

Авторы:

Ульянов Д.Н.^{1,2},
 Андреев П.И.^{1,2},
 Мартынов А.Н.^{1,2},
 Пискунов С.А.²,
 Плакидин Р.С.²,
 Сеитов П.В.²,
 д.т.н. Мокеев А.В.^{1,2},
¹Северный (Арктиче-
 ский) федеральный
 университет им. М.В.
 Ломоносова (САФУ),
²ООО «Инженерный
 центр «Энергосервис»,
 г. Архангельск, Россия.

Ulyanov D.N.^{1,2},
 Andreev P.I.^{1,2},
 Martynov A.N.^{1,2},
 Piskunov S.A.²,
 Plakidin R.S.²,
 Seitov P.V.²,
 D.Sc. Mokeev A.V.^{1,2},
¹Northern (Arctic)
 Federal University,
²Engineering Center
 «Energoservice» LLC,
 Arkhangelsk, Russia.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОНИЗИТЕЛЬНЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

AUTOMATION OF DISTRIBUTION SUBSTATIONS BASED ON DIGITAL COMBINED INSTRUMENT TRANSFORMERS

Дата поступления рукописи в редакцию: 11.02.2026
 Дата принятия рукописи в печать: 12.03.2026

Аннотация: рассматриваются вопросы создания систем автоматизации пониженных подстанций при использовании цифровых комбинированных измерительных трансформаторов тока и напряжения со встроенными функциями защиты и измерений синхровекторов тока и напряжения. Показано, что применение комбинированных цифровых измерительных трансформаторов на основе катушки Роговского и емкостного делителя напряжения позволяет повысить качество измерений и тем самым повысить эффективность устройств релейной защиты, систем измерений и систем мониторинга состояния электрооборудования. Математическое моделирование и испытания цифровых комбинированных измерительных трансформаторов подтвердило их соответствие требованиям российских и международных стандартов. Предложенные варианты архитектуры системы автоматизации пониженных подстанций с использованием цифровых измерительных трансформаторов с поддержкой синхронизированных векторных измерений позволяют повысить точность оценки параметров режима электрической сети и параметров ее схемы замещения. Их внедрение позволит повысить техническое совершенство систем РЗА, измерений и мониторинга состояния электрооборудования. Результаты опытно-промышленной эксплуатации систем автоматизации пониженных подстанций подтвердили эффективность применения комбинированных цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Ключевые слова: цифровые измерительные трансформаторы тока и напряжения, катушка Роговского, емкостный делитель напряжения, синхронизированные векторные измерения (СВИ), релейная защита и автоматика, мониторинг состояния силового трансформатора.

Abstract: this paper examines the implementation of a distribution substation automation system based on digital combined instrument transformers with integrated protection and current and voltage synchrophasor measurement. The study demonstrates

Введение

Недостатки применения традиционных электромагнитных трансформаторов тока (ТТ) и напряжения (ТН) хорошо известны и связаны с явлениями насыщения и остаточной намагнитченности [1, 2]. Поэтому автоматизация пониженных подстанций нового поколения невозможна без применения первичных измерительных преобразователей тока и напряжения на иных физических принципах. Наибольшее распространение для измерения тока получили такие преобразователи, как катуш-

ка Роговского, датчики на основе эффекта Холла и оптические преобразователи. Для измерения напряжения используются емкостные, резистивные или емкостно-резистивные преобразователи. Преимущества указанных измерительных преобразователей связаны с точным измерением тока и напряжения в большом динамическом диапазоне.

В настоящее время применяются аналоговые маломощные пассивные и активные первичные измерительные преобразователи тока и напряжения, а также цифровые из-

мерительные трансформаторы [3, 4]. За рубежом в распределительных устройствах среднего напряжения (РУ СН) используются преимущественно пассивные [5] или активные [6] измерительные преобразователи, а на высоком напряжении – цифровые измерительные ТТ и ТН [7].

Российские компании первыми стали внедрять цифровые ТТ и ТН на среднем напряжении [4, 8]. Преимуществами такого решения являются улучшение помехозащищенности, метрологических характеристик измерительных трансформаторов, упрощение процесса калибровки и возможность самодиагностики измерительного трансформатора [4].

Применение цифровых измерительных ТТ и ТН предполагает использование шины процесса для организации передачи данных выборок мгновенных значений тока и напряжения (SV-поток). Ограничение в реализации полноценной шины процесса при автоматизации РУ СН связано прежде всего с существенным удорожанием системы. При этом недостаточно разработать и освоить серийное производство цифровых измерительных ТТ и ТН невысокой стоимости. Основной вклад в удорожание системы автоматизации в настоящее время вносит коммуникационное оборудование промышленных локальных сетей Ethernet. Поэтому реализация шины процесса в РУ СН в большинстве практических случаях нецелесообразна с экономической точки зрения.

Предлагаемый авторами статьи подход связан с применением цифровых комбинированных измерительных трансформаторов (ЦКИТ) и организацией шины процесса внутри высоковольтной ячейки, а для организации связи между интеллектуальными устройствами по шине подстанции предусматривается передача наряду с MMS- и GOOSE-сообщениями потоков синхровекторов тока и напряжения (SP-поток) с уменьшенным отношением к стандарту на передачу SV-потоков количеством вычисленных синхровекторов за период промышленной частоты [9]. Это упрощает и удешевляет реализацию локальных, распределенных и централизованных систем защиты и автоматики понизительных подстанций и распределительных пунктов [10].

Кроме того, комплексная автоматизация понизительных подстанций с реализа-

цией различных подсистем автоматизации: защиты и автоматики, телемеханики, измерений (в т.ч. учет электроэнергии, измерение и регистрация параметров качества электроэнергии), мониторинга состояния электрооборудования, мониторинга перегрузочной способности трансформаторов и т.д. – может быть наиболее эффективно решена путем внедрения цифровых измерительных ТТ и ТН.

В РУ СН целесообразно применение многофункциональных комбинированных цифровых трансформаторов тока и напряжения со встроенными функциями измерений и защиты для построения различных вариантов архитектуры системы автоматизации понизительных подстанций и распределительных пунктов.

Архитектура системы автоматизации понизительной подстанции

Общие сведения

Использование SP-потоков вместо SV-потоков значительно уменьшает трафик передачи данных за счет снижения количества выборок, что позволяет использовать для передачи данных шину подстанции.

Применение в составе ЦКИТ в качестве первичного преобразователя тока катушки Роговского позволяет реализовать измерения тока с высокой точностью (не хуже 0,5S по ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015) на всем диапазоне измерений от 5% номинального тока и до тока предельной кратности с передачей измеренных значений в одном потоке выборок, а не по отдельности, как принято сейчас выделять измерительный и релейные SV-поток. При этом потоки синхровекторов могут заменить также часть MMS-сообщений. Для передачи SP-потоков целесообразно использовать протокол передачи данных на основе стандарта IEC 61850-9-2 [10].

Целесообразность измерения и передачи синхровекторов в цифровых измерительных трансформаторах обусловлена в том числе и необходимостью выполнения диагностики измерительных каналов [11], предполагающей измерение и анализ параметров токов и напряжений по основной гармонике.

Современные микроконтроллеры, начиная от ARM Cortex M4, ARM Cortex R5 и RISC V со встроенными портами Ethernet, обладают большими вычислительными

that combined digital instrument transformers based on a Rogowski coil and a capacitive voltage divider improve the quality of measurements and the efficiency of protection devices, measurement systems, and electrical equipment condition monitoring systems. Mathematical modeling and testing of the digital instrument transformers confirm their compliance with Russian and international standards. The proposed architectures for a distribution substation automation system based on digital instrument transformers with synchrophasor measurement support ensure accurate estimation of the electrical network state parameters and its equivalent circuit. This enhances the technical excellence of protection and automation systems, as well as measurement and electrical equipment condition monitoring systems. The results of pilot operation of distribution substation automation systems confirm the effectiveness of combined digital current and voltage instrument transformers.

Keywords: digital combined instrument transformers, Rogowski coil, capacitive voltage divider, synchronized phasor measurements, protection and automation, power transformer condition monitoring.



