

## Проверка соответствия трансформаторов тока условиям функционирования устройств релейной защиты в аварийных режимах

- Кужеков С. Л., доктор техн. наук, ООО “Научно–производственная фирма “Квазар”, г. Новочеркасск
- Дегтярев А. А.<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ООО “Научно–производственная фирма “Квазар”, г. Новочеркасск
- Дони Н. А., канд. техн. наук, ООО “Научно–производственное предприятие “ЭКРА”, г. Чебоксары
- Шурупов А. А., канд. техн. наук, ООО “Научно–производственное предприятие “ЭКРА”, г. Чебоксары

В 2020 – 2021 гг. для объектов электроэнергетики ЕЭС России, на которых существуют риски неправильной работы устройств релейной защиты (РЗ) в переходных режимах коротких замыканий (КЗ) с наличием в токе апериодической составляющей, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока (ТТ), выполнялись расчёты времени до насыщения ( $t_{\text{нас}}$ ) ТТ класса Р (без немагнитного зазора в магнитопроводе). В результате расчётов часто делался вывод о необходимости замены указанных ТТ на ТТ с немагнитным зазором класса PR. Однако в расчётах не учитывались: запас в паспортных значениях номинальной предельной кратности, превышение расчётного значения остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ, возможность снижения нагрузки на ТТ путём использования оптоволоконной связи между ТТ и устройствами РЗ, а также новые алгоритмические решения, используемые в современных устройствах РЗ. В статье предложена методика расчёта фактического значения предельной кратности первичного тока ТТ класса Р, базирующаяся на использовании их вольт-амперных характеристик. Установлены расчётные значения остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ, обусловленные влиянием токов нагрузочных режимов, а также предложено снизить влияние остаточной магнитной индукции в ТТ путём использования синхронизированного включения выключателя в цикле АПВ. Установлены целесообразные значения постоянной времени вторичного контура ТТ класса 10PR, при их использовании в качестве источников информации о токе устройствами быстродействующих защит. Показано, что при этих значениях в расчётах времени до насыщения допустимо использовать универсальные характеристики ТТ, приведённые в ГОСТ Р 8669-2019. Показано также, что проверка соответствия характеристик ТТ условиям правильного функционирования устройств РЗ в переходных режимах, а также выбор ТТ должны проводиться с использованием экспериментально установленных значений времени достоверного измерения тока  $t_{\text{рз}}$ .

**Ключевые слова:** трансформатор тока, классы Р и PR, переходный режим, время до насыщения, время достоверного измерения тока, предельная кратность, остаточная магнитная индукция, релейная защита.

В 2020 – 2021 г.г. для объектов электроэнергетики ЕЭС России, на которых существуют повышенные риски неправильной работы устройств релейной защиты (РЗ) в переходных режимах коротких замыканий (КЗ) с наличием в токе апериодической составляющей, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока (ТТ), выполнялись расчёты времени до насыщения ( $t_{\text{нас}}$ ) ТТ класса Р (без немагнитного зазора в магнитопроводе). На основании проведенных расчётов предписывалось определить требования к техническим характеристикам защит в части минимально необходимого времени достоверного измерения значения тока ТТ ( $t_{\text{рз}}$ ), при котором обеспечивается их правильная работа [1].

Значение  $t_{\text{рз}}$  зависит от целого ряда факторов: схемы и параметров защищаемой сети, вида, места и уровня токов КЗ, уставок защит, характеристик используемых ТТ и др. Например, для устройств дифференциальной защиты значение  $t_{\text{рз}}$  зависит от нахождения точки короткого замыкания в зоне или вне зоны действия. Для резервных (дистанционных и токовых) защит линий электропередачи  $t_{\text{рз}}$  дополнительно зависит от удалённости точки КЗ от места установки ТТ.

В связи с этим 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 ( $t_{\text{нас1}}$ ) должно удовлетворять условию*

<sup>1</sup> Дегтярев Андрей Александрович: aadnew@mail.ru

$$t_{\text{нас1}} \geq t_{\text{рз1}}, \quad (1)$$

где  $t_{\text{рз1}}$  – 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

$$t_{\text{нас2}} \geq t_{\text{откл}}, \quad (2)$$

где  $t_{\text{нас2}}$  – время до насыщения ТТ в переходном режиме внешнего КЗ;  $t_{\text{откл}}$  – время отключения внешнего КЗ быстродействующей защитой повреждённого элемента системы.

Из-за неопределённости 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) принимает вид

$$t_{\text{нас2}} \geq t_{\text{бо}}, \quad (3)$$

где  $t_{\text{бо}}$  – время достоверного измерения тока ТТ функцией блокирующего органа (БО).

Если БО в устройстве защиты отсутствует, то правильное функционирование последнего должно обеспечиваться выбором уставок по уточнённым 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

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

где  $A$  – параметр режима работы ТТ;  $K_{\text{п.р}}(t_{\text{max}})$  – значение коэффициента переходного режима работы ТТ в момент достижения максимума погрешностей  $t_{\text{max}}$ ;  $K_r$  – коэффициент остаточной намагниченности (обозначения приняты в соответствии с отечественными стандартами [2, 3]).

При этом максимум погрешностей ТТ не должен превышать допустимое значение. В противном случае выбор уставок защит также должен производиться по уточнённым методикам, в которых учитываются повышенные погрешности ТТ в переходных режимах.

Необходимо отметить, что проверка условий (1) и (3) на практике затруднена по ряду причин, в частности:

в отечественных стандартах [2, 3] нет определения, что следует понимать под временем насыщения, т.е. отсутствует критерий насыщения ТТ;

отсутствует методика определения времени достоверного измерения значений тока ТТ  $t_{\text{рз}}$ .

