

Авторы:

Плакидин Р.С.¹,Ульянов Д.Н.¹,Попов Д.Н.¹,Соснин А.С.¹,д.т.н. Мокеев А.В.^{1,2},¹ООО «Инженерный

центр «Энергосервис»,

²Северный (Арктиче-

ский) федеральный

университет им.

М.В. Ломоносова,

г. Архангельск, Россия.

ТРЕБОВАНИЯ К МЕТРОЛОГИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

ACCURACY REQUIREMENTS FOR MERGING UNITS

Аннотация: в статье рассматриваются современные требования к метрологическим характеристикам преобразователей аналоговых сигналов, определяемым в большинстве практических случаев преимущественно характеристиками промежуточных измерительных трансформаторов тока. Приведены результаты проведенных согласно требованиям стандарта IEC 61869-13 исследований промежуточных трансформаторов тока различных производителей и выполнен их сравнительный анализ. Приведена информация о практическом опыте применения преобразователей аналоговых сигналов.

Ключевые слова: цифровая подстанция, измерительные трансформаторы, преобразователи аналоговых сигналов, промежуточные трансформаторы тока, интеллектуальные электронные устройства, переходный процесс, частота среза, постоянная времени.

Plakidin R.S.¹,
Ulyanov D.N.¹,
Popov D.N.¹,
Sosnin A.S.¹,
D.Sc. Mokeev A.V.^{1,2},

¹Engineering Center

«Energoservice» LLC,

²Northern (Arctic)

Federal University,

Arkhangelsk, Russia.

Abstract: the article discusses the actual requirements for the accuracy of the merging units, which, in practice, is determined mainly by the metrological characteristics of the intermediate current transformers. The current transformers of various manufacturers were tested in accordance with the requirements of the IEC 61869-13 standard. The results of the tests and their comparative analysis are given in the article. The article provides information on the practical aspects of application of merging units.

Введение

При разработке и внедрении в составе цифровых подстанций (ЦПС) преобразователей аналоговых сигналов (ПАС, SAMU), подключаемых к традиционным электромагнитным трансформаторам тока (ТТ) и напряжения (ТН), необходимо уделять особое внимание их работе в условиях переходных процессов [1]. Метрологические характеристики ПАС определяются преимущественно характеристиками промежуточных измерительных преобразователей сигналов, в качестве которых чаще всего используются промежуточные трансформаторы тока (ПТТ) и напряжения [2]. В меньшей степени оказывают влияние на указанные характеристики другие компоненты аналоговой части ПАС, АЦП и особенности микроконтроллера (поддержка целочисленных операций или операций над числами с плавающей запятой). Таким образом, необходимо учитывать совокупность метрологических характеристик измерительных трансформаторов и ПАС. В связи с этим в статье рассмотрены требования современных стандартов к точности измерений в установившемся и в переходных режимах как для первичных измерительных преобразователей, так и ПАС. При этом основное внимание в публикации уделено требованиям к токовым измерительным каналам ПАС.

В статье рассмотрен практический опыт реализации данных требований на примере преобразователей аналоговых сигналов ENMU, подключаемых к традиционным электромагнитным ТТ и ТН. Рассмотрены способы определения динамических характеристик ПАС. Приведены сравнительные характеристики исследованных измерительных компонентов. Рассмотрены варианты испытаний требуемых характеристик ПАС, предъявляемых стандартом IEC 61869-13. Приведено описание программно-технического комплекса (ПТК) для исследования характеристик ПАС.

Требования стандартов к метрологическим характеристикам ТТ и ПАС

Международный стандарт [3] и идентичный ему ГОСТ [4] содержат описание дополнительных требований к работе ТТ в различных переходных режимах, в том числе связанных с наличием в первичном токе апериодической составляющей при возникновении электромагнитного переходного процесса. В этом случае традиционные ТТ насыщаются, что может приводить к большой погрешности измерений [5]. Для корректной работы устройств защиты ТТ должны иметь иммунитет к апериодической составляющей и не насыщаться как можно

Keywords: digital substation, instrument transformers, merging units, intermediate current transformers, intelligent electronic devices, transient process, cutoff frequency, time constant.



Плакидин

Роман Сергеевич

Год рождения: 1984

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».



Ульянов

Дмитрий Николаевич

Год рождения: 1975

В 1998 г. окончил Архангельский государственный технический университет (в настоящее время САФУ), специальность «Электроснабжение».

Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис».