Ульянов

Дмитрий Николаевич

В 1998 г. окончил Архангельский государственный технический университет (в настоящее время САФУ), специальность «Электроснабжение». Аспирант САФУ, направление подготовки «Электротехнические системы и комплексы». Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис».



Андреев

Павел Игоревич

В 2017 г. окончил САФУ, специальность «Мехатроника и робототехника». Аспирант САФУ, направление подготовки «Электротехнические системы и комплексы». Инженер-программист ООО «Инженерный центр «Энергосервис».

возможностями и обеспечивают поддержку операций с плавающей запятой. Это позволяет реализовать в цифровых измерительных трансформаторах дополнительные функции, прежде всего функции устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА), измерительных преобразователей действующих значений, счетчиков учета электроэнергии. Такие возможности превращают цифровые измерительные трансформаторы из простых преобразователей аналоговых сигналов в multifunctional устройства.

Система РЗА

Рассмотрим архитектуру построения системы автоматизации понизительных подстанций на примере различных вариантов реализации системы РЗА подстанции. Под системой РЗА будем понимать в простейшем случае набор локальных устройств РЗА присоединений. В других случаях система РЗА подстанции включает в себя несколько уровней защиты и автоматики.

Реализация в ЦКИТ функций встроенной РЗА позволит выполнить защиту присоединения «последнего резерва». Это позволит повысить надежность системы РЗА, снизить требования к промышленной локальной сети Ethernet на подстанции. Что в итоге приведёт к удешевлению решения как в случае реализации локальной РЗА, так и при реализации централизованных и распределенных систем РЗА, в том числе и для набирающих популярность кластерных систем РЗА [12].

Альтернативный вариант размещения устройства РЗА связан с встраиванием его в интеллектуальный выключатель [5]. При этом первичные измерительные преобразователи выполняются в основном пассивными.

Применение ЦКИТ, интеллектуальных выключателей и интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) приводит к существенному расширению функций высоковольтной ячейки 6-35 кВ (КСО, КРУ, КРУЭ). Такие высоковольтные ячейки еще называют цифровыми ячейками [5, 13]. Они обладают рядом существенных преимуществ: высокая заводская готовность, простота в обслуживании, сокращение затрат на эксплуатацию ячейки и в целом распределительного устройства.

Следует отметить важность перехода к цифровым технологиям не только по отношению к измерительным ТТ и ТН, но и к другим источникам информации в высоковольтной ячейке. Это прежде всего относится к датчикам положения (положения коммутационной аппаратуры, выкатной тележки, дверцы высоковольтного отсека и т.д.), оптическим датчикам дуговой защиты, датчикам температуры, датчикам уровня частичных разрядов (ЧР) и др. Именно с большим количеством перечисленных выше датчиков и особенно при их дублировании для различных подсистем автоматизации подстанции связано большое число контрольных проводов и клемм. Это существенно затрудняет обслуживание высоковольтных ячеек, практически исключает поставку их заводом-изготовителем в состоянии полной готовности к эксплуатации и затрудняет поиск неисправностей и повреждений. Использование цифровых датчиков с подключением к низкоуровневой шине процесса внутри ячейки позволит существенно упростить компоновку и обслуживание ячеек [13]. Часть функций может быть реализована непосредственно в ЦКИТ, в частности температурный контроль шин, мониторинг частичных разрядов и фиксация дуговых замыканий в месте установки.

Поддержка в ЦКИТ функций измерения и передачи синхровекторов тока и напряжения позволяет создать различные варианты реализации системы РЗА на подстанции, в том числе многоуровневые системы.

Самой простой является одноуровневая система РЗА, которая включает в себя традиционный набор защит ввода и отходящих линий среднего напряжения, встроенных в ЦКИТ (рис. 1). Такой подход может

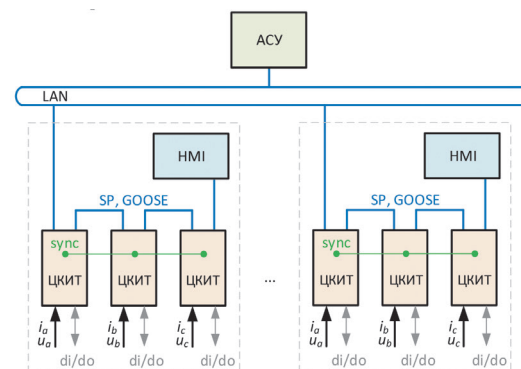


Рис. 1. Структурная схема одноуровневой системы РЗА на базе ЦКИТ

быть применен для понизительных подстанций и распределительных пунктов с невысоким уровнем ответственности, к примеру, с одной секцией шин или с небольшим количеством отходящих присоединений.

Если функциональных возможностей встроенной в ЦКИТ РЗА недостаточно, то применяется двух- или трехуровневая система РЗА. Возможна реализация трех вариантов двухуровневой системы РЗА. В первом варианте применяются локальные устройства РЗА на каждом или ряде присоединений, к примеру, на вводных и секционных выключателях. Второй вариант предполагает установку устройств РЗА на всех присоединениях и расширение их возможностей за счет обмена потоками синхровекторов и GOOSE-сообщениями. В этом случае реализуется распределенная система РЗА на мультиагентном принципе. При наличии информационного обмена расширяются функции защит и появляются дополнительные возможности по резервированию устройств РЗА. При сбоях и деградации локальной сети функции РЗА выполняются отдельными агентами – как локальными, так и встраиваемыми в ЦКИТ. В третьем варианте используются только встроенные в ЦКИТ устройства защиты и автоматики и централизованное устройство РЗА подстанции. На рис. 2 представлен один из возможных вариантов реализации двухуровневой системы.

Самым надежным вариантом реализации системы РЗА на подстанции является трехуровневая система РЗА, которая включает себя встраиваемые в ЦКИТ устройства РЗА, локальные устройства РЗА присоединений и централизованное устройство РЗА. В вариантах двухуровневой системы и в трехуровневой системе целесообразно в большинстве практических случаев на втором уровне использовать два многофункциональных интеллектуальных устройства: РЗА и измерительное ИЭУ.

При этом, если в трехуровневой системе произойдет отказ в работе локального устройства РЗА, то расширение функциональных возможностей встроенного в ЦКИТ устройства РЗА произойдет за счет информационного обмена с центральным устройством РЗА. А в случае отказа не только локального УРЗА, но и ЦКИТ, резервирование может быть выполнено за счет дорасчета в централизованном устройстве РЗА

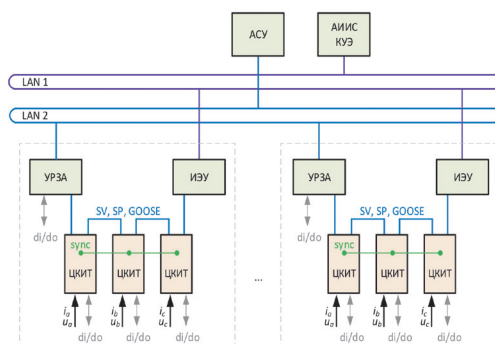


Рис. 2. Структурная схема двухуровневой системы РЗА на базе ЦКИТ

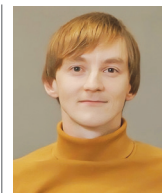
синхровекторов тока присоединения, в котором произошел полный отказ в работе устройств РЗА, на базе синхровекторов токов, поступающих от исправных устройств РЗА или ЦКИТ. Таким образом централизованное УРЗА выполняет функции неисправного устройства [14].

В итоге система РЗА подстанции в простейшем случае может быть одноуровневой и состоять из локальных встраиваемых в ЦКИТ устройств РЗА. При этом возможности информационного обмена ограничены передачей GOOSE-сообщений между локальными устройствами РЗА. Для повышения надежности следует применять двухуровневую или трехуровневую систему РЗА.

Дальнейшее развитие многоуровневых систем РЗА на подстанции связано с их интеграцией в глобальную систему защиты и автоматики (WAPS – Wide-area Protection System).

