

УДК 621.314.22.08

ЦИФРОВОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Ульянов* Д.Н., Плакидин** Р.С.

Аннотация

Применение измерительных трансформаторов с цифровым выходом дает дополнительные преимущества, связанные в том числе с повышением надёжности функционирования энергосистемы. С появлением цифровых измерительных трансформаторов меняется топология измерительного канала защиты и функциональные назначения его компонентов. В данной работе рассмотрены примеры миграции части функций из устройств защит в первичный преобразователь (цифровой трансформатор тока и напряжения).

Применение комбинированных цифровых трансформаторов расширяет область применения принципов дистанционной защиты, повышает точность определения места повреждения (ОМП) по параметрам аварийного режима, а также повышает точность и быстродействие выявления поврежденных линий при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ) в сетях среднего напряжения до 35 кВ.

Ключевые слова: цифровой трансформатор тока и напряжения, комбинированный измерительный трансформатор, катушка Роговского, емкостной делитель, шина процесса, синхронизированные векторные измерения (СВИ).

Введение

В настоящее время на объектах электроэнергетики все больше находят применение цифровые первичные измерительные преобразователи (трансформаторы), работа которых регламентирована международными стандартами серий IEC 61869 и IEC 61850. Главным отличием цифровых трансформаторов от традиционных является отсутствие вторичных аналоговых цепей и выдача измерительной информации (мгновенных значений сигналов тока и напряжения) в цифровом виде в соответствии с IEC 61850-9-2. Комбинированный измерительный трансформатор объединяет два устройства в одном корпусе – трансформатор тока (ТТ) и трансформатор напряжения (ТН). Это позволяет уменьшить угловую погрешность между

* ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Северный (Арктический) федеральный университет, Архангельск, Россия, d.ulyanov@ens.ru, ulyanov.d.n@edu.narfu.ru

** ООО «Инженерный центр «Энергосервис», Архангельск, Россия, r.plakidin@ens.ru

векторами тока и напряжения, и как следствие, улучшить характеристики работы релейной защиты и противоаварийной автоматики.

Выбор измерительных трансформаторов тока и напряжения для обеспечения правильной работы РЗА

В электроустановках всех классов напряжения измерительные органы устройств релейной защиты (РЗ) и противоаварийной автоматики (ПА) подключены к трансформаторам тока и напряжения. Выбор технических характеристик измерительных трансформаторов должен быть сделан в соответствии с параметрами защищаемого электрооборудования, схем сети и режимов электроэнергетической системы (ЭЭС) [1].

Так же одним из важных факторов, который влияет на выбор того или иного типа трансформаторов тока и напряжения, является суммарная нагрузка вторичных цепей и устройств РЗА, подключенных к их выводам (кернам) [2].

Очевидно, что от правильности подбора измерительных трансформаторов тока и напряжения зависит надежность и корректность функционирования релейной защиты и автоматики, а это, в свою очередь, влияет на надежность работы энергосистем.

Современные цифровые трансформаторы тока и напряжения преимущественно проектируются на первичных преобразователях без использования стальных сердечников, что изначально исключает такие негативные явления как насыщение и остаточная намагниченность в трансформаторах тока и феррорезонанс в трансформаторах напряжения [3].

Цифровые трансформаторы не предполагают наличие коэффициентов трансформации и предоставляют измерения в первичных значениях величин тока и напряжения, а полная погрешность измерений не зависит от вторичных нагрузок по причине их отсутствия. Передаваемые цифровыми комбинированными измерительными трансформаторами мгновенные и среднеквадратичные значения тока и напряжения приведены к первичным значениям и даже в отсутствии локальной и/или глобальной системы синхронизации времени на подстанции обеспечивают высокую точность измерения относительных углов тока и напряжения в рамках одного трехфазного присоединения.