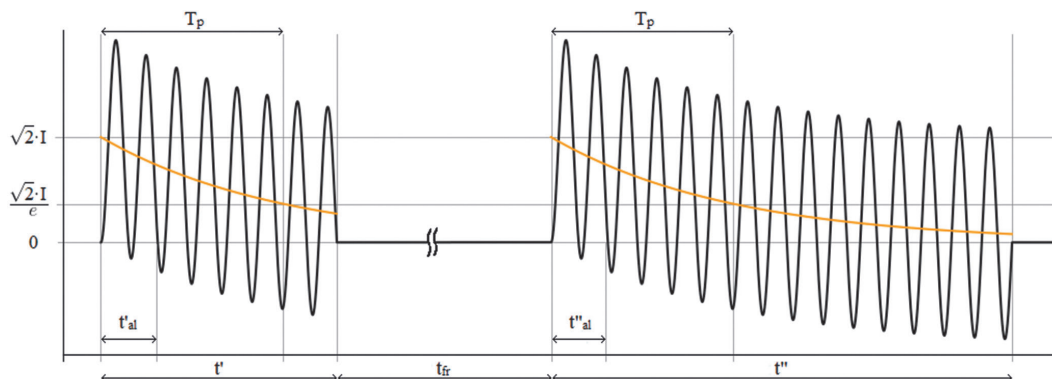


Рис. 1. Нормированный рабочий цикл В-О-В-О (С-О-С-О duty cycle)

t' и t'' – продолжительность первого и второго включения;

t_{fr} (fault repetition time) – временной интервал между прерыванием и повторным возникновением тока короткого замыкания в первичной обмотке (время отдыха между срабатываниями);

t'_{al} и t''_{al} (time to accuracy limit) – минимальное время, в течение которого точность измерений остается в пределах заявленного точности (время до насыщения) во время первого и второго включения;

T_p – постоянная времени (время, за которое аperiodическая составляющая уменьшается в e раз).

дольше: время противодействия насыщению ТТ в переходном режиме должно быть достаточным для работы защит.

Соблюдение данных требований необходимо не только для ТТ [6, 7], но и для ПАС [8]. Необходимо учитывать два взаимосвязанных требования к ПАС: требования к точности измерения в динамическом нормированном рабочем цикле В-О-В-О (С-О-С-О duty cycle) и к заявленной нижней частоте среза частотной характеристики ПТТ.

Ток $i(t)$ в условиях электромагнитного переходного процесса (рис. 1) нормированного рабочего цикла во время каждого участка цикла описывается следующим уравнением:

$$i(t) = -\sqrt{2}I \left(\cos(\omega_1 t + \varphi) - \cos \varphi e^{-\frac{t}{T_p}} \right),$$

где I – действующее значение периодической составляющей тока, А;

ω_1 – частота сети, Гц;

φ – начальная фаза, °;

T_p – постоянная времени (T_I в стандарте 61869-13), мс.

При испытании ПАС нормированный рабочий цикл [8] С-О-С-О должен включать $t' = 150 \dots 160$ мс, $t_{fr} = 300$ мс, $t'' = 290 \dots 310$ мс, $t'_{al} = t'$, $t''_{al} = t''$, частота 50 Гц, $\varphi = 0^\circ$.

Для работы в переходных режимах для ТТ стандартом [3] определены классы точ-

ности ТРХ, ТРУ, ТРЗ. Аналогичным образом и для токовых каналов ПАС для целей РЗА стандартом [8] предусмотрены классы точности 2ТРМ, 6ТРМ, 10ТРМ, для которых нормируется максимальная погрешность мгновенного значения периодической составляющей тока короткого замыкания при работе в нормированном рабочем цикле.

Погрешность для класса ТРМ определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon_{ac}(t) = \frac{i_{(ac)}(t) - i_{ref(ac)}(t)}{\sqrt{2}I}, \%, \quad (1)$$

Согласно стандарту [8] производитель должен заявить максимальную постоянную времени входного сигнала T_I , при которой рассчитаны характеристики в переходном режиме. Предпочтительные значения: 50; 120; 180; 250 мс. Также необходимо указывать постоянную времени, которая характеризует передаточную функцию устройства T_{sec} . Постоянная времени передаточной функции T_{sec} связана с частотой среза f_c .

Программно-технический комплекс

Для проведения исследования метрологических характеристик ПАС применяется ПТК, в состав которого входит специализированное программное обеспечение (ПО) и испытательное оборудование ведущих российских и зарубежных производителей.