Система измерений

Архитектура системы измерений, в том числе телеизмерения, синхронизированные векторные измерения (СВИ) для систем управления, учета электроэнергии, измерения показателей качества электроэнергии (ПКЭ) гармонично интегрируется в рассмотренные выше варианты системы РЗА подстанции. Самый простой вариант связан также с одноуровневой системой измерений на подстанции в том случае, когда применяется комбинированный цифровой измерительный трансформатор тока и напряжения и требуется минимальный объем измерений (телеизмерения, технический учет электроэнергии, измерение обобщенных ПКЭ). При этом вывод измерительных данных производится на модуль индикации ячейки, используемый также для ото-



Мартынов

Андрей Николаевич

В 2014 г. окончил САФУ, специальность «Электро-снабжение промышленных предприятий». Аспирант САФУ, направление подготовки «Электротехнические системы и комплексы». Ведущий инженер отдела технической поддержки ООО «Инженерный центр «Энергосервис».



Пискунов

Сергей Александрович

В 2016 г. окончил САФУ, специальность «Электро-энергетика и электротехника». Инженер группы комплексного проектирования ООО «Инженерный центр «Энергосервис».



Плакидин

Роман Сергеевич

В 2008 г. окончил Архангельский государственный технический университет (в настоящее время САФУ), специальность «Метрология и метрологическое обеспечение».

Ведущий инженер по метрологии ООО «Инженерный центр «Энергосервис».



Сейтов

Павел Владимирович

В 2005 г. окончил Архангельский государственный технический университет (в настоящее время САФУ), специальность «Электроснабжение промышленных предприятий».

Начальник отдела технической поддержки ООО «Инженерный центр «Энергосервис».

бражения информации от встраиваемого в ЦКИТ устройства РЗА. При необходимости измерения большого количества параметров режима электрической сети используется двух- или трехуровневая система измерений.

Как указывалось выше, в большинстве практических случаев целесообразно использование многофункционального измерительного ИЭУ. При этом измерения производятся на основе SV-поток данных, получаемых от ЦКИТ. Данные, измеряемые в ЦКИТ, используются преимущественно для резервирования. ИЭУ должно выполнять функции многофункционального измерительного преобразователя телемеханики, устройства СВИ – для систем управления, счетчика электроэнергии (технический и коммерческий учет), прибора измерения показателей качества электроэнергии. На третьем уровне производится интеграция измерительной информации, дорасчет параметров и формирование данных с последующей передачей на верхние уровни управления.

Системы мониторинга состояния электрооборудования

В современных условиях важную роль для обеспечения надежной работы электрических сетей играют системы мониторинга и диагностирования состояния электрооборудования, такие как силовые и измерительные трансформаторы, высоковольтные выключатели, реакторы, БСК и др. Использование предиктивной оценки состояния оборудования на основе диагностируемых параметров позволяет в ряде случаев выявить начальный этап развития внутреннего дефекта электрооборудования и тем самым обеспечить своевременный вывод в ремонт с целью предотвращения аварийного выхода из строя и продление его срока службы.

Следует при этом отметить, что для большинства понизительных подстанций до 110 кВ систему автоматизации мониторинга и диагностирования (АСМД) силовых трансформаторов по технико-экономическим показателям целесообразно выполнять преимущественно на контроле электрических параметров [15, 16]. При этом в рамках мониторинга за состоянием электрооборудования обязательно должна выполняться предусмотренная приказом

Минэнерго [17] подсистема мониторинга перегрузочной способности трансформаторов и сквозных токов короткого замыкания (КЗ). Использование ЦКИТ позволяет наиболее эффективно решить задачи по мониторингу состояния силовых трансформаторов и другого электрооборудования [16].

В представленных выше вариантах архитектуры автоматизации понизительных подстанций важную роль играют применяемые ЦКИТ. Поэтому первостепенное значение приобретают вопросы выбора встроенных в ЦКИТ первичных измерительных преобразователей тока и напряжения, а также соответствие современным требованиям международных стандартов IEC измерительных ТТ и ТН, в том числе и цифровых.

Требования к цифровым ТТ и ТН

Требования к цифровым измерительным трансформаторам установлены в серии стандартов IEC 61869. В стандарте уточнены требования к частотным характеристикам (АЧХ, ФЧХ) трансформаторов. В том числе приведена частотная маска антиалиасингового фильтра, классы точности с требованиями к высшим гармоникам, возможность корректировки результатов измерений с учетом частотных характеристик. Указанные характеристики влияют на выбор измерительных ТТ с цифровым выходом для целей релейной защиты (РЗ).

Требования, приведенные ниже, актуальны как для маломощных измерительных трансформаторов (ММИТ, LPIT), так и для трансформаторов с цифровым выходом (в соответствии с требованиями IEC 61869-9:2016 [18]).

ТТ малой мощности (такие как оптические ТТ или катушки Роговского) имеют более широкий спектр применения, чем традиционные электромагнитные ТТ, поскольку имеют линейные характеристики и не насыщаются. Их можно применять при аварийных режимах, связанных с большими токами и высокой апериодической составляющей.

Из-за наличия в сети различных нелинейных нагрузок (например, оборудования железных дорог, ветреных и солнечных электрических станций) могут генерироваться различные гармоники [19, 20]. Высшие гармоники представляют интерес как

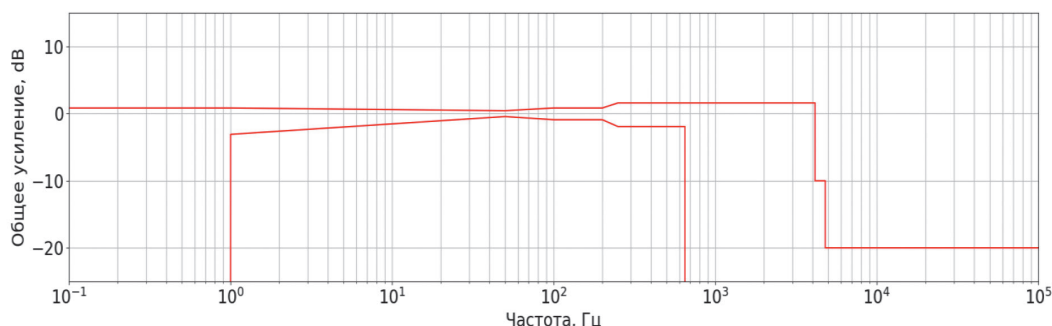


Рис. 3. Частотная маска для защитного класса точности 5P

для измерительных приложений (измерения, учёт, контроль качества электроэнергии), так и для целей защиты.

Для унификации нормирования частотных характеристик различными производителями стандартом [21] предусмотрен ряд требований: обозначение расширенных классов точности для работы на высоких частотах, соблюдение определенной частотной маски, возможность коррекции измерительного сигнала.

Чтобы дать краткое представление о характеристиках измерительных трансформаторов с точки зрения реакции на наличие гармоник, для каждого класса точности можно использовать дополнительное обозначение расширения класса точности [22]:

- WB0 – до 13-й гармоники;
- WB1 – для частот до 3 кГц;
- WB2 – для частот до 20 кГц;
- WB3 – для частот до 150 кГц;
- WB4 – для частот до 500 кГц.

Обозначение расширения класса точности для гармоник (для широкой полосы пропускания) указывается совместно с классом точности трансформатора. Например, класс точности 0,5S-WB2 или 5P-WB1.

Для всех маломощных измерительных трансформаторов (LPIT) и устройств сопряжения с шиной процесса (SAMU) должно соблюдаться требование расширенного класса точности WB0, а расширения WB1–WB4 являются опциональными. Для других типов измерительных трансформаторов все расширения являются опциональными.

Следует отметить, что цифровые сигналы с низкой частотой дискретизации (4800 Гц), предусмотренные в стандарте [18], однозначно несовместимы с расширенными классами точности WB2–WB4. Реализация класса WB1 при частоте дискретизации 4800 Гц теоретически возможна, но в реальности

трудно реализуема. Более высокая частота дискретизации (14400 Гц) упрощает реализацию антиалиасингового фильтра, что позволяет использовать фильтры низких порядков для реализации классов WB0 и WB1.

Также в стандарте [21] описаны требования для частот 16,7 Гц или 20 Гц, которые актуальны для работы с воздействиями, исходящими от оборудования железнодорожной сети.