Преимущества применения цифровых комбинированных измерительных трансформаторов с функцией СВИ

Для повышения надежности и обеспечения высокого быстродействия работы релейной защиты и противоаварийной автоматики компанией ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработан однофазный цифровой комбинированный измерительный трансформатор ЕСИТ на средний класс напряжения до 15 кВ с номинальным током 50 А и предельным током измерений в классе точности 0,5S до 1000 А, максимальный измеряемый ударный ток короткого замыкания составляет 42 кА при классе точности 5PR400. Уникальной особенностью данного измерительного

трансформатора можно считать возможность его использования для измерения напряжения в классе точности 0,5/3Р в широком диапазоне номинальных значений от $3000/\sqrt{3}$ В до $16000/\sqrt{3}$ В без дополнительной перекалибровки и подстройки. Это стало возможным благодаря применению схемы активно-емкостного делителя.

В качестве первичного преобразователя тока в ЕСИТ используется катушка Роговского, что исключает негативный эффект насыщения магнитопровода и обеспечивает точные измерения тока во всем диапазоне значений электродинамической стойкости трансформатора. Для ЕСИТ был синтезирован специальный цифровой фильтр для формирования синхрофазоров тока с учетом особенностей катушки Роговского и с улучшенными показателями по быстродействию в сравнении с требованиями к СВИ класса Р стандарта IEEE C37.118 [4]. Данный трансформатор можно подключать к шине процесса подстанции или непосредственно к устройству РЗА, установленному в той же ячейке КРУ(КСО). Цифровой трансформатор ЕСИТ располагает собственным релейным контактом для отключения высоковольтного выключателя, который может быть настроен на встроенную максимальную токовую защиту, что позволяет реализовать как основную, так и резервную защиту присоединения.

Комбинированный цифровой трансформатор ЕСИТ может передавать по шине процесса не только до трех потоков мгновенных измеренных значений тока и напряжений с настраиваемой частотой дискретизации от 4800 до 14400 Гц согласно стандарту IEC 61850-9-2 и корпоративному профилю ПАО Россети, но и значения синхровекторов тока и напряжения (50–400 раз в секунду) согласно стандарта IEEE C37.118. Для передачи по шине процесса вычисленных в ЕСИТ «быстрых» синхрофазоров однофазного тока и напряжения потребовалось видоизменить профиль Ethernet кадра по IEC 61850-9-2 с передачей вместо мгновенных значений сигналов значения комплексных амплитуд и фазового угла с настраиваемым количеством измерений 8, 16, 32, 64 и 96 раз за период промышленной частоты.

Использование цифровых комбинированных трансформаторов тока и напряжения в распределительных устройствах среднего напряжения с функцией измерения синхрофазоров тока и напряжения позволяет реализовать эффективные системы релейной защиты и автоматики, в том числе дистанционную защиту линии, дифференциальную защиту шин и силовых трансформаторов, централизованную резервную защиту присоединений [5].

Для достижения эффективной работы РЗА с использованием синхровекторов в ЕСИТ потребовалось обеспечить с одной стороны необходимую точность измерений при нормативных отклонениях промышленной частоты на ± 5 Гц и различных уровнях апериодической составляющей в сигнале при КЗ, а с другой стороны высокое быстродействие измерений синхровекторов. Для соответствия указанным требованиям в цифровых

трансформаторах должны применяться специальные алгоритмы цифровой обработки сигналов с учетом частотных и переходных характеристик встроенных первичных преобразователей.

Исходя из положений стандартов [6-7] можно выделить предельные угловые погрешности для классов точности ТТ и ТН, подключенных к РЗА (таблица 1).