Попов
Дмитрий Николаевич

Год рождения: 1986
В 2009 г. окончил Архангельский государственный технический университет (в настоящее время САФУ), специальность «Электроснабжение».
Начальник отдела разработки программного обеспечения департамента энергетических технологий ООО «Инженерный центр «Энергосервис».



Соснин
Артём Сергеевич

Год рождения: 1993
В 2014 г. окончил Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, специальность «Программирование в компьютерных системах».
Программист департамента энергетических технологий ООО «Инженерный центр «Энергосервис».

В качестве генератора аналогового сигнала используется многофункциональная измерительная установка СМС 256 plus, которая в динамических испытаниях служит эталонным источником цифрового потока выборочных значений (потока SV). В статических испытаниях в качестве эталона применяется дополнительное оборудование – многофункциональный электроизмерительный прибор Энергомонитор-61850, который также может выполнять прием и обработку потока SV от ПАС (SAMU).

Во всех испытаниях единым источником синхронизации времени для генератора, эталона и ПАС служит блок коррекции времени ЭНК-2. Генератор, эталон и исследуемый ПАС синхронизируются сигналом 1PPS или по выделенному интерфейсу Ethernet согласно протоколу PTPv2 (IEEE 1588).

В ходе исследования с помощью ПО «SVTest2», установленного на ПК, выполняется управление генератором, прием потоков SV от эталона и ПАС (SAMU), а также визуализация, обработка и сравнение полученных данных. На рис. 2 приведена структурная схема ПТК, используемая при статических и динамических испытаниях ПАС (SAMU) соответственно.

Важнейшим компонентом ПТК, объединяющим функциональные возможности всех аппаратных составляющих, является ПО «SVTest2», разработанное специалистами ООО «Инженерный центр «Энергосервис». ПО «SVTest2» позволяет воспроизводить на генераторе сигналы произвольной формы. Для исследования точности в динамическом нормированном рабочем режиме (C-O-C-O duty cycle) в ПО «SVTest2» предусмотрен упрощенный способ описания сигнала путем ввода основных параметров режима (t'_1 , t''_1 , t_{tr} , T_p , I). Режим сравнения потоков SV в ПО «SVTest2» позволяет наблюдать в реальном времени и производить запись потоков SV, принимаемых от эталона и исследуемого ПАС (SAMU).

Помимо описанного сценария использования, ПТК позволяет проводить исследование метрологических характеристик

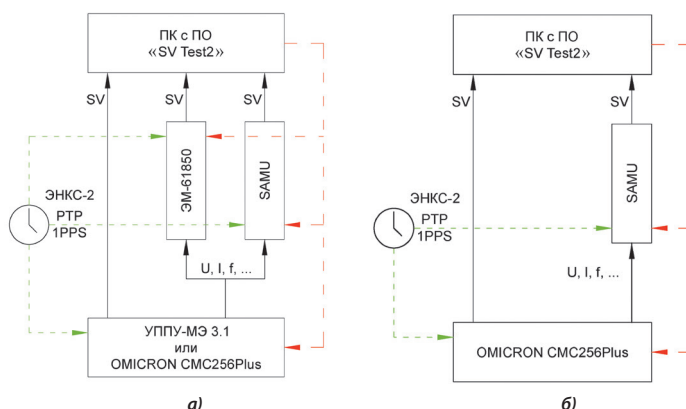


Рис. 2. Структурные схемы ПТК при проведении испытаний ПАС:

а) обобщенная;

б) для испытаний динамических характеристик

в статических и динамических режимах устройств различного функционального назначения с традиционными аналоговыми входами, с низкоуровневыми (маломощными) аналоговыми входами, с цифровыми входами согласно МЭК 61850-9-2, а также поверку и калибровку многофункциональных измерительных преобразователей телемеханики, счетчиков технического и коммерческого учета электроэнергии, устройств синхронизированных векторных измерений и т.д.

Основные возможности ПО «SVTest2»:

- управление генераторами и компараторами (OMICRON, УППУ-МЭ 3.1, Энергомонитор-61850, Энергоформа-3.1 и т.д.);
- просмотр SV-потоков в реальном времени (осциллограмма и биты качества);
- сравнение SV-потоков и расчет параметров сигнала в режиме online (амплитуды, углы, гармоники, мощности, погрешности в статическом и динамическом режимах);
- запись результатов испытаний по заданным заранее сценариям;
- исследование точности ПАС;
- построение графиков зависимости различных параметров;
- режим калибровки и поверки устройств;
- запись осциллограмм в файл в формате COMTRADE.