Для устройств релейной защиты важно определить совокупность расчётных режимов. Например, в [4] приведён пример формирования задания производителю на разработку и изготовление ТТ для защит линий. В указанном документе рассмотрены четыре расчётных режима: близкие КЗ в зоне действия и вне зоны действия (за “спиной”) защиты; удалённые КЗ в зоне и вне зоны действия. Затем определены коэффициенты размерности ТТ (точнее, коэффициенты увеличения размеров ТТ, обусловленные наличием апериодической составляющей в токе КЗ) и выбрано расчётное значение коэффициента, которое передаётся производителю ТТ вместе с другими требуемыми данными. Аналогичные подходы используются в [5 – 7 и 8].

Цель настоящей работы – уточнение условий проверки соответствия характеристик ТТ классов Р и PR применительно к требованиям обеспечения правильного функционирования быстродействующих устройств РЗ в переходных режимах КЗ. При этом получены следующие результаты:

уточнено понятие критерия насыщения ТТ в переходном режиме;

проведён анализ понятий предельной кратности первичного тока и предельного вторичного напряжения ТТ класса Р;

рекомендованы расчётные значения остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ класса Р;

в качестве примера приведён результат экспериментального определения времени достоверного измерения тока ТТ функцией токовой отсечки воздушной линии сверхвысокого напряжения при КЗ в зоне действия;

уточнены условия проверки и выбора характеристик ТТ класса PR.

#### Критерий насыщения ТТ в переходном режиме

Применительно к ТТ для устройств РЗ указанный термин в России отсутствует, а используется понятие времени до насыщения ТТ. В стандарте МЭК [5] в качестве этого критерия принято время достижения измеряемым током допустимых погрешностей.

В зарубежной практике используются специально предназначенные для работы в переходных режимах ТТ классов TPX, TPY, TPZ. Максимальные значения допустимых погрешностей последних в переходных режимах нормированы стандартом [5] и составляют 10%. Для двух первых классов в переходных режимах нормирована полная мгновенная погрешность приведённого к первичной стороне вторичного тока, а для ТТ класса TPZ – погрешность по амплитуде переменной составляющей приведённого к первичной стороне вторичного тока. В обоих случаях погрешности приведены к амплитуде переменной составляющей первичного тока.

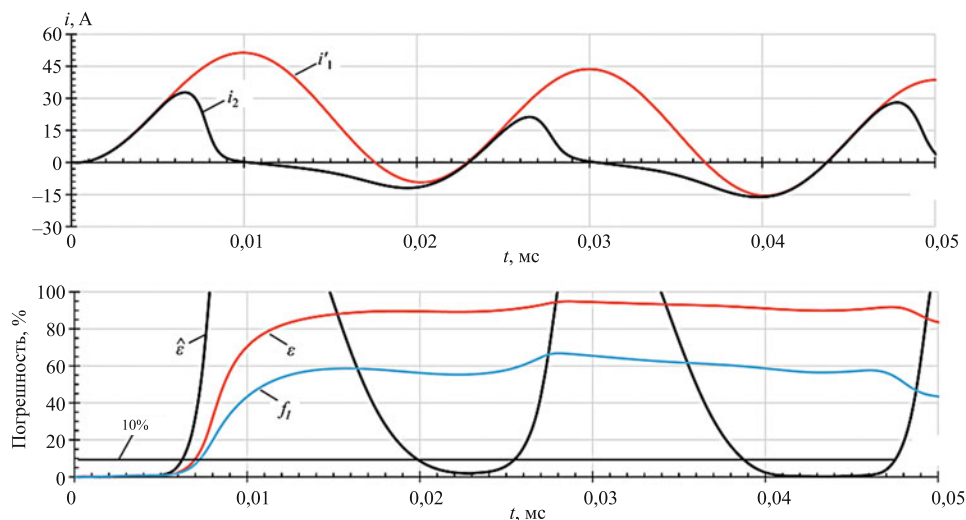


Рис. 1. Определение времени до насыщения ТТ по разным критериям

Однако в алгоритмах функционирования защит могут использоваться иные виды погрешностей. В частности, если устройство РЗ реагирует на соотношения между векторами первой гармоники токов и напряжений, то погрешность трансформации может характеризоваться отклонением действующего значения первой гармоники вторичного тока от аналогичного значения приведённого к вторичной стороне ТТ первичного тока (например, 10%). Может также использоваться отклонение угла между векторами первой гармоники первичного и вторичного токов ТТ (например,  $10^\circ$ ). Время до насыщения, вычисленное по различным критериям (рис. 1), может отличаться от аналогичного времени, вычисленного по критерию разности мгновенных значений первичного и приведённого к первичной стороне ТТ вторичного токов.

Однако использование иных критериев, строго говоря, справедливо только для установившихся режимов. По указанной причине в материалах, приведённых в [5, 6], значения токовой и угловой погрешностей нормируются только при номинальном первичном токе в установившемся режиме и нет указаний о переходе от значений нормированных погрешностей по мгновенным значениям к погрешностям по интегральным значениям тока.

На рис. 1 приведены результаты определения времени достижения допустимых погрешностей по различным критериям. Приняты следующие обозначения:

$i'_1, i_2$  – приведённое к вторичной стороне ТТ мгновенное значение первичного тока и мгновенное значение вторичного тока;  $\hat{\varepsilon}$  – максимально допустимая мгновенная погрешность в соответствии с требованиями [5];  $\varepsilon$  – полная погрешность, соответствующая действующему значению намагничивающего тока в соответствии с требованиями [9];  $f_i$  – погрешность по действующему значению

вторичного тока по отношению в действующему значению первичного тока, приведённого к стороне вторичного тока.

Из рис. 1 видно, что значения времени до насыщения, вычисленные по указанным критериям, отличаются не более, чем на 15%.

Учитывая исключительно широкое использование ТТ класса Р и возможность широкого использования ТТ класса PR, следует, как отмечено в [6], рассматривать использование ТТ указанных классов в переходном режиме с наличием апериодической составляющей тока как вынужденную меру на некоторый переходный период. Поэтому целесообразно стандартизировать значения погрешностей ТТ классов Р и PR в переходном режиме.

До разработки и принятия соответствующего стандарта в качестве критерия насыщения ТТ классов Р и PR, характеристики которых стандартизованы при синусоидальном первичном токе, в переходном режиме, как показано ранее в статье, допустимо использовать значение полной погрешности по действующему значению намагничивающего тока.