Таблица 1. Погрешности традиционных ТТ и ТН, подключенных к РЗА

Класс точности ТТ	Погрешность ТТ при номинальном токе	Угловая погрешность при номинальном токе	Суммарная погрешность при токе предельной кратности	Класс точности ТН	Погрешность ТН при номинальном напряжении	Угловая погрешность
5Р	±1%	±60 мин	5%	3Р	±3%	±120 мин
10Р	±5%	-	10%	6Р	±6%	±240 мин

Таким образом, суммарная погрешность в измерительном канале релейной защиты, обусловленная погрешностью ТТ и ТН, может достигать существенных значений, в зависимости от используемого алгоритма и типа защиты и условий протекания аварийного процесса, и приводить к некорректному действию защиты. В этом отношении применение цифровых комбинированных измерительных трансформаторов тока и напряжения позволяет получить гораздо более точные измерения сигналов в различных условиях, и тем самым сделать более эффективной работу самой релейной защиты.

Рассмотрим, как погрешность ТТ и ТН может влиять на работу дистанционной защиты линии.

В простейшем случае, исходя из традиционного способа оценки сопротивления линии при КЗ [8], погрешность этой оценки будет определяться из выражения:

$$\hat{z}(t) = \frac{\dot{U}(t)}{\dot{I}(t)} = \frac{\dot{U}_m(t)[1 \pm \varepsilon_U e^{j(\varphi_U \pm \Delta\varphi_U)}]}{\dot{I}_m(t)[1 \pm \varepsilon_I e^{j(\varphi_I \pm \Delta\varphi_I)}]} = \hat{z}_m(t) + \Delta\hat{z}(t), \quad (1)$$

где $\dot{U}_m(t)$, $\dot{I}_m(t)$ – теоретические значения векторов тока и напряжения;
 ε_U , ε_I , $\Delta\varphi_U$, $\Delta\varphi_I$ – амплитудные и угловые погрешности ТН и ТТ;
 $\hat{z}_m(t)$, $\Delta\hat{z}(t)$ – теоретическое значение и погрешность оценки комплексного сопротивления линии.

Как можно видеть из выражения (1), погрешность оценки комплексного сопротивления линии может значительно превосходить погрешности ТТ и ТН, взятые отдельно, поскольку зависимость комплексная и может быть нелинейной в зависимости от характеристик ТТ и ТН. При этом следует иметь в виду, что фактический алгоритм дистанционной защиты, который должен предусматривать отстройку от ряда влияющих факторов, будет гораздо сложнее, и влияние погрешности $\Delta\hat{z}(t)$ может быть еще менее предсказуемым.

В этом случае, чтобы сравнить влияние характеристик традиционных электромагнитных ТТ и ТН и цифровых комбинированных измерительных трансформаторов тока и напряжения (рис. 1), можно воспользоваться эмпирическими результатами, полученными в виртуальной модели Simulink.