Совокупность обязательных требований (с учетом заявленного класса точности, частоты дискретизации, расширенного диапазона по частоте), указанных выше, составляет некоторую частотную маску, которой должны соответствовать измерительные трансформаторы. Например, на рис. 3 показана частотная маска с учетом требований стандарта для ММИТ с цифровым выходом класса точности для защиты 5P, $f_r = 50$ Гц, $f_s = 4800$ Гц.

При проектировании систем РЗА с применением современных алгоритмов, большое значение имеет наличие достоверной информации об АЧХ и ФЧХ всех компонентов измерительного канала. Производители оборудования должны указывать эти характеристики в эксплуатационной документации.

Цифровые комбинированные трансформаторы тока и напряжения ЕСИТ

Общие сведения и функциональные возможности

ЦКИТ ЕСИТ внесен в реестр средств измерений (Госреестр СИ 94207-24) и с 2024 г. производится серийно [23]. В качестве первичных измерительных преобразователей тока и напряжения используются катушка Роговского и емкостной делитель напряжения. Преимущества использования ка-



Мокеев

Алексей Владимирович

В 1981 г. окончил Ленинградский политехнический институт (в настоящее время СПбГПУ), инженер-электрик, специализация «Релейная защита и автоматизация энергосистем». В 2011 г. в СПбГПУ защитил докторскую диссертацию на тему «Методы и алгоритмы обработки сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем различного функционального назначения». Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис». Профессор кафедры электроэнергетики и электротехники САФУ.

тушки Роговского связаны с отсутствием насыщения и остаточной намагниченности, наличием большого динамического диапазона измерения тока с высокой точностью.

Особенностью ECIT является возможность формирования наряду с потоками оцифрованных мгновенных значений токов и напряжений потоков синхровекторов. Встроенные в ECIT системы измерений и РЗ на основе СВИ позволяют реализовать новую архитектуру систем автоматизации для РУ СН, в том числе централизованные и распределенные системы РЗА [13].

ECIT можно подключать к шине процесса подстанции или непосредственно к устройству РЗА и многофункциональному измерительному устройству, установленным в той же ячейке КРУ (КСО). На базе цифрового измерительного трансформатора ECIT ООО «Инженерный центр «Энергосервис» разработал программно-технический комплекс (ПТК) ES GEAR для оснащения закрытых электроустановок среднего напряжения 6–35 кВ цифровыми ячейками исполнения КРУ (КСО) [24–27].

Цифровой измерительный трансформатор ECIT располагает собственным релейным контактом для отключения высоковольтного выключателя, который может быть настроен на логику встроенных токовых защит и защит по напряжению, что позволяет реализовать как основную, так и резервную защиту присоединения. Также в ECIT реализована публикация и подписка на GOOSE-сигналы блокировки и ускорения защит с учетом двух собственных дискретных входов.

Наряду с функционалом РЗА ECIT располагает устройством фиксации повреждений (ФИП) для регистрации и осциллографирования параметров аварийного режима с определением места повреждений (ОМП) на отходящей линии, ведет непрерывную статистику максимальных и средних значений рабочего тока и напряжения с учетом аварийных режимов, на основе этих данных ведет оценку коммутационного ресурса высоковольтного выключателя. Дополнительно ECIT выполняет однофазный и трехфазный технический учет электроэнергии, измеряет и регистрирует температуру подключенных к нему шин, ведет диагностику собственного нагрева и состояния внутренней изоляции по уровню ЧР с помощью встроенных датчиков.

На рис. 4 представлены основные модификации ЦКИТ ECIT: ECIT-1 внутренней установки на классы напряжений до 35 кВ, ECIT-1S наружной установки 6–35 кВ, ECIT-2 в конструктиве традиционного ТТ, ECIT-3 для КРУ с элегазовой изоляцией (КРУЭ) напряжением до 35 кВ.

Указанные модификации ECIT в силу своих особенностей не требуют большого количества типоразмеров в зависимости от величины номинального тока и напряжения. Так, цифровой измерительный трансформатор ECIT-1-15-50(1000) предназначен для применения на среднем классе напряжения до 15 кВ с номинальным



Рис. 4. Модификации ECIT

током 50 А и позволяет измерять рабочий ток от 0,5 А до 1000 А с классом точности 0,5S/5PR500 и рабочее напряжение с классом точности 0,5/3P в широком диапазоне номинальных значений от 3000/√3 В до 16000/√3 В без дополнительной калибровки и подстройки. Измеряемый ток предельной кратности для обеспечения работы РЗА составляет 25 кА.

Все модификации ECIT могут оснащаться двумя портами Ethernet с интерфейсами 10/100BASE-TX или 10/100BASE-FX MM/LC.

Обработка сигналов

Как было указано ранее, в ECIT производится обработка токов и напряжений с целью формирования SV- и SP-потоков. При этом синхровекторы тока и напряжения используются также для выполнения функций встроенного устройства РЗА.

Использование катушки Роговского в качестве первичного измерительного преобразователя тока имеет безусловные преимущества, связанные с отсутствием насыщения и остаточной намагниченности и высокой точностью на всем динамическом диапазоне. Однако, данный первичный измерительный преобразователь имеет особенность, связанную с тем, что выходной сигнал практически пропорционален производной первичного тока. Поэтому требуется специальная обработка для восстановления формы сигнала, соответствующей первичному току и для измерения синхровекторов тока.

Задача по измерению синхровекторов тока может быть решена без потерь по точности и быстродействию по сравнению с идеальным первичным преобразователем тока. При этом вместо обычных цифровых усредняющих КИХ-фильтров требуется использовать фильтры с комплексной импульсной функцией [27].

Восстановление полного тока сопряжено с некоторыми статическими и динамическими погрешностями. Традиционно с катушкой Роговского для этой цели применяются т.н. «интеграторы» в аналоговом тракте обработки сигналов [3]. Чаще всего применяются фильтры низких частот 1 порядка. При использовании цифрового измерительного трансформатора появляется возможность восстановления тока за счет цифровой обработки сигналов.

В настоящее время в ЕСИТ предусмотрена возможность аналого-цифровой обработки тока по 3 каналам:

1) аналоговый корректирующий фильтр для восстановления тока,

2) антиалиасинговый фильтр и цифровая обработка сигналов для восстановления тока или передача SV-потоков оцифрованных значений производной тока,

3) измерения синхровекторов тока (антиалиасинговый фильтр и цифровая обработка сигналов).

Преимущества применения

Рассмотрим преимущества применения ЦКИТ на примере системы мониторинга состояния силового трансформатора и устройств РЗА.

На рис. 5 представлены результаты моделирования, характеризующие погрешность оценки параметров Т-образной схемы замещения двухобмоточного трансформатора ТД-10000/35/6 в зависимости от его загрузки для комбинированных цифровых измерительных трансформаторов ЕСИТ (кривые 1, 3) и электромагнитных ТТ и ТН (кривые 2, 4) [26]. Кривые 1-2 характеризуют погрешность оценки сопротивления продольной ветви, кривые 3-4 – погрешность оценки сопротивления ветви намагничивания (поперечной ветви).

Приведенные графики наглядно иллюстрируют преимущества применения комбинированных цифровых измерительных трансформаторов для оценки диагностических параметров силового трансформатора на основе синхровекторов тока и напряжения.

На рис. 6 приведены графики полной погрешности измерения синхровектора тока в зависимости от кратности тока в случае применения цифрового ТТ (кривая 1) и электромагнитного ТТ (кривая 2). В силу отсутствия насыщения в ЦКИТ его применение эффективно как для простых токовых защит, так и для защит на дистанционном и дифференциальном принципах.