#### Предельная кратность первичного тока и предельное вторичное напряжение ТТ класса Р

Важная характеристика рассматриваемых ТТ – предельная кратность первичного тока. Понятия предельной кратности и номинальной предельной кратности в установившемся режиме работы были определены в [9]:

предельная кратность ТТ – наибольшее значение кратности первичного тока, при котором полная погрешность при заданной вторичной нагрузке не превышает 10%;

номинальная предельная кратность ТТ – гарантируемая ТТ предельная кратность при номинальной вторичной нагрузке.

В технических характеристиках существующих ТТ класса Р встречаются заниженные пас-

портные значения номинальной предельной кратности первичного тока  $K_{ном}$  и номинальной нагрузки  $z_{ном}$  (в ряде случаев до 40% и более). Расчёт показал, что у ряда ТТ при токе, соответствующем  $K_{ном}$ , и сопротивлении нагрузки, равном  $z_{ном}$ , амплитуда магнитной индукции может быть значительно ниже значения, соответствующего моменту достижения допустимых погрешностей. По этой причине расчётные 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  $K_{ном}$  и  $z_{ном}$  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 каждого ответвления вторичной обмотки многопредельного ТТ, а не одинаковые их паспортные значения.

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

В проекте ГОСТ Р “Трансформаторы измерительные. Часть 2. Технические условия на трансформаторы тока” (IEC 61869-2:2012, NEQ) 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,

$$K_{max} = K_{п.р max} K_{ном}, \quad (5)$$

где  $K_{п.р max}$  – максимальный коэффициент переходного режима.

Отмечено, что указанный коэффициент равен отношению потокоцепления насыщения, к потокоцеплению, соответствующему току погрешности при токе номинальной предельной кратности, не содержащем аperiodической составляющей. Таким образом, оба понятия предельной кратности относятся к установившемуся режиму. Поэтому использование  $K_{п.р max}$ , характеризующего переходный режим, с целью учёта различия между

$K_{ном}$  и  $K_{max}$  в установившемся режиме представляется недостаточно корректным.

Фактическое значение номинальной предельной кратности первичного тока ТТ  $K_{ном.факт}$  можно вычислить с использованием вольт-амперной характеристики (ВАХ), если производители ТТ класса Р и РR будут приводить их в технической документации. Тогда в качестве характеристики погрешности при синусоидальном первичном токе может быть принято относительное значение намагничивающего тока, равное 10% периодического тока КЗ, а в качестве расчётного напряжения насыщения – напряжение на ВАХ, соответствующее указанному значению намагничивающего тока.

Порядок вычислений следующий.

1. Вычисляется паспортное значение напряжения, соответствующее нормированной погрешности  $\varepsilon$  (10 или 5%),

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

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

2. Вычисляется действующее значение намагничивающего тока ТТ, соответствующее 5%-ной или 10%-ной полной погрешности  $\varepsilon$ ,

$$I_{0\varepsilon} = \varepsilon I_{кз}. \quad (7)$$

3. По ВАХ ТТ при токе  $I_{0\varepsilon}$  определяется фактическое напряжение насыщения ТТ при синусоидальном токе  $U_{нас.факт}$ .

4. Вычисляется отношение напряжений насыщения по выражению

$$K_{U.нас} = \frac{U_{нас.факт}}{U_{нас.пасп}}. \quad (8)$$

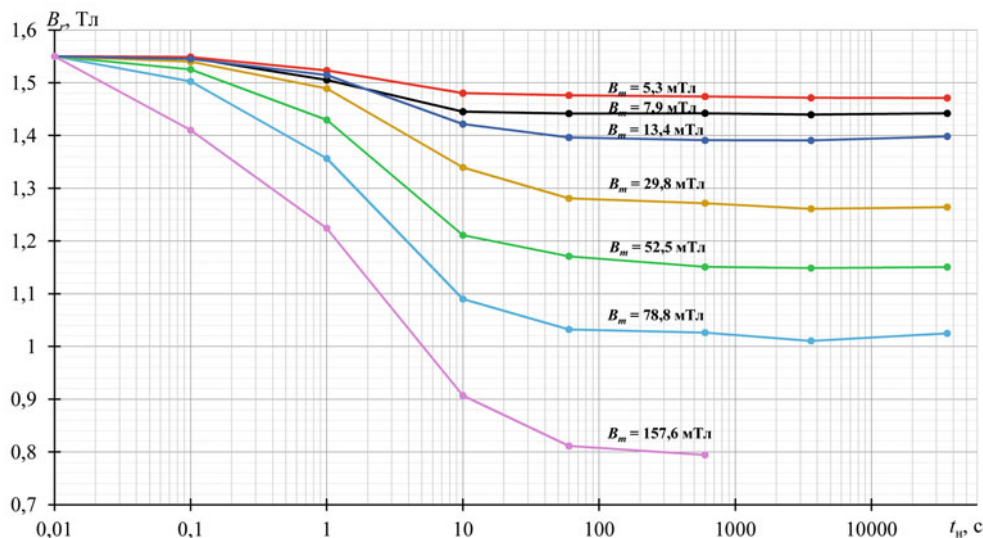
5. Производится расчёт фактической номинальной предельной кратности тока ТТ  $K_{ном.факт}$  по выражению

$$K_{ном.факт} = K_{U.нас} K_{ном.пасп}. \quad (9)$$

Фактическое номинальное напряжение насыщения ТТ класса Р в установившемся режиме при отсутствии аperiodической составляющей в первичном токе и номинальной нагрузке вычисляется по выражению

$$U_{нас.ном.факт} = K_{ном.факт} I_{2.ном} \times \sqrt{(R_2 + 0,8 z_{н.ном})^2 + (X_2 + 0,6 z_{н.ном})^2} = K_{ном.факт} I_{2.ном} z_{2\Sigma ном}. \quad (10)$$

Расчёт времени до насыщения ТТ класса Р в переходном режиме производится с использованием фактического предельного вторичного напря-



**Рис. 2.** Зависимость остаточной магнитной индукции в магнитопроводе ТТ от амплитуды магнитной индукции  $B_m$ , создаваемой током нагрузки, и времени его протекания

жения  $U_{\text{нас.факт}}$  при наличии в токе аperiodической составляющей и фактической нагрузки  $z_{\text{н.факт}}$ . Значение  $U_{\text{нас.факт}}$  определяется на основе положения, изложенного далее.