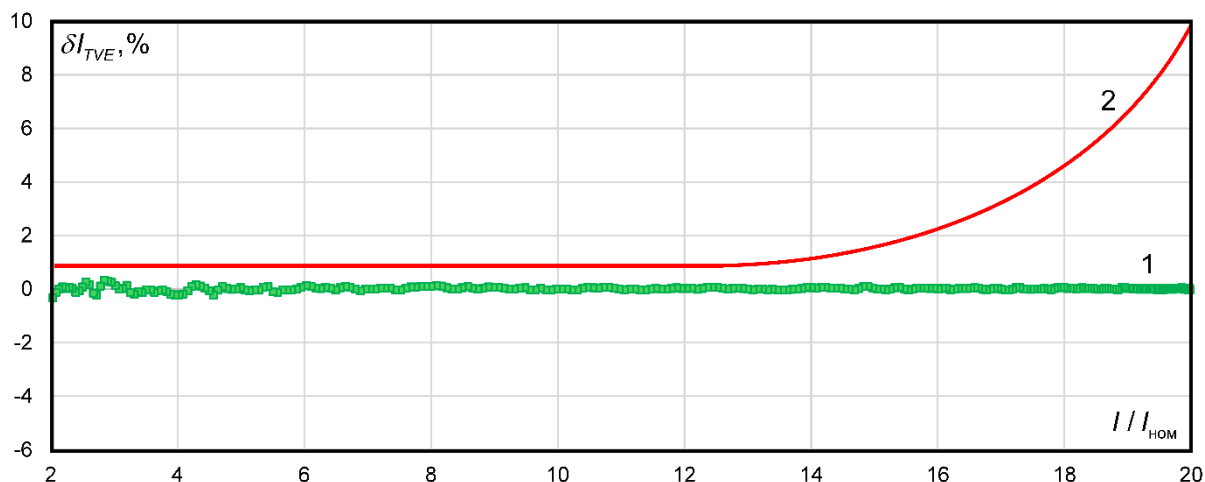


Рис. 1 – Характеристика полной погрешности измерений тока ЕСИТ (1) и традиционного ТТ с магнитным сердечником (2).

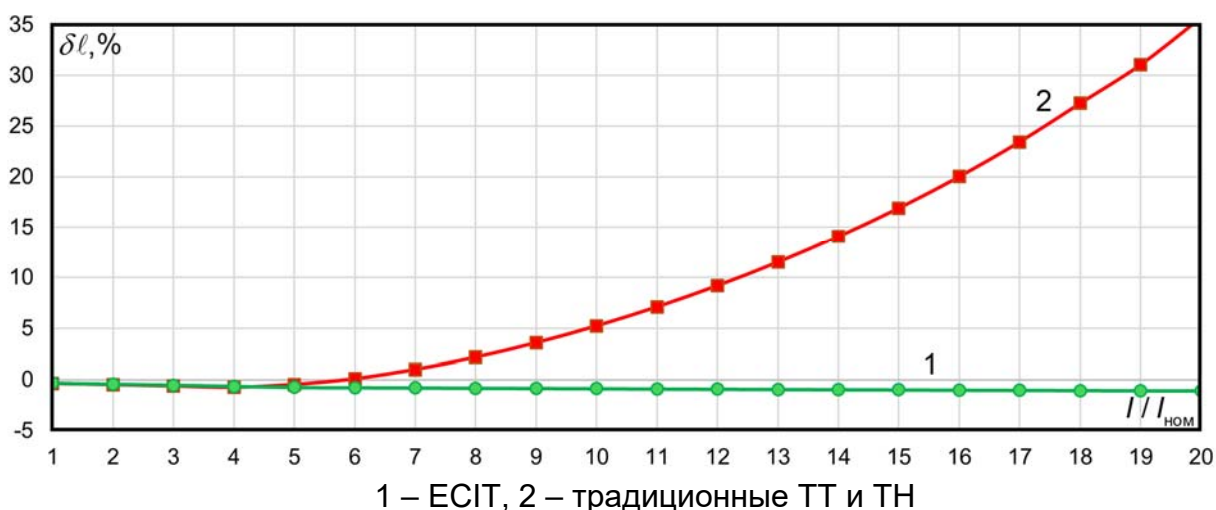


Рис. 2 – Сравнение результатов оценки расстояния до точки КЗ (ОМП).
1 – ЕСИТ, 2 – традиционные ТТ и ТН

На рис. 2 показаны результаты сравнения, которые представляют собой зависимость относительной погрешности оценки расстояния до точки КЗ δl от величины тока КЗ.

Измерительный трансформатор ЕСИТ имеет высокую чувствительность к токам нулевой последовательности как основной, так и высших гармоник при ОЗЗ, благодаря измерению фазных токов от 0,1 до 1 А с полной погрешностью измерения вектора (TVE) не более 1,5%. Это позволяет в устройствах РЗА, подключенных к ЕСИТ, точно вычислять не только величину тока нулевой последовательности, но и фазу угла относительно напряжения нулевой последовательности, что обеспечивает работу специальных алгоритмов определения поврежденных ОЗЗ линий, в том числе в режимах с изолированной и компенсированной нейтралью.

Нужно отметить, что в сетях с изолированной нейтралью распространённым является применение токовых защит от ОЗЗ нулевой последовательности (НП) сигнала промышленной частоты и защит, основанных на оценке направления мощности НП [9]. Тем не менее, в сетях с воздушными линиями, в отличие от кабельной сети, токи ОЗЗ значительно меньше и могут иметь суммарные значения всего 1-2 А, что означает, что по отдельным участкам сети, где производятся измерения, токи НП будут менее 1 А.