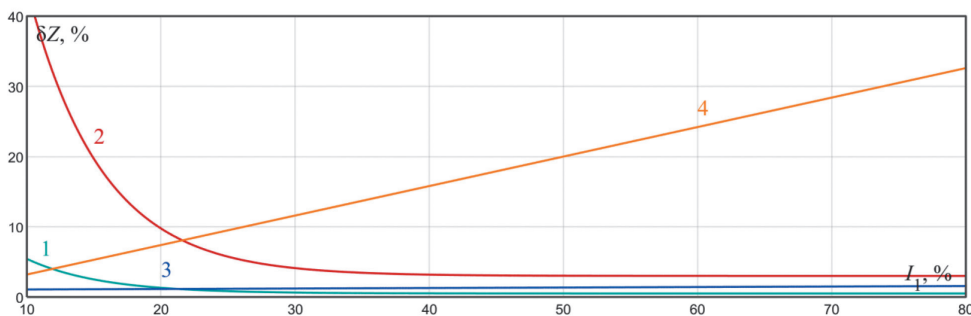


Рис. 5. Оценка параметров схемы замещения трансформатора

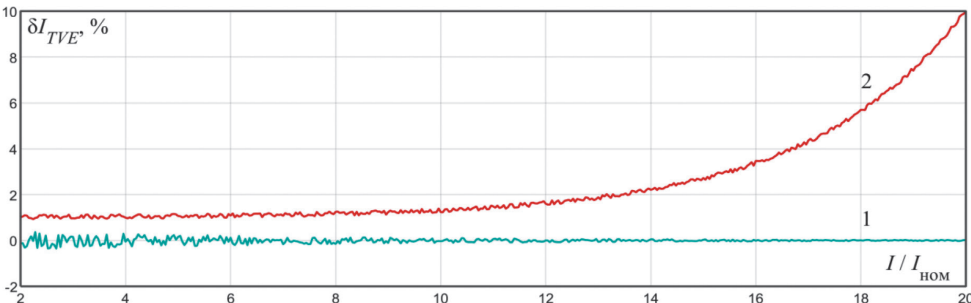


Рис. 6. Характеристика полной погрешности измерений тока ЕСИТ (1) и традиционного ТТ с магнитным сердечником (2)

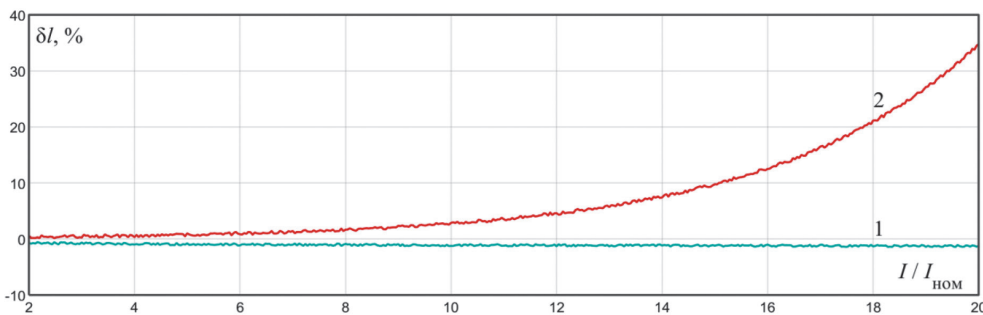


Рис. 7. Сравнение результатов оценки расстояния до точки КЗ (ОМП). 1 – ЕСИТ, 2 – традиционные ТТ и ТН

Следующий график наглядно иллюстрирует преимущества применения цифровых трансформаторов для ОМП на линии.

Особенно перспективным видится применение ЦКИТ совместно с защитами, в которых реализованы модернизированные алгоритмы дистанционной защиты линий и дифференциальной защиты силовых трансформаторов [27, 28].

Повышение надежности РЗ

Рассмотрим классическую схему организации систем РЗА для присоединения 6-35 кВ при использовании традиционных измерительных ТТ и ТН (рис. 8).

Как видно из рис. 8, функционирование РЗА может быть нарушено при выходе из строя ТН, двух ТТ или самого устройства РЗА. Надежность РЗА может быть повышена за счет использования ЦКИТ ЕСИТ со встроенной защитой и поддержкой измерений синхровекторов.

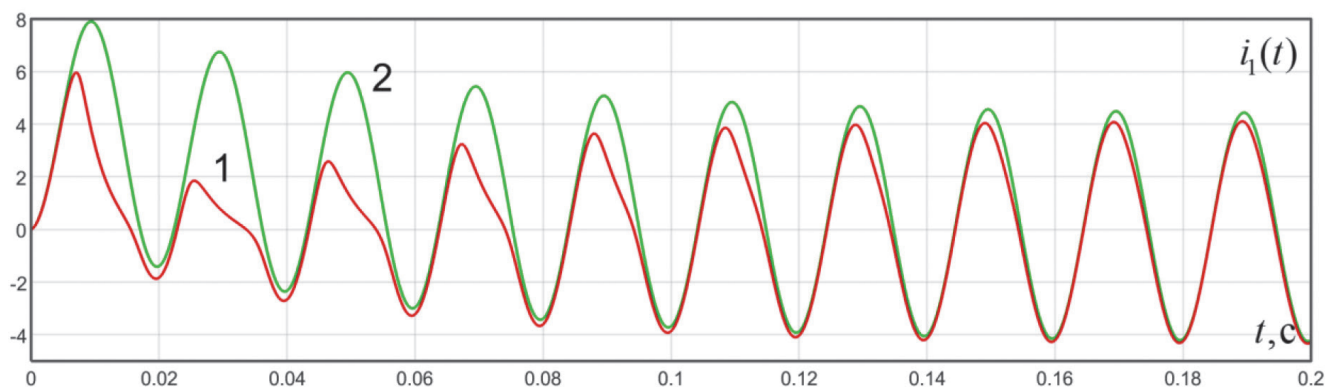


Рис. 10. Ток КЗ в обмотке ВН: 1 – электромагнитный ТТ, 2 – ЕСИТ

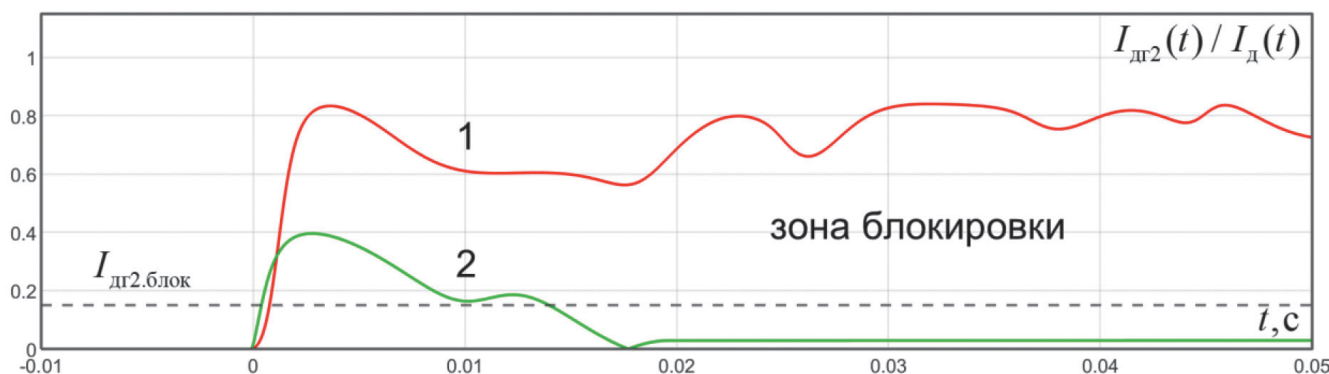


Рис. 11. Относительная величина второй гармоники дифференциального тока при КЗ в обмотке ВН: 1 – электромагнитный ТТ, 2 – ЕСИТ

делирования. Как известно, вторая гармоника широко применяется в алгоритмах блокировки дифференциальной защиты с торможением, а также в ряде токовых защит при БНТ силового трансформатора. На рис. 11 график 1 представляет оценку второй гармоники дифференциального тока для модели электромагнитных ТТ, а график 2 – для модели ЕСИТ. Можно отметить, что фактически вторая гармоника в токе ЦКИТ при КЗ отсутствует, и ее процентное увеличение в начале КЗ связано только с алгоритмом цифровой обработки сигнала (в данном случае это алгоритм Фурье). В свою очередь, содержание второй гармоники выше заданного порога в дифференциальном токе электромагнитных ТТ обусловлено наличием в них насыщения сердечника из-за действия апериодической составляющей тока КЗ. Как показано на рис. 11, это превышение может быть достаточно длительным, что оказывает негативное влияние на работу защиты.