Исследование характеристик ПАС согласно IEC 61869-13

Ниже рассматривается исследование выполнения ПАС требований стандарта IEC 61869-13 по работе в переходных про-



Мокеев

Алексей Владимирович

В 1981 г. окончил Ленинградский политехнический институт (в настоящее время СПбГПУ), инженер-электрик, специализация «Релейная защита и автоматизация энергосистем».

Защитил кандидатскую диссертацию в ЛПИ в 1986 г., докторскую диссертацию в СПбГПУ в 2011 г.

Заместитель генерального директора ООО «Инженерный центр «Энергосервис», профессор кафедры электроэнергетики и электротехники Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова.

цессах, а именно требования к точности измерения в динамическом нормированном рабочем режиме (C-O-C-O duty cycle).

Выполнение указанных требований в основном определяется характеристиками ПТТ, чаще всего устанавливаемых во внешних ПАС (SAMU) для обеспечения масштабирования сигнала и гальванической развязки. Подобные трансформаторы устанавливаются в устройствах РЗА и других ИЭУ, но их исследование является сугубо внутренним делом производителей таких устройств. Следует отметить, что существуют и принципиально иные способы указанного преобразования сигнала, но именно ПТТ наиболее массово применяются как в ПАС, так и в других ИЭУ с аналоговыми входами.

Необходимость проведения исследований обусловлена тем, что большинство производителей ПТТ не приводят необходимые для ПАС характеристики, в том числе амплитудно-частотные и фазово-частотные характеристики в различных условиях эксплуатации, а также влияние на процесс преобразования тока апериодической составляющей.

В качестве объекта исследований используется многофункциональный измерительный ПАС (ENMU), подключаемый к традиционным электромагнитным ТТ и ТН. При этом ENMU подключается как к релейным, так и к измерительным обмоткам ТТ и обеспечивает формирование SV-потоков как для устройств РЗА, так и для измерительных интеллектуальных устройств.

Для исследований соответствия точности измерения в динамическом нормированном рабочем режиме (C-O-C-O duty cycle) в ENMU были установлены пять ПТТ российских и зарубежных производителей, обозначим их под номерами 1, 2, 3, 4, 5. Номинальные токи всех исследуемых образцов не менее 100 А. При этом первые три ПТТ обладают иммунитетом к апериодической составляющей, то есть обеспечивают минимальные искажения составляющей промышленной частоты и высших гармоник при наличии во входном токе апериодической составляющей.

С помощью ПО «SVTest2» производилось исследование ENMU с указанными ПТТ (рис. 3). Так как программа позволяет со-