Для большинства используемых электромагнитных ТТ НП, которые устанавливаются в ячейке распределительного устройства на кабельную разделку, измерения менее 1 А не нормируются и могут иметь значительную погрешность, что существенно осложняет реализацию защиты от ОЗЗ из-за ее низкой чувствительности. Кроме того, для воздушных линий, имеющих отпайки, на которых установлены реклоузеры, применение традиционных ТТ НП тороидального исполнения затруднительно.

Как известно из теоретических основ электротехники ток НП может быть выражен через сумму фазных токов линии:

$$i_0(t) = \frac{1}{3} [i_a(t) + i_b(t) + i_c(t)]. \quad (2)$$

Таким образом, наличие синхронизированных фазных измерений тока, которые ЕСИТ может обеспечить локально в месте установки, позволяет реализовать измерения тока НП, а наличие также измерений фазных напряжений позволяет реализовать локальную защиту от ОЗЗ на основе расчета направления мощности НП [10]. Высокая точность измерений ЕСИТ по сравнению с характеристиками традиционного ТТ НП обеспечивает более высокую чувствительность защиты при малых токах НП (рис. 3).

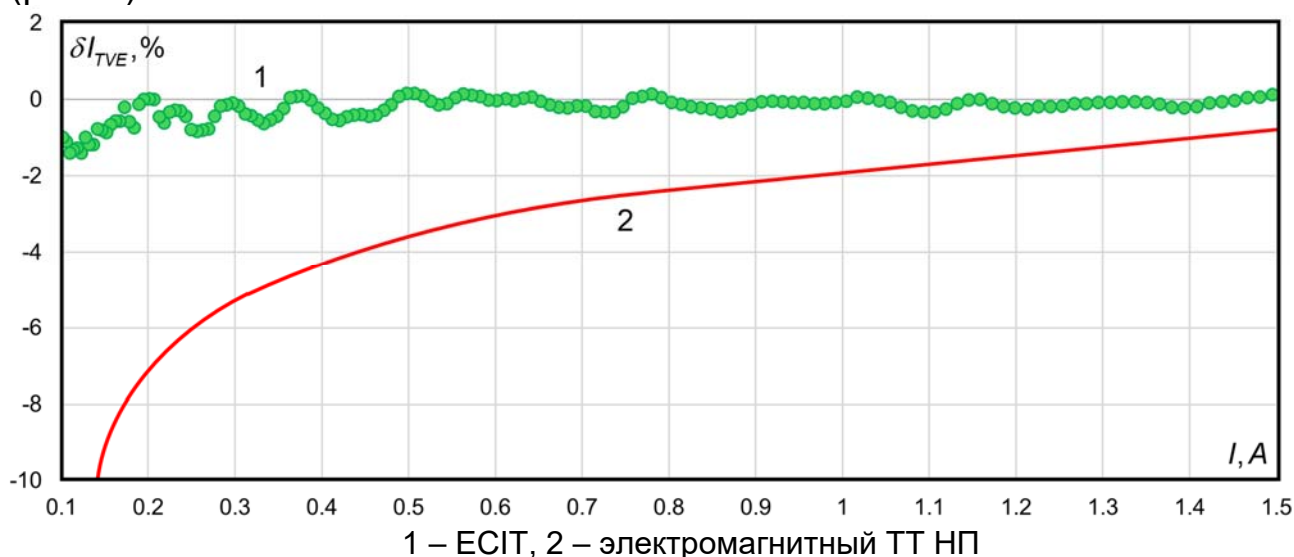


Рис. 3 – Сравнение характеристик ТТ НП и ЕСИТ при измерении тока НП.