Испытания

В процессе исследования характеристик комбинированного ТТ и ТН ЕСИТ-1 [22] возникает необходимость подавать большой ток и большое напряжение, что одновременно трудно реализуемо. В большинстве случаев, в комбинированных измерительных трансформаторах, конструкция не предусматривает возможности

раздельного подключения первичных цепей тока и напряжения. Для этого был применен способ, описанный в патенте [31]. Конструкцией комбинированного измерительного трансформатора ЕСИТ-1 предусмотрено сквозное отверстие в первичном токопроводе, через которое в процессе испытаний пропускают изолированный провод от генератора тока, подключают провод от генератора напряжения к первичному токопроводу, выполняют одновременную подачу сигналов тока и напряжения с независимых генераторов. Затем проводят проверку характеристик одновременно по каналу тока и каналу напряжения, оценивают взаимное влияние токов и напряжений.

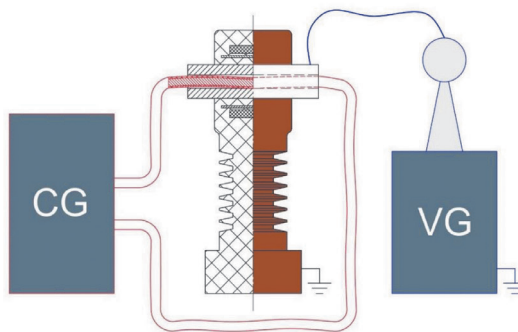


Рис. 12. Схема подключения испытуемого оборудования

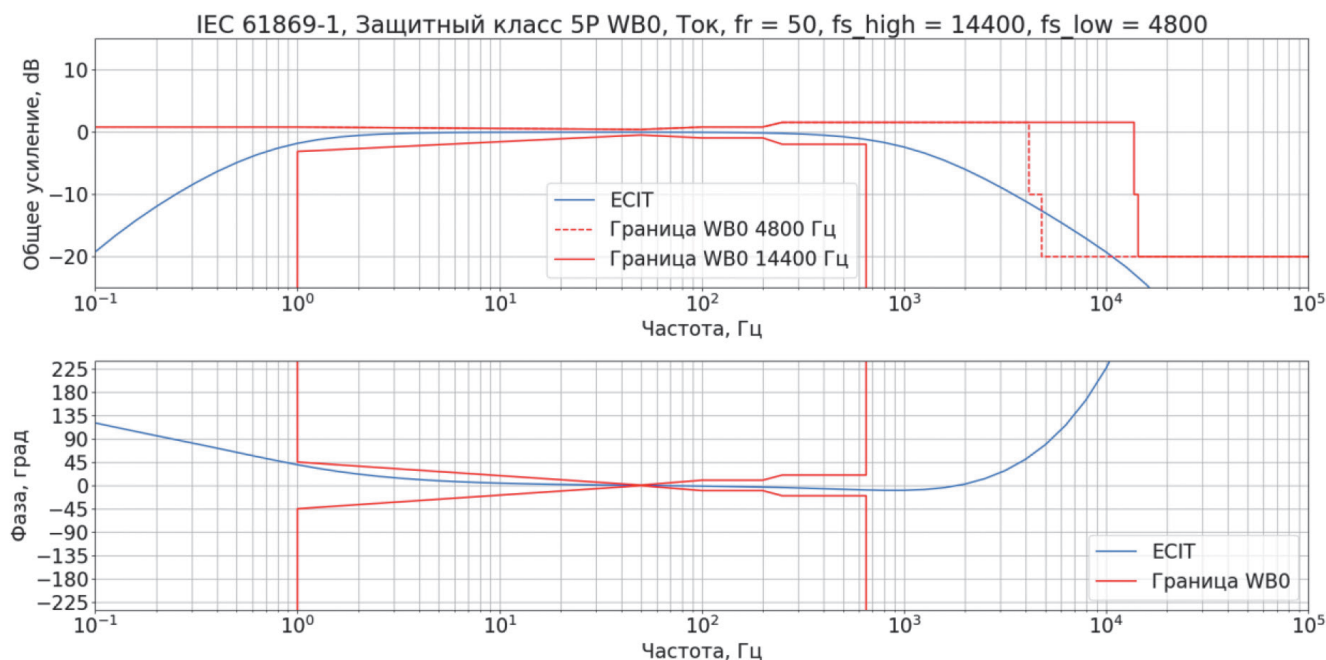


Рис. 13. Частотные характеристики ECIT

Данный способ также позволяет одновременно подать комбинированный сигнал тока от двух генераторов силы тока [22] без напряжения. Это позволяет в частном случае имитировать сигнал силы тока в переходном процессе, состоящий из периодического сигнала с первого генератора и аperiodического сигнала со второго генератора. В этом случае ТТ будет воспринимать комбинацию поданных сигналов, что может быть использовано при проведении испытаний на соответствие классам точности в переходном режиме по международному стандарту IEC 61869-2 [32]. Либо подать комбинацию двух сигналов тока с синхронизированных генераторов: основной частоты с одного генератора и произвольную гармонику со второго генератора. Это позволяет исследовать частотные характеристики устройств.

На рис. 13 на фоне представленной ранее частотной маски для защитного класса точности защиты 5P приведены соответственно амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики цифрового измерительного трансформатора с учетом обработки сигналов в ECIT.

Применение ЦКИТ

Одноуровневая система РЗА (рис. 1) может быть реализована при использовании серийно производимого компанией ООО «Инженерный центр «Энергосервис» оборудования: ЦКИТ ECIT-3, модулей дискретного ввода-вывода ЭНМВ-1, модуля индикации ЭНМИ-4е, блока коррекции времени ЭНКС-2, устройства сбора данных ЭНКС-3м. При этом ЭНМВ-1 имеет возможность подключения цифровых датчиков (положения, опти-

ческих и т.д.). Для реализации двухуровневой системы РЗА дополнительно применяются многофункциональное УРЗА ENBC и многофункциональное измерительное устройство ESM.

За последние два года количество реализованных систем на базе ECIT значительно выросло. От нескольких пилотных проектов в городских сетях г. Санкт-Петербург устройство перешло к стадии опытно-промышленной эксплуатации и начало внедряться на промышленных объектах [30]. Сегодня в реализованных проектах можно увидеть весь спектр предлагаемых конфигураций использования ECIT:

- 1) в качестве измерительного трансформатора для работы в соответствии с IEC 61869-9 / 61850-9-2LE;
- 2) в качестве измерительного трансформатора и источника SP-потоков по IEC 61850-9-2;
- 3) в качестве самостоятельного устройства РЗ и технического учета электроэнергии.

ECIT применялся в качестве источника данных по низкой стороне 10 кВ для защиты силового трансформатора ТРДН-25000/110/10/10, а также в составе классического решения цифровой ячейки для распределительных устройств 6-10 кВ, основанного на использовании СВИ для реализации функций РЗА. Кроме того, собственный функционал ECIT в части защит и учёта позволил реализовать решения для распределительных сетей 6-10 кВ по организации столбовых пунктов секционирования и коммерческого учёта.

Опыт, полученный в ходе реализации проектов, подтвердил работоспособность и надёжность выбранных решений в части электропитания, синхрониза-

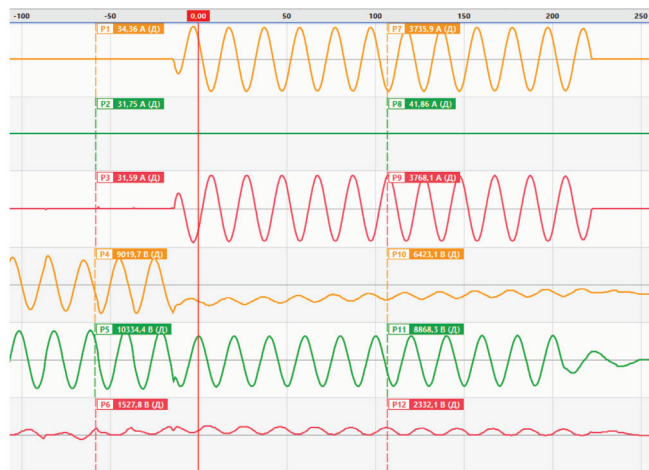


Рис. 14. Осциллограмма тока и напряжения КЗ

ции времени и передачи данных. Отдельно стоит отметить простоту выбора модификации ЕСИТ благодаря широкому диапазону измеряемых токов, а также отсутствие необходимости в дополнительных расчётах для обеспечения корректного функционирования РЗ в переходных режимах - это обусловлено отсутствием эффекта насыщения у ЕСИТ и тем, что не требуются коэффициенты трансформации для пересчета уставок. Что касается расчёта параметров защит, то для этой задачи на сегодняшний день следует использовать существующие методики и рекомендации по расчету уставок для микропроцессорной РЗ. Появление новых алгоритмов, учитывающих возможности цифровых измерительных трансформаторов и позволяющих улучшить чувствительность защит, - вопрос времени и накопления практического опыта эксплуатации.