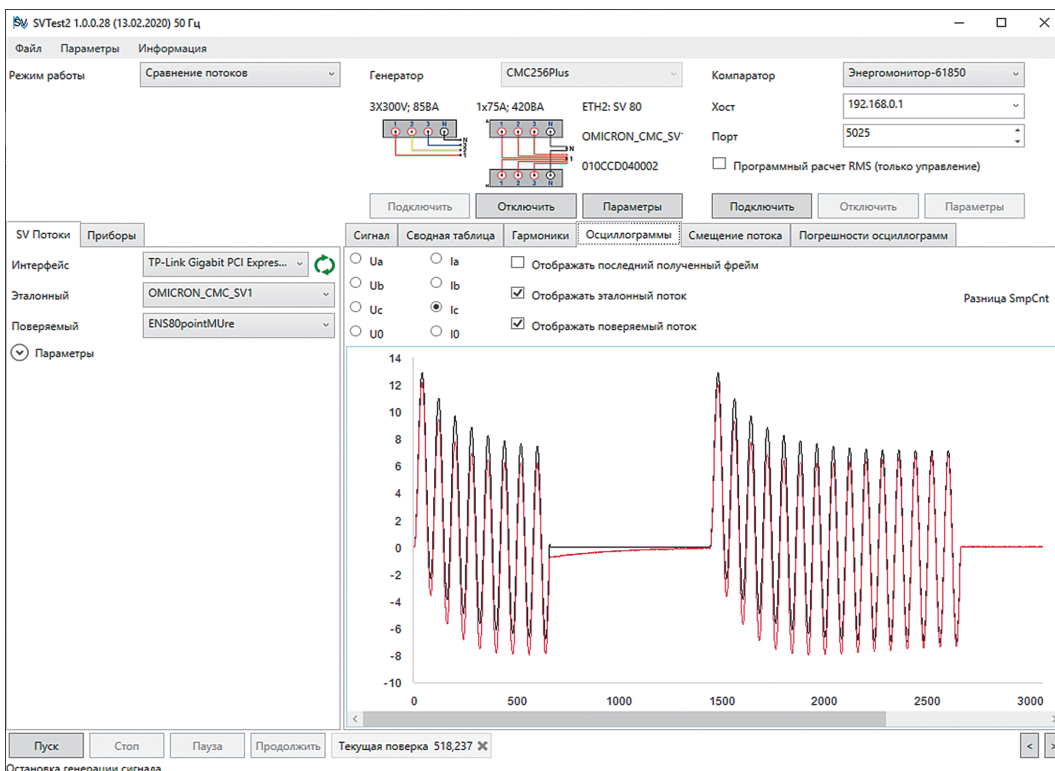


Рис. 3. Интерфейс ПО «SVTest2» в режиме сравнения двух потоков SV

хранять результаты исследований, то дальнейшие исследования производились при использовании математического пакета Mathcad.

На рис. 4 представлены результаты исследований 3 и 4 ПТТ. Эталонный сигнал показан на кривой 0 (действующее значение синусоидальной составляющей 50 Гц 25 А, начальное значение аperiodической составляющей $25\sqrt{2}$, постоянная времени 120 мс).

На рис. 5 представлены начальные области двух переходных участков (первая и вторая подача сигнала) для всех исследуемых ПТТ. Из представленных графиков следует, что быстродействующие защиты в первом цикле срабатывают правильно при использовании всех исследуемых ПТТ, тогда как во втором цикле при использовании ПТТ без иммунитета к аperiodическим составляющим значительно искажают форму кривой тока, что приведет к существенной задержке срабатывания защиты.

Последнее наглядно продемонстрировано на рис. 6, где приведена оценка амплитуды основной гармоники при использовании алгоритма Фурье, широко применяемого во многих устройствах РЗА зарубежных и российских производителей [9].

Корректное восстановление синусоидальной составляющей возможно лишь в случае использования 1-3 ПТТ. Рассмотрим восстановление синусоидальной составляющей для 3 ПТТ (рис. 7) на основании оценки комплексной амплитуды первой гармоники при использовании алгоритма Фурье. Красный – исходный синусоидальный сигнал, фиолетовый – восстановленный сигнал.

Восстановление аperiodической составляющей возможно на основе оценки нулевой гармоники (рис. 8). Погрешность восстановления аperiodической составляющей зависит от соотношения постоянной времени входного сигнала (T_I) и постоянной времени фильтра самого ПАС (T_{sec}). Как следует из приведенных графиков, для восстановления аperiodической составляющей требуется применение более сложных алгоритмов. Это осо-

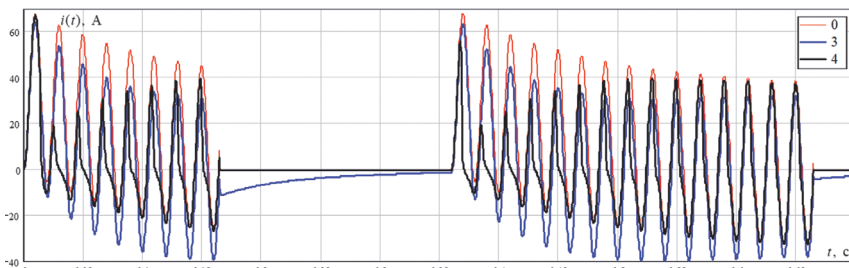


Рис. 4. Исследование ПАС при использовании 3 и 4 ПТТ

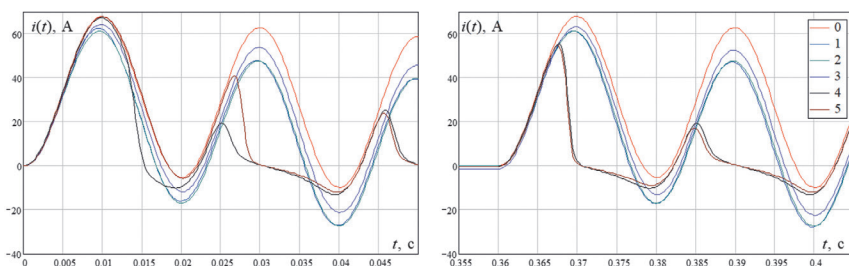


Рис. 5. Исследование ПАС при использовании пяти ПТТ:

0 – исходный сигнал;