Одним из наиболее перспективных направлений применения цифровых трансформаторов тока является дифференциальная защита. Рас-

смотрим на примере оценки расчетного тока небаланса в дифференциальной защите силового трансформатора (СТ) насколько может быть повышена чувствительность такой защиты к внутренним повреждениям СТ.

Общее выражение для оценки тока небаланса дифференциальной защиты СТ:

$$I_{нб} = (k_{апер}k_{одн}\varepsilon + \Delta U_{рег} + \Delta f_{выр})I_{вн.мах} + I_{нам}, \quad (3)$$

где $k_{апер}$ – коэффициент, учитывающий апериодическую составляющую тока КЗ,

$k_{одн}$ – коэффициент, учитывающий однотипность трансформаторов тока ВН и НН,

ε – предел допускаемой погрешности ТТ в установившемся режиме КЗ,

$\Delta U_{рег}$ – составляющая, учитывающая работу ПБВ/РПН в трансформаторе,

$\Delta f_{выр}$ – составляющая, учитывающая схему соединения ТТ в защите,

$I_{вн.мах}$ – максимальный внешний ток КЗ (ток КЗ на выводах обмотки НН),

$I_{нам}$ – ток намагничивания трансформатора.

Второе слагаемое в выражении (3) – ток намагничивания СТ – определяется величиной броска тока намагничивания (БНТ), от которого дифференциальная защита СТ либо отстраивается (так называемая дифференциальная отсечка), либо блокируется. В нормальном режиме работы СТ ток $I_{нам}$ составляет менее 1-2% от номинального тока СТ и может не учитываться в оценке влияния погрешности ТТ при КЗ.

Первое слагаемое (3) зависит от величины тока КЗ на выводах обмотки НН силового трансформатора и от набора коэффициентов, определяющих погрешность измерительного канала защиты. В худшем случае для защиты максимальные значения этих коэффициентов будут равны:

$$k_{апер} = 2, k_{одн} = 1, \varepsilon = 0,1, \Delta U_{рег} = 0,16, \Delta f_{выр} = 0,05.$$

Таким образом, максимальный ток небаланса, обусловленный погрешностью измерительного канала защиты при внешнем КЗ:

$$I_{нб} = (2 \cdot 1 \cdot 0,1 + 0,16 + 0,05)I_{вн.мах} = 0,41I_{вн.мах}.$$

Из этого следует, что максимальный ток небаланса может составлять более 40% от тока КЗ, что фактически делает такую дифференциальную защиту нечувствительной к КЗ в обмотке НН.

Безусловно, что в современных микропроцессорных устройствах защиты часть коэффициентов из выражения (3) уже снижена. Тем не менее, оценим, на сколько может быть снижен ток небаланса при применении цифрового трансформатора ЕСИТ:

- наличие фильтрации апериодической составляющей, $k_{апер} = 1$,
- однотипные характеристики ТТ ВН и НН, $k_{одн} = 0,5$,
- отсутствие эффекта насыщения при больших токах КЗ, $\varepsilon = 0,005$,

- возможность с помощью синхронизированных векторных измерений контролировать положение ступени РПН, $\Delta U_{\text{рег}} = 0$,
- отсутствие погрешности, вызванной схемой подключения ТТ и незначительная погрешность цифровой обработки сигнала $\Delta f_{\text{выр}} < 0,01$.

Таким образом, с учетом указанных выше условий для снижения тока небаланса в дифференциальной защите:

$$I_{\text{нб}} = (1 \cdot 0,5 \cdot 0,005 + 0,01) I_{\text{вн.мах}} = 0,0125 I_{\text{вн.мах}}.$$

В результате ток небаланса может быть снижен до величины не более 1,3% от тока КЗ, что делает дифференциальную защиту более чувствительной даже к таким сложным типам внутренних повреждений, как витковые замыкания и пожар в стали. Кроме того, поскольку ЕСИТ обеспечивает работу в диапазоне измерительной и релейной обмотки традиционного электромагнитного ТТ одновременно, параллельно с работой защиты также могут быть реализованы функции мониторинга состояния силового трансформатора для предотвращения развития сложных типов повреждений, к которым защита не чувствительна.