Метод базисных параметров ТТ класса Р, предложенный проф. А. Д. Дроздовым [10], базируется на приближённом 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 учётом остаточной магнитной индукции  $B_r$  в магнитопроводе, в условиях насыщения можно установить приближённое равенство между фактическим предельным номинальным вторичным напряжением  $U_{\text{нас.ном.факт}}$  при отсутствии в первичном токе аperiodической составляющей и фактическим предельным вторичным напряжением  $U_{\text{нас.факт}}$  при наличии в токе аperiodической составляющей и нагрузке  $z_{\text{н.факт}}$ , отличающейся от номинального значения

$$U_{\text{нас.факт}} \approx U_{\text{нас.ном.факт}} \quad (11)$$

Тогда порядок расчёта времени до насыщения ТТ класса Р в переходном режиме с учётом фактического значения номинальной предельной кратности следующий.

1. Вычисляется фактическое напряжение  $U_{2 \sin}$  на вторичной обмотке при протекании периодического тока КЗ

$$U_{2 \sin} = K_{\text{факт}} I_{2 \text{ ном}} z_{2 \Sigma \text{факт}}, \quad (12)$$

где  $K_{\text{факт}} = \frac{I_{\text{кз}}}{I_{1 \text{ ном}}}$  – фактическая кратность тока КЗ;  $I_{\text{кз}}$  – действующее значение периодической со-

ставляющей тока КЗ;  $I_{1 \text{ ном}}$  – номинальный первичный ток ТТ;  $z_{2 \Sigma \text{факт}}$  – фактическое суммарное сопротивление ветви вторичного тока ТТ.

2. По выражению (10) вычисляется фактическое номинальное значение напряжения насыщения  $U_{\text{нас.ном.факт}}$ , соответствующее нормированному значению  $\varepsilon$  (10 или 5%).

3. Вычисляется значение параметра режима  $A$  без учёта остаточной магнитной индукции  $B_r$

$$A = \frac{U_{\text{нас.ном.факт}}}{U_{2 \sin}}, \quad (13)$$

а также параметра режима  $A_r$  с учётом  $B_r$

$$A_r = A(1 - K_r). \quad (14)$$

4. По графикам зависимости  $K_{\text{п.р}}(t)$ , приведённым в [2], и значениям  $A$  и  $A_r$  с учётом соотношения (4) находят значение  $t_{\text{нас}}$ .

Следует подчеркнуть, что расчёт значений времени до насыщения ТТ, не превышающих 10 мс, по огибающей к линии  $K_{\text{п.р}}(t)$  не допустим, так как может приводить к значительным ошибкам и даже к отрицательным значениям указанного времени.

Необходимо отметить, что занижение отечественными производителями значения предельной кратности ТТ может явиться причиной отсутствия недопустимых погрешностей последних и, соответственно, правильного функционирования устройств РЗ в переходных режимах.

#### Остаточная магнитная индукция в магнитопроводах ТТ класса Р

В настоящее время стандартами [2, 3] рекомендуется выполнять расчёты при условиях совпадения максимального начального значения аperiodической составляющей тока КЗ и остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака.

Значение остаточной магнитной индукции в соответствии с [3] следует принимать на основании данных изготовителя ТТ (паспорта ТТ или другой эксплуатационной документации). При отсутствии данных значение коэффициента остаточной намагниченности  $K_r = \frac{B_r}{B_s}$  (где  $B_s, B_r$  – магнитная индукция насыщения и остаточная магнитная индукция соответственно) рекомендуется принять равным 0,65 – 0,71. Для обеспечения наибольшей надёжности работы электрических сетей по решению собственника электросетевого объекта – до 0,86.

Исследования [11, 12] показали, что в условиях эксплуатации на значение остаточной магнитной индукции в магнитопроводе ТТ влияет размагничивающее действие токов нагрузки.

На рис. 2 приведены результаты исследования [12] зависимости остаточной магнитной индукции в магнитопроводе ТТ от амплитуды магнитной индукции  $B_m$ , создаваемой током нагрузки и времени его протекания.

Значение  $B_m$  определяется с помощью выражения

$$B_m = \frac{I'_n (R_2 + R_n)}{222 w_2 s}, \quad (15)$$

где  $I'_n$  – приведённый к вторичной стороне ТТ ток нагрузочного режима;  $R_2$  и  $R_n$  – активное сопротивление вторичной обмотки ТТ и нагрузки соответственно;  $w_2$  – число витков вторичной обмотки ТТ;  $s$  – площадь сечения магнитопровода ТТ.

Измерение остаточной магнитной индукции производилось на физических моделях ТТ с помощью специализированного устройства для измерения параметров и поверки трансформаторов тока СТ Analyzer (производитель Omicron, Австрия). Значение предельной остаточной магнитной индукции принималось равным 1,55 Тл, что соответствует значению  $K_r = 0,86$ . Из приведённых на рис. 2 зависимостей видно, что в условиях эксплуатации через небольшое время после включения ТТ на нагрузочный ток можно ожидать значение  $K_r \approx 0,65 \div 0,7$ , что снижает требования к ТТ класса Р при переходных процессах.

Таким образом, значение  $K_r = 0,86$  целесообразно использовать, как принято в ФРГ [7], только для особо ответственных объектов в режиме повторного включения на КЗ выключателя в цикле АПВ. Но если указанные объекты будут оснащены специальными устройствами синхронизированного включения [13], обеспечивающими включение выключателя на сохранившееся КЗ в момент времени, при котором направление перемагничивания магнитопровода ТТ противоположно знаку остаточной магнитной индукции в нём, то значение  $K_r$  в расчётах может быть существенно снижено.