1, 2, 3, 4, 5 – после ПТТ

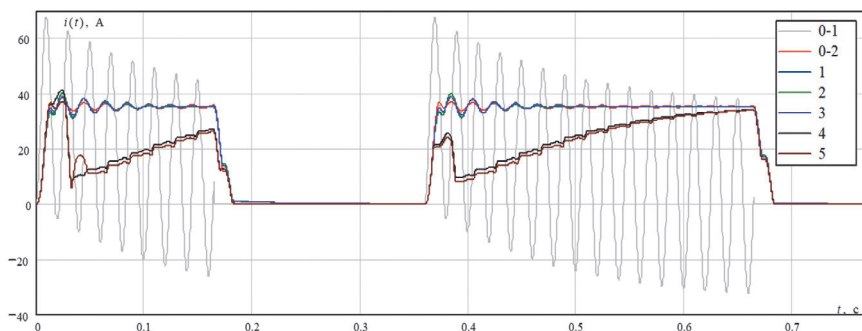


Рис. 6. Исследование ПАС при использовании пяти ПТТ:

0-1 исходный сигнал;

0-2 исходный сигнал после обработки алгоритмом Фурье;

1, 2, 3, 4, 5 сигналы после обработки выходных сигналов ПТТ алгоритмом Фурье

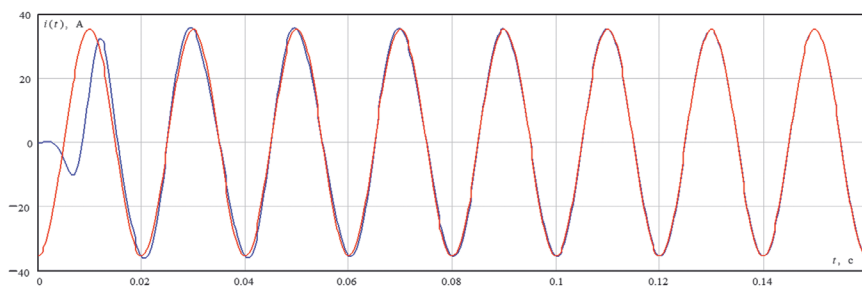


Рис. 7. Восстановление синусоидальной составляющей третьего образца

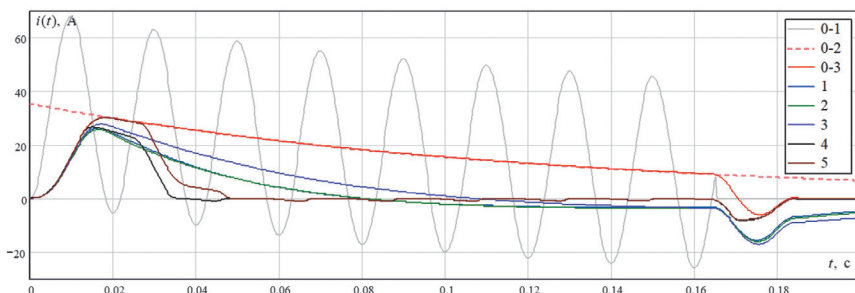


Рис. 8. Восстановление аperiodической составляющей:

0-1 – исходный сигнал;

0-2 – исходная аperiodическая составляющая;

0-3 – оценка аperiodической составляющей по исходному сигналу;

1, 2, 3, 4, 5 – оценка аperiodической составляющей по выходным сигналам ПТТ

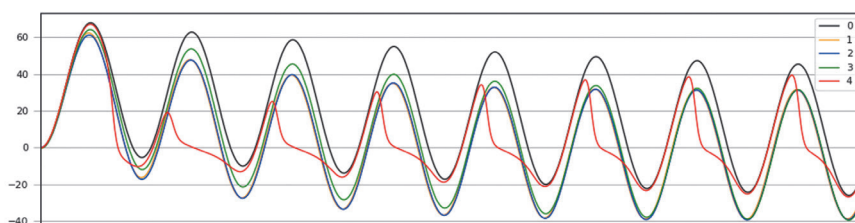


Рис. 9. Измеренные значения тока в нормированном рабочем цикле для исследуемых трансформаторов

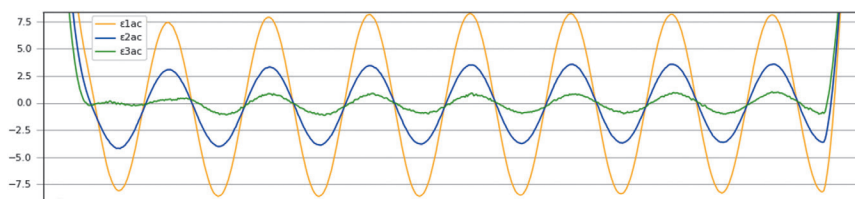


Рис. 10. Погрешности мгновенных значений периодической составляющей тока для исследуемых трансформаторов