В части определения технических решений ЦКИТ ЕСИТ продемонстрировали широкие возможности по интеграции с оборудованием других производителей, в первую очередь с терминалами РЗА. При этом ЕСИТ позволяет оптимизировать состав оборудования для автоматизации присоединения за счёт использования СВИ и встроенных функций РЗ и технического учёта электроэнергии. Уникальные массогабаритные характеристики позволяют монтировать ЕСИТ не только непосредственно в ячейках КРУ, но и на шинных мостах, а также на опорах воздушных линий (Новосибирская область).

Комплекты ЕСИТ, установленные с целью опытно-промышленной эксплуатации без отдельного локального устройства РЗА на городских ТП и РП (ПАО Россети Северо-Запад, Архэнерго), надёжно фиксируют повреждения в городских кабельных сетях 6-10 кВ, предоставляя эксплуатирующим организациям необходимую информацию о параметрах режимов и линий. На рис. 14 представлена осциллограмма перехода однофазного замыкания на землю в двухфазное КЗ на линии от 19.11.2025 г.

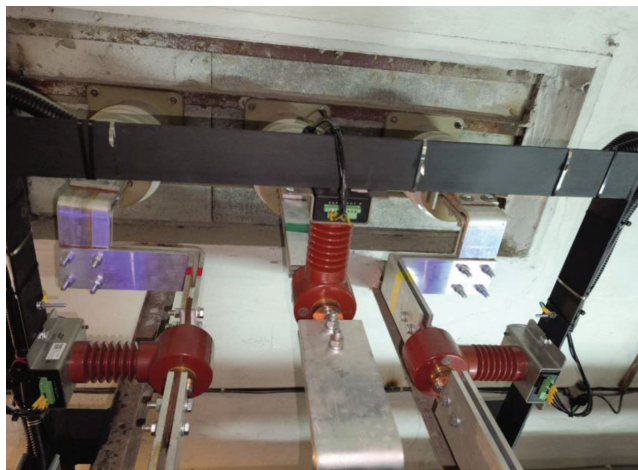


Рис. 15. ЕСИТ на ПС 110 кВ «Орбита» (Комизэнерго), $I_{н.р.}=1000$ А

Уникальный проект по исследованию применения цифровых трансформаторов на ПС 110 кВ «Орбита» (ПАО Россети Северо-Запад, Комизэнерго) подтвердил возможность использования цифровых измерительных трансформаторов различных производителей без дополнительной подстройки для целей реализации защиты (в том числе дифференциальной) и мониторинга (АСМД) силового трансформатора (рис. 15).

В части АСМД можно отметить, что использование ЦКИТ позволяет исключить из расчетов учет влияния загрузки измерительных трансформаторов. В рамках функций измерения параметров качества электроэнергии оперативный персонал получает полную картину и понимание измеренных ПКЭ за счёт открыто опубликованных АЧХ и ФЧХ ЦКИТ серии ЕСИТ.

В качестве примера рассмотрим осциллограмму тока двухфазного внешнего КЗ за силовым трансформатором, полученную на данном объекте с помощью ЦКИТ (рис. 16).

На рис. 16 представлены приведенные значения фазных дифференциальных токов при внешнем КЗ, вычисленные по результатам измерений ЦКИТ разных производителей и на различном принципе действия (110 кВ – оптические, 10 кВ – на основе катушки Роговского серии ЕСИТ). КЗ произошло вблизи шин НН подстанции, т.е. ток внешнего двухфазного КЗ имеет практически максимальные значения. Результаты показывают, что значения по модулю основной гармоники дифференциального тока не превышают 30% номинального тока силового трансформатора. Это позволяет обеспечить необходимую селективность действия дифференциальной защиты при ее характеристике, заданной согласно рекомендациям производителя (рис. 17). Кроме того, как видно из рис. 17, применение ЦКИТ также позволяет расширить зону действия защиты и повысить ее чувствительность при малых дифференциальных токах.

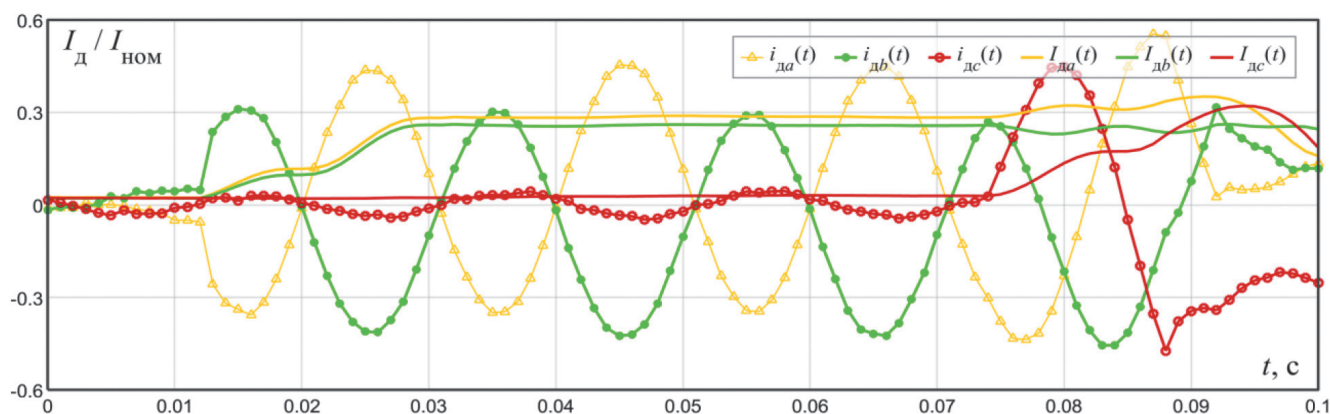


Рис. 16. Осциллограмма дифференциального тока при внешнем КЗ за трансформатором

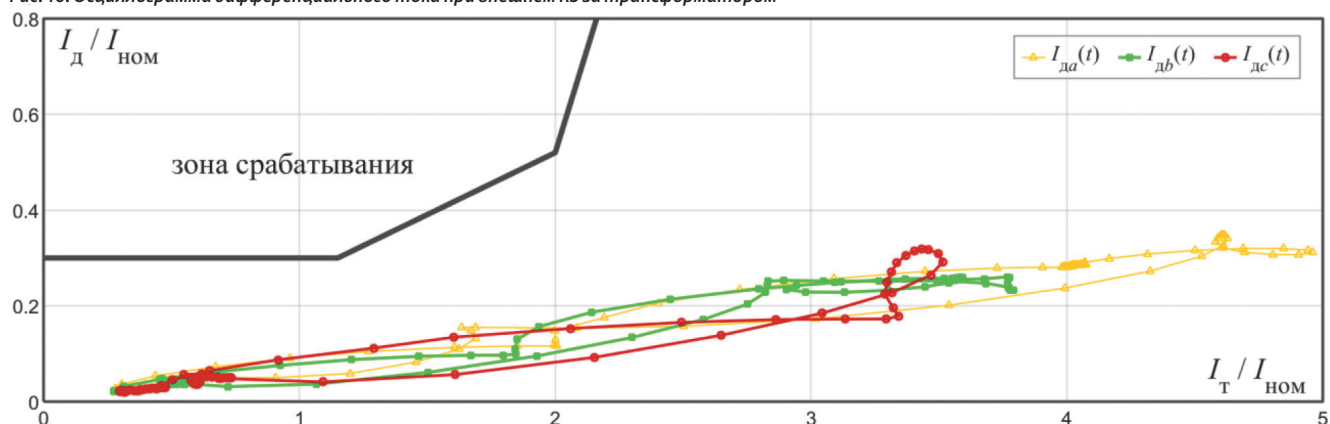


Рис. 17. Характеристика срабатывания дифференциальной защиты на основе ЦКИТ

Выводы

С появлением ЦКИТ меняется топология измерительного канала защиты и функциональные назначения его компонентов. Часть функций устройств РЗ могут быть перенесены в первичный преобразователь (цифровой измерительный трансформатор). Это в свою очередь позволяет снизить требования к вычислительной мощности конечных устройств, реализующих функции РЗА за счет того, что вся обработка входного сигнала и определение значений модуля и аргумента (фазы) комплексной амплитуды уже произведена непосредственно в самом измерительном трансформаторе.