Возможности координации функционирования ТТ и устройств РЗ в [5] характеризуют с помощью коэффициента размерности переходного процесса  $K_{id}$ , который показывает, во сколько раз необходимо увеличить размеры (поперечное сечение магнитопровода) ТТ при наличии в первичном токе апериодической составляющей. В [7] он назван коэффициентом увеличения размеров ТТ.

Со значением  $K_{id}$  связано понятие времени достоверного измерения тока  $t_{рз}$ . Если магнитопровод ТТ насыщается за этот отрезок времени, то функция защиты (без учёта времени срабатывания выходных промежуточных реле) принимает решение о срабатывании или блокировании действия за время, не превышающее заданное значение.

Значения  $K_{id}$  и  $t_{рз}$  получаются путём аналитического расчёта коэффициента переходного режима  $K_{п.р}(t_{рз})$  или (что более точно) путём испытаний функций защиты с учётом самых неблагоприятных условий функционирования.

Время достоверного измерения значений тока ТТ в переходных режимах  $t_{рз}$  [правая часть условий (2) и (3)] зависит от целого ряда факторов (схемы и параметров электроэнергетической системы, вида, места и уровня тока КЗ, уставок защит, характеристик ТТ и др.) и до недавнего времени не определялось производителями защит. Поэтому некоторые из них вместо времени достоверного измерения в качестве временной меры указывали максимальное время срабатывания измерительного органа защиты.

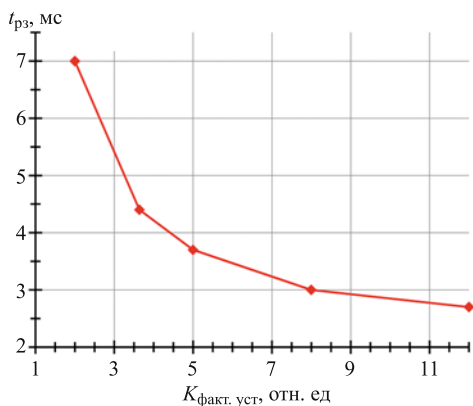
Результатом проверки пригодности ТТ класса Р с учётом предельного значения остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака в магнитопроводе часто является вывод о необходимости использования преобразователя тока с немагнитным зазором.

Однако исследования зарубежных производителей устройств РЗА, а также проведённые ООО НПФ “Квазар” совместно с ООО НПП “ЭКРА”, показали, что во многих случаях правильное срабатывание защит происходит при насыщенных ТТ. Следует отметить, что дистанционные защиты линий электропередачи, часто правильно функционируют в режимах близких КЗ в зоне действия и в режимах удалённых КЗ вне зоны действия, хотя в этих режимах время до насыщения ТТ может быть существенно меньше времени срабатывания защиты [14].

Следует различать три понятия, относящиеся ко времени функционирования устройства защиты:

минимально необходимое время достоверного измерения значения тока ТТ ( $t_{рз}$ ), при котором обеспечивается правильная работа устройств РЗ;

время принятия решения функцией защиты о нахождении КЗ в зоне или вне зоны действия



**Рис. 3.** Время достоверного измерения значений тока  $t_{\text{рз}}$  для функции междуфазной токовой отсечки, основанной на использовании мажоритарного принципа, шкафа резервных защит ВЛ в режиме близкого трёхфазного КЗ в зоне действия

( $t_{\text{реш}}$ ), равное сумме  $t_{\text{рз}}$ , времени накопления-обработки полученной информации и нерегулируемой выдержки времени (в некоторых защитах);

время срабатывания устройства РЗ, равное сумме  $t_{\text{реш}}$  и времени срабатывания выходных промежуточных реле, достигающего 20 мс.

Очевидно, что значение  $t_{\text{рз}}$  – самое минимальное из всех перечисленных.

После принятия решения функцией защиты [до срабатывания выходного(ых) реле], расширитель длительности импульса срабатывания удлиняет сигнал воздействия на выходное реле. В результате независимо от насыщения ТТ выходные реле в терминале и в шкафу защиты срабатывают. Таким образом, время достоверного измерения тока, необходимое для правильной работы устройств РЗ, значительно меньше времени срабатывания защиты. Данное положение объясняется следующим.

Во-первых, защита действует правильно при определённом времени до насыщения ТТ (в [6] названо допустимым), если соответствующая её функция принимает решение о местонахождении точки КЗ в зоне или вне зоны действия за некоторый отрезок времени, как правило, в пределах периода основной частоты тока. Кроме того, из-за наличия сопротивления нулевого провода в цепь вторичного тока ТТ с насыщенным магнитопроводом отходят вторичные токи других ТТ, соединённых с первым, например, в звезду [15]. Аналогичное явление имеет место при включении вторичных обмоток ТТ на сумму токов.

Во-вторых, производителями устройств РЗ разработаны и используются специальные алгоритмические решения, повышающие устойчивость функционирования защит в переходных режимах, сопровождающихся насыщением магнитопроводов ТТ класса Р. Благодаря этому расширяется область допустимого использования этих ТТ.

В качестве примера на рис. 3 приведена кривая зависимости времени достоверного измерения значений тока ТТ для функции междуфазной токовой отсечки (ТО), основанной на использовании мажоритарного принципа, шкафа резервных защит ВЛ сверхвысокого напряжения производства ООО НПП “ЭКРА” от кратности действующего значения периодической составляющей тока КЗ по отношению к уставке срабатывания функции защиты ( $K_{\text{факт.уст}}$ ) в режиме близкого трёхфазного КЗ в зоне действия. Указанная зависимость получена путём испытаний реального терминала РЗ и соответствует сочетанию наихудших значений постоянной времени затухания аperiodической составляющей ( $T_{\text{р.эКВ}}$ ) и начальной фазы периодической составляющей первичного тока в момент возникновения КЗ ( $\theta$ ). Видно, что значение  $t_{\text{рз}}$  является функцией только одной переменной – параметра  $K_{\text{факт.уст}}$ .