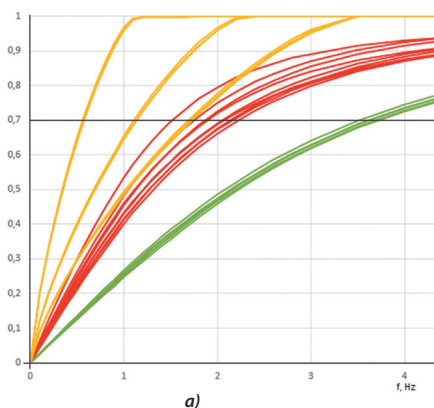
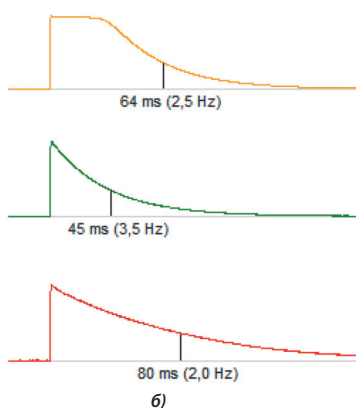


Рис. 11. Определение частоты среза:

а) путем снятия АЧХ;

б) анализом отклика на ступенчатый сигнал



бенно важно для защит, которые используют полную информацию о токах и напряжениях [10]. Наилучшим решением для указанных защит будет применение современных первичных измерительных преобразователей тока и напряжения и применение в составе ПАС промежуточных измерительных преобразователей тока, которые не вносят нелинейных искажений в случае наличия аperiodической составляющей.

Исходный сигнал (0) и вторичный сигнал (1-4) представлены на рис. 9.

Погрешности мгновенных значений полученных сигналов приведены на рис. 10.

Для трансформаторов 1, 2, 3 выделим из полученного сигнала периодическую составляющую и посчитаем по формуле (2) требуемую по стандарту 61869-13 (рис. 10).

Исследование частоты среза (cut-off frequency) ПТТ проводилось двумя способами (рис. 11).

Для снятия АЧХ с помощью ПТК подавался сигнал необходимой амплитуды и частотой от 0,1 до 10 Гц с шагом 0,1 Гц, записывалась осциллограмма с последующим расчетом среднеквадратического значения (RMS). Для определения частоты среза анализом отклика на ступенчатый сигнал с помощью ПТК подавался ступенчатый сигнал необходимой амплитуды и записывалась осциллограмма. Результаты определения частоты среза обоими методами сходятся между собой. Чем меньше частота среза, тем лучше устройство пропускает аperiodическую составляющую. Частота среза измерительного канала определяется по наихудшей частоте среза компонентов канала (ТТ, ПАС, устройство РЗА).

Опыт внедрения ПАС

ПАС (ENMU) внесен в реестр средств измерений в январе 2019 г. (73811-19). С января 2018 г. ENMU проходит опытно-промышленную эксплуатацию в качестве источника данных для устройства РЗА и системы учета на ПС 220 кВ «Магистральная». В сентябре 2019 г. проведено успеш-



ное испытание на совместимость с устройствами РЗ ООО НПП «ЭКРА» и ООО «Прософт-Системы» на базе испытательного комплекса ОАО «Сетевая компания».

ПО «SVTest2» и преобразователь ENMU в августе 2019 г. были использованы при исследованиях характеристик высоковольтных ТН на эффекте Поккельса с цифровым выходом. ENMU был откалиброван с высокой точностью и использован в составе эталонной установки для преобразования эталонного аналогового сигнала в SV поток, а ПО «SVTest2» использовалось как удобный инструмент для сравнения значений и записи результатов.

