. Более целесообразно было бы выбрать реальные ТТ для защиты, затем по их параметрам разработать математические модели последних, как это используется в отраслевом стандарте ПАО «ФСК ЕЭС» [16]. Не ясно, по какой причине в проекте стандарта не использовался такой подход.

10. В описании методики пересчета параметров базовых моделей ТТ к реальным объединены ТТ классов Р и PR. Это запутывает читателя. Целесообразно было отдельно сформулировать положения, относящиеся к ТТ указанных классов.

11. Отсутствует подтверждение результатов моделирования физическими экспериментами. Отсутствуют также сведения об используемых при испытаниях математических моделях ТТ и их программной реализации, а также о верификации указанных моделей.

12. Требуется пояснение, на основании чего в табл. А.23 приведены значения полных погрешностей ТТ разных классов при их совместной работе. Очевидно, что для формулирования таких положений должны быть проведены исследования поведения устройств релейной защиты различных производителей в широком диапазоне условий функционирования. По этой причине данные, приведенные в табл. А.23, представляются недостаточно обоснованными.

Остаточная магнитная индукция в сердечнике ТТ

Как показали исследования [14], при включении на второе КЗ в цикле АПВ остаточная магнитная индукция в сердечнике ТТ класса Р может достигать $0,86 \cdot B_{SAT}$, где B_{SAT} – индукция полного насыщения материала сердечника. Однако при внезапном КЗ, в том числе, при первом КЗ в цикле АПВ значение остаточной магнитной индукции может снизиться под действием токов нагрузочных режимов до значений $(0,65 \dots 0,7) \cdot B_{SAT}$.

В настоящее время используются также ТТ класса Р, значение остаточной магнитной индукции в сердечниках которых снижено до уровня порядка $0,3 \cdot B_{SAT}$. Очевид-

но, что использование таких ТТ существенно снижает остроту проблемы функционирования быстродействующих УРЗ в переходных режимах КЗ с наличием в токах апериодической составляющей. С целью определения перспективы использования таких ТТ в цикле АПВ необходимо иметь данные о постоянной времени их вторичных контуров.

Выводы

1. Обеспечение быстродействия и селективности быстродействующих устройств РЗ в ЭЭС России при переходных процессах с наличием в токах КЗ апериодической составляющей является актуальной задачей. Одним из путей ее решения является учет запаса в паспортных значениях номинальной предельной кратности и завышения остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ класса Р (без немагнитного зазора в магнитопроводе), снижения нагрузки на ТТ путем использования оптоволоконной связи между ТТ и устройствами РЗ, а также новых алгоритмических решений, используемых в современных устройствах РЗ.

2. Так как ТТ классов Р и PR не имеют утвержденной нормативной базы характеристик в переходных режимах, то существует неопределенность в определении времени до насыщения указанных аппаратов.

В качестве одного из элементов нормативной базы характеристик удобно использовать заводские ВАХ ТТ или значения напряжения и тока в точке перегиба указанных характеристик со значениями коэффициента перехода к напряжениям, соответствующим допустимым погрешностям ТТ.

3. С целью использования при проверке соответствия характеристик ТТ класса Р, установленных на объектах защиты, условиям функционирования быстродействующих УРЗ предложена методика вычисления фактического значения номинальной предельной кратности первичного тока, базирующаяся на использовании ВАХ.

4. Показана нецелесообразность использования понятия максимальная предельная кратность ТТ.

5. Показано, что при выборе номинальной предельной кратности первичного тока ТТ необходимо учитывать отношение модулей фактического и номинального сопротивлений ветви вторичного тока ТТ.

6. Показана необходимость доработки проекта стандарта [4] в части определения параметров базовых моделей, их ВАХ и характеристик намагничивания.

5. На базе результатов исследований [14] предложено в расчетах времени до насыщения ТТ учитывать снижение значений остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ класса Р при внезапных КЗ за счет размагничивающего влияния нагрузочных токов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Письмо заместителя министра энергетики от 02.04.2019 № ЧА-3440/10. «О мерах по недопущению некорректной работы устройств релейной защиты». – <https://docs.cntd.ru>.

2. ГОСТ Р (проект, первая редакция). «Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока (IEC 61869-2:2012, neq)».

3. ГОСТ Р (окончательная редакция). «Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Релейная защита и автоматика. Методические указания по определению параметров электромагнитных трансформаторов тока для обеспечения правильного функционирования релейной защиты в переходных режимах».

4. ГОСТ Р (окончательная редакция). «Требования к работе устройств релейной защиты линий электропередачи классом напряжения 110 кВ и выше в переходных режимах, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока».

5. 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». Введен в действие в РФ с 1 января 2020 г. – (<https://docs.cntd.ru>).

6. Стандарт МЭК 61869-2. Издание 1.0 2012-09. Международный стандарт. Измерительные трансформаторы. Часть 2: Дополнительные требования для трансформаторов тока. Редакция 1.0 2012-09.

7. IEC 61869-100: 2017. Instrument Transformers. Part 100 Guidance for Application of Current Transformers in Power System Protection. – (<https://ieeexplore.ieee.org>).

8. ГОСТ 18685-73. Трансформаторы тока и трансформаторы напряжения. Термины и определения. Дата введения 01.07.74.

9. ГОСТ 7746 – 2001. Трансформаторы тока. Общие технические условия. Дата введения 2003-01-01. – (<https://docs.cntd.ru>)

10. Казанский В.Е. Трансформаторы тока в устройствах релейной защиты и автоматике. – М.: Энергия, 1978., 264 с.

11. ООО НПП «ЭКРА». Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока. ЭКРА.650323.085 Д. Чебоксары 2021. Редакция от 13.09.2021. – (<https://ekra.ru>).

12. Проверка соответствия трансформаторов тока условиям функционирования устройств релейной защиты в аварийных режимах / С.Л. Кужеков, А.А. Дегтярев, Н.А. Дони, А.А. Шурупов. – Электрические станции, 2022, № 7, с. 50–59.

13. Дроздов А.Д. Расчет режимов трансформаторов тока в релейной защите по номинальным или базисным параметрам. – Электричество, 1968, № 6, с. 72–75.

14. Дегтярев А.А., Кужеков С.Л., Дони Н.А., Шурупов А.А. Определение остаточных магнитных индукций в тороидальных сердечниках трансформаторов тока класса Р для релейной защиты. – Релейная защита и автоматизация, 2021, № 03, с. 44–57.

15. Siemens PTI CT Dimensioning CTDim V 3.6 Version B CTDim Help Date 2016-08-01 Editor CTDim Team Office address Freyeslebenstr. 1 91058 Erlangen, Germany www.siemens.de/ctdim E-Mail ctdim.energy@siemens.com Siemens AG Energy Management Smart Grid Solutions & Services Power Technologies International.

16. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.120.70.241-2017 с изменениями от 11.12.2019. Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА. – (<https://www.fsk-ees.ru>).