Значение параметра  $K_{\text{факт.уст}}$  определяется с помощью выражения

$$K_{\text{факт.уст}} = \frac{I_{\text{п.кз}}}{I_{\text{отс}}}, \quad (17)$$

где  $I_{\text{п.кз}}$  – значение периодической составляющей тока КЗ в зоне действия;  $I_{\text{отс}}$  – значение параметра срабатывания функции междуфазной отсечки защиты ВЛ.

Значение  $t_{\text{рз}}$  не превышает 7 мс, что существенно меньше времени срабатывания защиты.

Зависимости значений  $t_{\text{рз}}$  для других быстродействующих функций защит приведены в третьей редакции Методических указаний ООО НПП “ЭКРА” по проверке и выбору ТТ.

#### **О замене ТТ класса Р на ТТ с немагнитным зазором классов PR, TPY, TPZ**

Расчёт и опыт эксплуатации показывают, что вероятность глубокого насыщения магнитопровода ТТ, обусловленная совпадением значительного (превышающего 0,5 амплитуды периодической составляющей тока КЗ) начального значения аperiodической составляющей тока КЗ и предельного значения остаточной магнитной индукции неблагоприятного знака, невелика (не более 2%).

Следует отметить, что замена ТТ класса Р на ТТ с немагнитным зазором классов PR, TPY, TPZ не исключает насыщения магнитопроводов последних при КЗ вне зоны действия с наличием в первичном токе значительной аperiodической составляющей. Указанные ТТ также должны соответствовать требованию по времени достоверного измерения тока функциями защит. В первую очередь это относится к дифференциальным защитам сборных шин при КЗ вне зоны действия.

Кроме того, немедленная массовая замена ТТ класса Р в условиях действующих электроустановок напряжением выше 1 кВ связана с существен-

ными экономическими затратами и техническими трудностями. Последние обусловлены необходимостью демонтажа старых и последующего монтажа новых ТТ в действующих электроустановках, хотя эксплуатируемые аппараты во многих случаях удовлетворяют условиям эксплуатации. Однако в обсуждаемом в настоящее время проекте стандарта по выбору ТТ аппараты класса Р не упоминаются.

По указанной причине решение о замене ТТ класса Р должно приниматься с учётом следующих обстоятельств:

в расчётах времени до насыщения ТТ используются завышенные значения остаточной магнитной индукции в магнитопроводах аппаратов;

производители ТТ зачастую приводят заниженные значения  $K_{\text{ном}}$  и  $z_{\text{ном}}$ ;

разработаны и используются специальные алгоритмические решения, повышающие устойчивость функционирования устройств РЗ в переходных режимах, что расширяет допустимые границы использования ТТ класса Р;

при проверке соответствия характеристик ТТ класса Р условиям функционирования быстродействующих защит должны использоваться полученные экспериментально значения времени достоверного измерения тока ТТ  $t_{\text{рз}}$ ;

замена ТТ в условиях действующих электроустановок связана с существенными финансовыми и материальными затратами;

возможны затруднения с конструктивным размещением ТТ с немагнитным зазором в выключателях, а также во вводах силовых трансформаторов и автотрансформаторов.

### Характеристики ТТ класса PR

В соответствии со стандартом [3], указанные ТТ характеризуются номинальными первичным  $I_{1\text{ном}}$  и вторичным  $I_{2\text{ном}}$  токами, номинальным сопротивлением нагрузки  $z_{2\text{ном}}$ , номинальной предельной кратностью  $K_{\text{ном}}$ , коэффициентом остаточной магнитной индукции, а также допустимыми токовой и угловой погрешностями при номинальном первичном токе  $I_{1\text{ном}}$  и полной погрешностью при первичном токе с номинальной предельной кратностью. При проверке пригодности ТТ класса PR, их выборе, а также при формировании задания производителю ТТ кроме параметров, указанных ранее, используются значения активного сопротивления вторичной обмотки  $R_2$  и постоянной времени вторичного контура  $T_s = \frac{L_0 + L_2}{R_2}$ , где  $L_0, L_2$  – индуктивности ветви намагничивания и рассеяния вторичной обмотки соответственно.

Особенно важно знать значение  $T_s$ , по которому в нашей стране нет единого мнения. В частности, в проекте ГОСТ Р “Методические указания по

выбору трансформаторов тока классов точности PR, TPY, TPZ для обеспечения правильного функционирования релейной защиты в переходных режимах”, разработанном АО “СО ЕЭС” и ООО “Эльмаш (УЭТМ)”, подробно расписан процесс итеративного подбора значения параметра  $T_s$  для ТТ класса TPY. Однако нет пояснения, требуется ли подбор  $T_s$  для ТТ классов 5PR и 10PR. Для ТТ класса 10PR указано значение  $T_s \geq 32$  мс, т.е. практически в 2 раза меньше, чем у ТТ класса TPZ, которое приблизительно равно 61 мс [7], но далее в примере выбора для того же ТТ без обоснования принято значение  $T_s$ , равное 300 мс.

В проекте стандарта “Требования к работе устройств релейной защиты ЛЭП 110 кВ и выше в переходных режимах, сопровождающихся насыщением трансформаторов тока”, разработанном АО “СО ЕЭС”, значение постоянной времени вторичного контура  $T_s$  ТТ класса PR предложено принять равным 600 мс. О предлагаемом значении  $T_s$  ТТ класса Р ничего не сказано, кроме того, что при итеративном подборе её начальное значение предлагается принимать равным 182 мс, т.е. как и у ТТ класса TPY. При этом не учитывается, что ТТ класса Р не имеют немагнитного зазора в магнитопроводе, а ТТ класса TPY его имеют. Это значение мало для ТТ класса Р. Подтверждением этого является принятое в [7] в качестве примера для ТТ класса Р значение указанной постоянной, равное 5 с. Подводя итог сказанному, можно сделать вывод, что требуется обоснованное уточнение требуемых значений  $T_s$  для ТТ класса PR.