Поскольку ПАС может быть использован в различных автоматизированных системах, то он должен соответствовать требованиям, предъявляемым к устройствам этих систем, в том числе требованиям, предъявляемым к РЗА, системам телемеханики, системам мониторинга переходных режимов, системам коммерческого учета электроэнергии и измерения показателей ПКЭ. В конце 2019 г. ENMU в составе АИИС КУЭ ЦПС внесен в реестр средств измерений (76297-19, 76298-19). Кроме того, ENMU является также многофункциональным интеллектуальным устройством [11]. Одна из важнейших предпосылок расширения функциональных возможностей ПАС связана с тем, что применяемые в них микроконтроллеры или сигнальные процессоры со встроенным Ethernet обладают достаточными вычислительными мощностями для реализации дополнительных функций, в том числе самодиагностики и мониторинга первичных измерительных преобразователей тока и напряжения, измерения синхровекторов тока и напряжения, измерения параметров режима электрической сети, регистратора аварийных событий, резервной защиты и т.д. Наиболее перспективно применение многофункциональных ПАС при использовании совмещенной шины процесса и шины подстанции со скоростью передачи данных 1 Гбит/с и выше.

В качестве примера многофункционального ПАС можно привести устройство ENMU, которое обеспечивает формирование и передачу не только «сырых» оцифрованных мгновенных значений токов и напряжений, но и измерение и передачу синхровекторов токов и напряжений.

Преобразователи аналоговых сигналов ENMU внедрены в составе ЦПС 500 кВ «Тобол», ЦПС 110/6 кВ «Уват» и ЦПС 110/6/6 кВ «Десна». В процессе пусконаладочных работ на указанных подстанциях использовался ПТК и ПО «SVTest2». При этом использовались два режима функционирования: управление OMICRON CMC 256 plus для проверки правильности настройки оборудования, а также просмотр и сравнение потоков в реальном времени. При испытаниях был организован доступ (настроены права доступа) к коммутатору в шине процесса. К коммутатору был подключен ноутбук с ПО «SVTest2»,

что позволило увидеть в реальном времени все потоки SV, сравнивать их между собой или с эталонным потоком, просматривать значения амплитуд, фаз, мощностей, проводить анализ спектрального состава сигнала.

Всего поставлено заказчикам более 200 преобразователей сигналов ENMU. В настоящее время ведется подготовка к серийному производству нового поколения ENMU с поддержкой совмещенной шины процесса и шины подстанции (мультишина). В преобразователях сигналов нового поколения заложена возможность применения в токовых измерительных каналах ПАС различных промежуточных измерительных преобразователей, соответствующих требуемым характеристиками.

Выводы

При разработке устройств РЗА, а также при выборе устройств для измерительных каналов РЗ необходимо учитывать требования современных международных стандартов к работе в переходном режиме. Полученный опыт разработки и применения ПАС показывает, что требования стандартов являются достижимыми на практике.

Производители ТТ и ПАС должны указывать не только погрешность в статическом режиме, но и погрешность в динамическом режиме совместно с максимальной постоянной времени, при которой рассчитана указанная погрешность, а также АЧХ устройства, постоянную времени входного фильтра. Кроме того, соблюдение требований стандартов и декларирование указанных характеристик позволит разрабатывать и применять новые алгоритмы РЗ.

Литература:

1. Холст С., Законьшек Я. Поведение традиционных трансформаторов тока в переходных режимах и его влияние на характеристики традиционных систем релейной защиты на базе шины процесса // Релейщик. – 2020. – №3. – С. 20-25.
2. Булычев А.В., Ванин В.К. Исследование частотных характеристик трансформаторов тока // Энергетика (Изв. высш. учеб. заведений). – 1987. – №8. – С. 16–21.
3. IEC 61869-2:2012. Instrument transformers - Part 2: Additional requirements for current transformers, 2012.
4. ГОСТ Р МЭК 61869-2-2015 Трансформаторы измерительные - Часть 2: Дополнительные требования к трансформаторам тока, 2015.
5. Кужиков С.Л., Дегтярев А.А., Сербиновский Б.Б. О требованиях к трансформаторам тока и устройствам релейной защиты в переходных режимах при наличии апериодической составляющей в первичном токе // Сб. трудов междунауч. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Ек, 2013.
6. IEC 61869-1 ED2 Draft. Instrument transformers - Part 1: General requirements, 2020.
7. IEC 61869-9:2016. Instrument transformers - Part 9: Digital interface for instrument transformers, 2016.
8. IEC 61869-13 ED1 Draft. Instrument Transformers - Part 13: Stand-alone Merging Unit, 2020.
9. Understanding microprocessor-based technology applied to relaying // Report of Working Group 116 of the Relaying Practices Subcommittee IEEE. – 2004.
10. Антонов В.И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов: теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике. – Чебоксары: Изд-во Чувашского ун-та, 2018. – 333 с.
11. Мокеев А.В. и др. Многофункциональные устройства для цифровых подстанций // Энергия Единой сети. – 2019. – № 6. – С. 8-16.