Использование в шине процесса вместо SV-потока мгновенных значений SP-потока СВИ позволяет значительно повысить пропускную способность сети передачи данных с возможностью передачи синхровекторов в шине станции, что обеспечивает реализацию многоуровневых систем РЗА на понизительных подстанциях и распределительных пунктах. Развитие теории и практики СВИ позволяет расширять функционал устройств РЗА, что очевидным образом сказывается на повышении надежности работы систем РЗА и энергосистем в целом.

Результаты опытно-промышленной эксплуатации систем автоматизации подстанций доказали преимущества применения ЦКИТ со встроенными функциями защиты и измерений.

Литература:

1. Афанасьев В.В. и др. Трансформаторы тока. – Л.: Энергия, 1980. – 344 с.
2. Кужиков С.Л., Дегтярёв А.А., Дони Н.А., Шурупов А.А. О проблеме выбора и замены трансформаторов тока для устройств релейной защиты // Известия вузов. Электромеханика. – 2020. – Т. 63. – № 6. – С.72-81.
3. Practical aspects of Rogowski coil applications to relaying. IEEE PSRC Report. – 2010.
4. Мокеев А.В., Перелыгин Л.В., Хромцов Е.И. Комбинированные первичные измерительные преобразователи тока и напряжения 6-35 кВ // Новое в российской энергетике. – 2017. – № 1. – С. 39-52.
5. UniGear Digital. Engineering Guide. ABB. – 2020. – 118 p.
6. Javara R., Prokop V. Low-power current and voltage sensors for MV applications // Proc. of intern. protection testing symposium, IPTS 2011.
7. Ivanov N. et al. Fiber optic current transformers for transformer differential protection during inrush current: a field study. Conf. IEEE Madrid PowerTech, 2021.
8. Лебедев В.Д. и др. Теория и практика применения цифровых измерительных трансформаторов тока и напряжения // Релейщик. – 2023. – № 1. – С. 42-49.
9. Основы релейной защиты и автоматики интеллектуальной электрической сети / В.И. Антонов, В.А. Наумов, М.В. Мартынов, А.В. Мокеев [и др.]. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2023 г. – 324 с.
10. Ульянов Д.Н., Пискунов С.А., Мартынов А.Н., Мокеев А.В., Разработка и опыт внедрения устройств сопряжения с шиной процесса // Энергия единой сети. – 2024. – № 5–6 (75). – С. 42-50.

11. СТО 34.01-3.2-017-2022 Цифровые трансформаторы тока 6-750 кВ. Общие технические условия.
12. Капустин А.В. Применение кластерного подхода при создании высокоавтоматизированных подстанций с функционально-динамической архитектурой // Сб. докл. междуна. научно-техн. конф. Релейная защита и автоматика энергосистем – 2025. – С.8-12.
13. Мокеев А.В., Бовыкин В.Н., Хромцов Е.И. Особенности реализации технологий цифровой подстанции и векторных измерений в распределительных устройствах 6-35 кВ // Релейная защита и автоматизация. – 2015. – № 4. – С. 44-49.
14. Булычев А.В., Васильев Д.С., Козлов В.Н., Силанов Д.Н. Релейная защита в распределительных сетях 110/35/10 кВ в условиях цифровой трансформации электроэнергетических систем // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – № 1. – С. 71-77.
15. Сماعيلов В.В. и др. Автоматизированная система контроля технического состояния основного оборудования магистральных электрических сетей // Энергия единой сети. – 2022. – № 1. – С. 32-41.
16. Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. Системы релейной защиты, автоматики и мониторинга силового трансформатора // Мат. 96 заседания междуна. науч. семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики». – Архангельск, – 2024. – С. 1-10.
17. Приказ Минэнерго РФ от 08.02.2019 N 81. Об утверждении требований к перегрузочной способности трансформаторов и автотрансформаторов, установленных на объектах электроэнергетики.
18. IEC 61869-9:2016. Digital interface for instrument transformers, 2016.
19. IEC TR 61000-3-6:2008 EMC. Limits. Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems.
20. IEEE 519-2022 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
21. IEC 61869-1:2023 ED2. General requirements, 2023.

22. Плакидин Р.С. и др. Совершенствование методов испытаний измерительного канала системы РЗА // Сборник докладов международной научно-технической конференции «РЗА-2025». – С. 298-303.
23. Комбинированный измерительный трансформатор ЕСИТ-1. Описание типа. Регистрационный номер в ФИФ 94207-24.
24. Плакидин Р.С. и др. Применение датчиков тока на основе катушки Роговского для комбинированных измерительных трансформаторов с цифровым выходом // Релейщик. – № 2 (49). – 2024. – С.10-14.
25. Плакидин Р.С., Ульянов Д.Н., Андреев П.И., Мокеев А.В. Применение датчиков тока на основе катушки Роговского для комбинированных измерительных трансформаторов с цифровым выходом // Релейщик. – 2024. – № 2. – С.10-14.
26. Пискунов С.А., Мокеев А.В., Ульянов Д.Н. Автоматизация понизительных подстанций на основе технологии синхронизированных векторных измерений // Релейная защита и автоматизация. – 2024. – № 3. – С. 10-18.
27. Ульянов Д.Н., Мокеев А.В., Пискунов С.А., Андреев П.И. Цифровые комбинированные трансформаторы тока и напряжения с поддержкой синхронизированных векторных измерений // Релейная защита и автоматизация. – 2025. – № 3. – С. 12-21.
28. Мокеев А.В., Пискунов С.А. Дистанционная защита на основе одностороннего и двухстороннего измерения синхровекторов // Релейная защита и автоматизация. – 2024. – № 1 (54). – С. 8-15.
29. Трансформатор комбинированный измерительный ЕСИТ-1. Руководство по эксплуатации. Ред 10.2025.
30. Ульянов Д.Н., Сеитов П.В., Мокеев А.В. Опыт применения синхровекторных измерений для реализации релейной защиты и автоматики в распределительных электрических сетях 10 кВ // Релейщик. – 2025. – № 3. – С. 24-30.
31. Патент РФ № 2837035 «Способ проверки метрологических характеристик комбинированного измерительного трансформатора тока и напряжения» – 2024.
32. IEC 61869-2:2012 ED2. Additional requirements for current transformers, 2022.

Учебное пособие

ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ПРИ МЕДЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ НАПЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ

Заказ книги:

adv@srzau-ric.ru

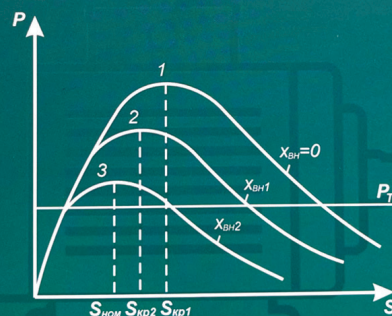
+7 (905) 346-87-55

450 р.,

включая НДС и доставку

П.Л. Воронов, Д.С. Петров

ПРОЦЕССЫ В УЗЛАХ НАГРУЗКИ ПРИ МЕДЛЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЯХ НАПЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ



Чебоксары / 2024