Расчёт времени до насыщения данных ТТ при известном значении  $T_s$  производится графическим методом аналогично расчёту для ТТ класса Р. Разница заключается лишь в используемом выражении для расчёта коэффициента переходного режима – оно должно учитывать две постоянные времени:  $T_p$  и  $T_s$ .

В [3] приведено выражение для вычисления  $K_{\text{п.р}}(t)$  по огибающей кривой. Следует отметить, определение значения  $t_{\text{нас}}$  по этому выражению допустимо только для времени до насыщения, превышающего 15 мс. В других источниках, например [6, 16, 17], приведены более точные выражения, учитывающие значения начальной фазы периодической составляющей тока.

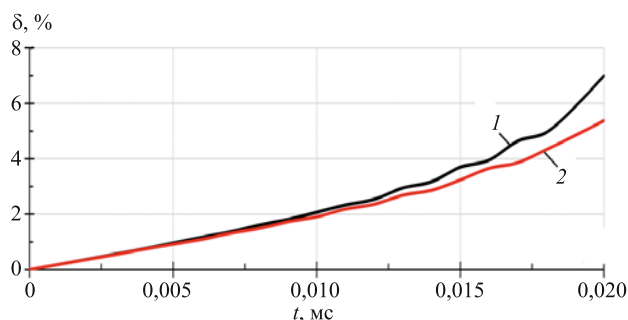
Если постоянная времени  $T_s$  неизвестна, то, как показали исследования, у ТТ класса 10PR требуемое её значение должно составлять:

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 TPY.

Установлено также, что при указанных ранее в статье значениях  $T_s$  допустимо вычислять время





**Рис. 4. Погрешность определения  $K_{п.р}(t)$  с учётом наихудших значений начальной фазы периодической составляющей тока КЗ при не учёте  $T_s$ :**

1 –  $T_p = 10$  мс,  $T_s = 182$  мс; 2 –  $T_p = 400$  мс,  $T_s = 182$  мс

до насыщения данных ТТ по универсальным характеристикам ТТ с прямоугольной характеристикой намагничивания (ПХН), приведённым в [2]. Указанные характеристики построены не по огибающей кривой  $K_{п.р}(t)$ , а при наихудших значениях начальной фазы периодической составляющей тока КЗ. Благодаря этому существенно повышается точность расчёта при времени до насыщения, меньшем 10 мс. Значение погрешности определения  $K_{п.р}(t)$ , как показано на рис. 4, при этом не превышает 2,5%.

Значение погрешности ( $\delta$ ) определения  $K_{п.р}(t)$  с учётом наихудших значений начальной фазы периодической составляющей тока КЗ при не учёте  $T_s$  на рис. 4 определено с помощью выражения

$$\delta = \frac{K_{п.р}(t, T_p) - K_{п.р}(t, T_p, T_s)}{K_{п.р}(t, T_p)} \cdot 100\%, \quad (18)$$

где  $K_{п.р}(t, T_p)$  – значение коэффициента переходного режима с учётом наихудших значений начальной фазы периодической составляющей тока КЗ для момента времени  $t$  при заданном значении  $T_p$  и без учёта  $T_s$ ;  $K_{п.р}(t, T_p, T_s)$  – значение коэффициента переходного режима с учётом наихудших значений начальной фазы периодической составляющей тока КЗ для момента времени  $t$  при заданных значениях  $T_p$  и  $T_s$ .

#### **О предложениях по испытаниям ТТ классов Р и PR в переходных режимах**

В упомянутом ранее проекте стандарта “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 математические модели ТТ и их программные реализации. В основу испытаний положена базовая модель ТТ, которая далее пересчитывается к расчётным условиям. На основании

таких испытаний предложено делать выводы о функционировании устройств релейной защиты при насыщении магнитопроводов ТТ.

Полезность данной работы не вызывает сомнений, однако имеются следующие замечания:

1. Предлагаемая в проекте стандарта методика подстройки ВАХ ТТ применительно к испытуемым защитам не обоснована теоретическими положениями, соответствующими математическими преобразованиями и экспериментальными данными. Отсутствуют обоснование предлагаемой методики масштабирования или ссылка на работу, в которой такое обоснование приведено. Нет обоснования выбора базовой ВАХ ТТ.

2. Указано, что при напряжённости 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 напряжённости магнитного поля составляет 1,55 Тл.

3. Вычисление средней длины силовой линии в магнитопроводе ТТ производилось по значению магнитной индукции, а не по напряжённости магнитного поля. В результате ошибка в вычислении указанной длины, как показывают расчёты, может превышать 100% и более.

4. Не указано при каких значениях начальной фазы ( $\theta$ ) периодической составляющей первичного тока в момент возникновения КЗ необходимо проводить испытания (при максимально содержании апериодической составляющей или другом).

5. Более целесообразно до испытаний выбрать реальные ТТ для защиты, затем по их параметрам разработать математические модели указанных ТТ, как это делается в отраслевом стандарте ПАО “ФСК ЕЭС” [18]. Не ясно, по какой причине в проекте стандарта не использовался такой подход.

6. Отсутствует подтверждение результатов моделирования физическими экспериментами. Нет также сведений о достижимости при испытаниях с помощью симулятора значений вторичных токов ТТ в переходных режимах с наличием в токе апериодической составляющей, соответствующих реальным токам КЗ до 40 – 60 кА.

7. Отсутствуют сведения о рекомендуемых для использования при испытаниях математических моделях ТТ и их программной реализации, а также о верификации указанных моделей.

#### **Выводы**

1. Обеспечение быстродействия и селективности быстродействующих устройств РЗ в ЭЭС России при переходных процессах с наличием в токах КЗ апериодической составляющей – актуальная задача. Одним из путей её решения является учёт

запаса в паспортных значениях номинальной предельной кратности и превышения остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ класса Р (без немагнитного зазора в магнитопроводе), снижения нагрузки на ТТ путём использования оптоволоконной связи между ТТ и устройствами РЗ, а также новых алгоритмических решений, используемых в современных устройствах РЗ.