Необходимо отметить, что использование цифровых измерительных трансформаторов дает возможность реализации функций РЗА не только внутри разного рода специализированных устройств, но и на базе высокой степени резервируемых серверных платформах, содержащих большой набор централизованных защит и автоматики. Возможность гибкого комбинирования для каждого конкретного случая принципов централизованной и распределенной защиты и противоаварийной автоматики безусловно сказывается на повышении надежности функционирования РЗА на объектах электроэнергетики.

Использование в шине процесса вместо SV-потока мгновенных значений потока синхровекторных измерений позволит значительно повысить пропускную способность сети передачи-данных шины процесса и снизить требования к вычислительной мощности конечных устройств, реализующих функции РЗА за счет того, что вся обработка входного сигнала и определение значений комплексной амплитуды и фазового угла уже произведена непосредственно в самом измерительном трансформаторе.

Немаловажным фактором повышения надежности функционирования всего комплекса релейной защиты и автоматики является наличие в цифровых измерительных трансформаторах постоянной самодиагностики и возможности выдачи мгновенной предупредительной сигнализации в систему управления электроустановкой о качестве выполняемых измерений. Благодаря непрерывному обмену данными по цифровой сети обеспечивается возможность автоматического реагирования на сбой в работе устройств и перестройка «на лету» алгоритмов работы, а любая потеря связи с цифровым трансформатором немедленно проявляется как сигнал тревоги.

Заключение

Применение цифровых измерительных трансформаторов, возникших в результате развития информационно-вычислительных технологий, позволяет повысить надёжность систем энергетики при их функционировании и развитии за счет следующих возможностей:

- 1) Онлайн самодиагностика и обеспечение автоматического контроля целостности информационного обмена с комплексом защит, автоматики и систем управления на энергообъектах.
- 2) Отсутствие негативных явлений, таких как насыщение магнитопровода и феррорезонанс.
- 3) Упрощение методики выбора типов измерительного оборудования, т.к. не требуется поэтапного подбора первичных номинальных значений в широком диапазоне измерений с учетом коэффициента предельной кратности и нагрузки вторичных цепей.
- 4) Обеспечение высокого уровня резервирования (в т.ч. дублирования) функций релейной защиты и автоматики на всех уровнях присоединений в электроустановке.
- 5) Повышение быстродействия отключения КЗ в линиях по дистанционному принципу и КЗ в СТ по дифференциальному принципу.
- 6) Повышение точности ОМП и определения ОЗЗ для комбинированных измерительных трансформаторов.

Литература

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем: Учеб. для вузов 2-е издание, переработанное и дополненное, М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.: ил.
2. ПНСТ 283-2018. Трансформаторы измерительные, часть 2. Технические условия на трансформаторы тока.
3. Thomas R. et al. Non-conventional Instrument Transformers Enabling Digital Substations for Future Grid // IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 2016
4. A.V. Mokeev. Filter synthesis for PMU (IEEE Conference SIBCON-2017 Astana).
5. А.В. Мокеев, Л.В. Перелыгин, Е.И. Хромцов Комбинированные первичные измерительные преобразователи тока и напряжения 6-35 кВ (Новое в российской энергетике 2017 № 1. С. 39-52).
6. ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
7. ГОСТ 1983-2001. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.
8. Шнеерсон Э.М. Дистанционные защиты. М.: Энергоатомиздат, 1986. 448 с.
9. Шуин В.А., Гусенков А.В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6-10 кВ // М.: НТФ «Энергопрогресс». 104 с.
10. Piskunov S. A., Mokeev A. V., Ulyanov D. N. Improvement of Ground Fault Protection Based on Equivalent Synchrophasors // 2023 6th International Scientific and Technical Conference on Relay Protection and Automation (RPA). IEEE, 2023. Т. 1. С. 1-14.