2. Учитывая, что ТТ классов Р и PR не предназначены для работы в условиях переходных процессов, должна быть создана и утверждена нормативная база их характеристик, с помощью которых производители устройств РЗ могут предоставлять требуемые значения времени достоверного измерения тока. В качестве одного из элементов такой базы предложено использовать заводские данные ВАХ ТТ.

3. Предложена методика вычисления фактического значения предельной кратности первичного тока ТТ класса Р, базирующаяся на использовании их ВАХ. Установлены целесообразные значения постоянной времени вторичного контура ТТ класса PR, используемых в качестве источников информации о токе устройствами быстродействующих защит. Показано, что при этих значениях в расчётах времени до насыщения допустимо использовать универсальные характеристики ТТ с ПХН, приведённые в [2].

4. Проверка соответствия характеристик ТТ классов Р и PR условиям правильного функционирования устройств РЗ, а также выбор указанных аппаратов должны проводиться с использованием экспериментально установленных значений времени достоверного измерения тока  $t_{рз}$ .

5. На базе результатов исследований [11, 12] и предлагаемого усовершенствования алгоритма автоматического повторного включения (АПВ) [13] необходимо уточнить рекомендации по учёту остаточной магнитной индукции в магнитопроводах ТТ класса Р в расчётах времени до насыщения.

## Список литературы

1. *О мерах по недопущению неправильной работы устройств релейной защиты* [Электронный ресурс]: письмо заместителя министра энергетики от 02.04.2019 № ЧА-3440 / 10. – ([https:// docs.cntd.ru](https://docs.cntd.ru)).
2. *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* [Текст]: ГОСТ Р 58669-2019. – Введ. 2020-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020.
3. *Трансформаторы измерительные. Часть 2: Технические условия на трансформаторы тока* [Электронный ресурс]: ПНСТ 283-2018 ГОСТ Р. – (<https:// docs.cntd.ru>).
4. *Измерительные реле и оборудование релейной защиты. Часть 121: Функциональные требования к дистанционной защите* [Электронный ресурс]: МЭК 60255-121. Редакция 1.0 2014-03. – (<https:// ieeeexplore.ieee.org>).
5. *Трансформаторы измерительные. Часть 2: Дополнительные требования к трансформаторам тока* [Электронный ресурс]: ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015. – Введ. 2016-03-01. – (<https:// docs.cntd.ru>).
6. *Instrument Transformers. Part 100 Guidance for Application of Current Transformers in Power System Protection* [Electronic resource]: IEC 61869-100: 2017. – (<https:// ieeeexplore.ieee.org>).
7. *Циглер, Г. Цифровая дифференциальная защита. Принципы и область применения* [Текст] / Г. Циглер; пер. с англ. – М.: Знак, 2008. – 216 с.
8. *Шкафы РЗА серий ШЭ2607, ШЭ2710. Методические указания по проверке и выбору трансформаторов тока. ЭКРА* [Электронный ресурс]: 650323.085 Д. – Чебоксары: ООО НПП “ЭКРА”, 2021. – (<https:// ekra.ru>).
9. *Трансформаторы тока. Общие технические условия* [Электронный ресурс]: ГОСТ 7746-2001. – Введ. 2003-01-01. – (<https:// docs.cntd.ru>).
10. *Дроздов, А. Д. Расчёт режимов трансформаторов тока в релейной защите по номинальным или базисным параметрам* [Текст] / А. Д. Дроздов // *Электричество*. – 1968. – № 6. – С. 72 – 75.
11. *Баев, А. В. Остаточная индукция в трансформаторах тока релейной защиты* [Текст] / А. В. Баев. – *Электричество*. – 1971. – № 7. – С. 4 – 9.
12. *Дегтярёв, А. А. Определение остаточных магнитных индукций в тороидальных сердечниках трансформаторов тока класса Р для релейной защиты* [Текст] / А. А. Дегтярёв, С. Л. Кужеков, Н. А. Дони, А. А. Шурупов // *Релейная защита и автоматизация*. – 2021. – № 3. – С. 44 – 57.
13. *Способ автоматического повторного включения выключателя* [Текст]: пат. 2769342 Рос. Федерация: МПК H02 H3 / 6 / Дони Н. А., Шурупов А. А., Кужеков С. Л., Дегтярёв А. А.; патентообладатель ООО НПП “ЭКРА”. – заявл. 19.10.2021; опублик. 30.03.2022, Бюл. № 10 (56).
14. *Дегтярёв, А. А. Анализ и проверка соответствия характеристик трансформаторов тока класса Р условиям функционирования первых ступеней дистанционных защит линий электропередачи при переходных процессах* [Текст] / А. А. Дегтярёв, С. Л. Кужеков, Н. А. Дони, А. А. Шурупов, А. Ю. Федотов // *Электрические станции*. – 2019. – № 9. – С. 22 – 29.
15. *Кужеков, С. Л. Анализ мероприятий, исключающих неселективные действия дифференциальных защит сборных шин при внешних двухфазных коротких замыканиях с насыщением трансформаторов тока, включённых в неповрежденную фазу* [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярёв, Н. А. Дони, А. А. Шурупов, Л. Н. Костарев, А. Ю. Федотов // *Электрические станции*. – 2019. – № 9. – С. 22 – 29.
16. *Сирота, И. М. Переходные режимы работы трансформаторов тока* [Текст] / И. М. Сирота. – Киев: Издательство академии наук Украинской ССР, 1961. – 192 с.
17. *Кужеков, С. Л. Характеристики и выбор трансформаторов тока с немагнитным зазором для релейной защиты при наличии в первичном токе апериодической составляющей* [Текст] / С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярёв, Н. А. Дони, А. А. Шурупов // *Энергоэксперт*. – 2020. – № 3. – С. 18 – 20.
18. *Технические требования к микропроцессорным устройствам РЗА* [Электронный ресурс]: стандарт организации. – М.: ПАО “Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы”, 2016. – (<https:// www.fsk-ees.ru>).