



1.12. МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Р. С. ПЛАКИДИН¹, С. А. ПИСКУНОВ¹, Д. Н. ПОПОВ¹, А. С. СОСНИН¹, А. В. МОКЕЕВ²

¹ ООО «Инженерный центр «Энергосервис»,

² Северный (Арктический) федеральный университет

Российская Федерация

Контактное лицо:

Р. С. ПЛАКИДИН

rplakidin@ens.ru

Ключевые слова: Цифровая подстанция, измерительные трансформаторы, преобразователи аналоговых сигналов (ПАС), интеллектуальные электронные устройства, переходный режим, частота среза, постоянная времени, С-О-С-О, В-О-В-О.



Введение

При разработке и внедрении в составе цифровых подстанций преобразователей аналоговых сигналов (SAMU, ПАС), подключаемых к традиционным электромагнитным трансформаторам тока (ТТ) и напряжения (ТН), необходимо уделять особое внимание их работе в условиях переходных процессов [1]. Метрологические характеристики преобразователей аналоговых сигналов (ПАС) определяются преимущественно характеристиками промежуточных измерительных преобразователей сигналов, в качестве которых чаще всего используются промежуточные электромагнитные трансформаторы тока (ПТТ) и напряжения [2]. В меньшей степени оказывают влияние на указанные характеристики оставшаяся аналоговая часть 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 докладе 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 докладеделено требованиям к измерительным трансформаторам тока (ТТ) и токовым измерительным каналам ПАС, содержащим в своем составе ПТТ.

В докладе рассмотрен практический опыт реализации данных требований на примере преобразователей аналоговых сигналов ENMU, подключаемых к традиционным электромагнитным трансформаторам тока и напряжения. Рассмотрены способы определения динамических характеристик ПАС. Приведены сравнительные характеристики исследованных отдельных измерительных компонентов. Рассмотрены результаты исследования совместного влияния насыщения трансформатора тока (первичного измерительного преобразователя тока) и промежуточного трансформатора тока (вторичного преобразователя) на форму сигнала. Приведен анализ негативного влияния искаженного сигнала на различные виды защит.

Требования 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 приводит к большой погрешности измерений [5]. Для корректной работы устройств защиты ТТ должны иметь иммунитет к апериодической составляющей и не насыщаться как можно дольше: время противодействия насыщению ТТ в переходном режиме должно быть достаточным для работы защит.

Соблюдение данных требований необходимо как для ТТ [6, 7], так и для ПАС [8]. Необходимо учитывать два взаимосвязанных требования к ПАС: требование 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.

Описание испытательного сигнала и расчетные формулы приведены в указанных стандартах. Для работы в переходных режимах для ТТ стандартом [3] определены классы точности ТРХ, ТРУ, ТРZ. Аналогичным образом и для защитных токовых каналов ПАС стандартом [7] предусмотрены классы точности: 2TPM, 6TPM, 10TPM.



Программно-технический комплекс

Для проведения исследования метрологических характеристик ПАС применяется программно-технический комплекс (ПТК), в состав которого входит специализированное ПО «SVTest2» и испытательное оборудование российских и зарубежных производителей [14].

На рисунке 1 приведена структурная схема ПТК, используемая при статических и динамических испытаниях ПАС (SAMU) соответственно.

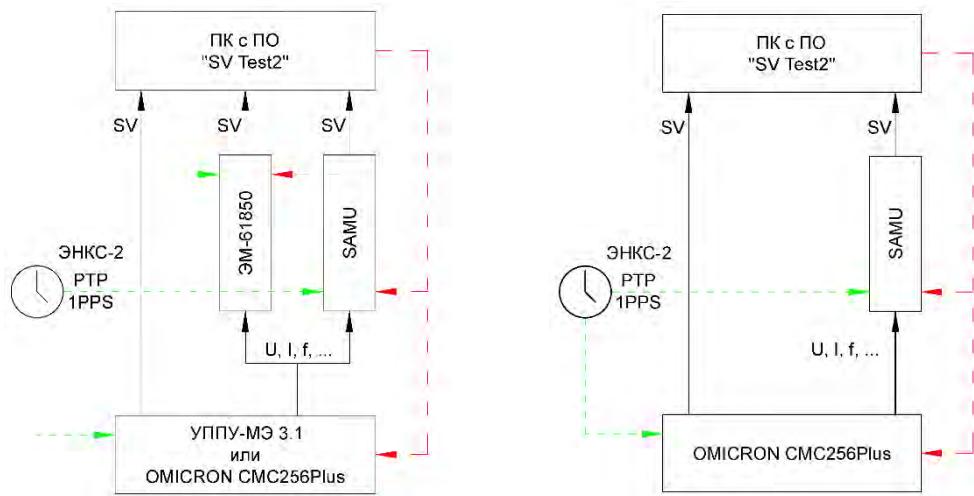


Рис. 1. Структурные схемы ПТК при проведении испытаний ПАС: обобщенная (слева), для испытаний динамических характеристик (справа).

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' , t'' , t_{fr} , 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).

Исследование характеристик ПАС согласно IEC 61869-13

Ниже рассматривается исследование выполнения ПАС требований стандарта IEC 61869-13 по работе в переходных процессах, а именно требования к точности измерения в динамическом нормированном рабочем режиме (C-O-C-O duty cycle).

Выполнение указанных требований в основном определяется характеристиками промежуточных трансформаторов тока (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 промежуточные

СЕКЦИЯ 1



трансформаторы тока наиболее массово применяются как в ПАС, так и в 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 преобразователь аналоговых сигналов 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, т. е. 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. Так как программа позволяет сохранять результаты исследований, то дальнейшие исследования производились при использовании математического пакета Mathcad.

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

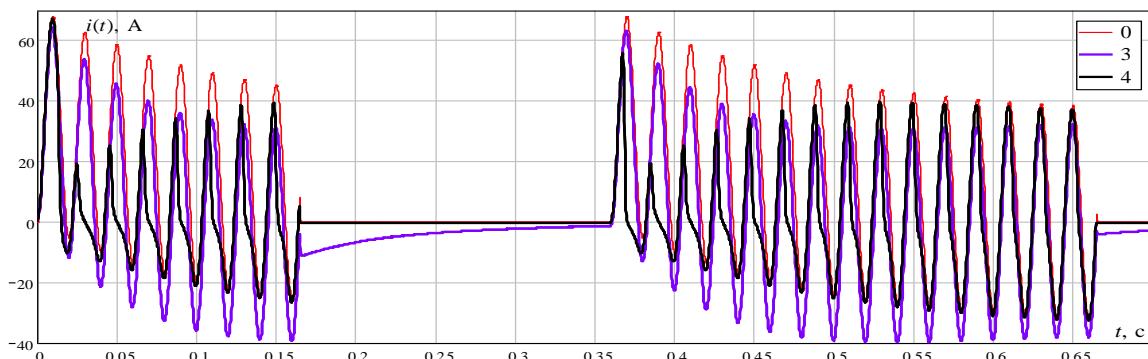


Рис. 2. Исследование ПАС при использовании 3 и 4 ПТТ.

На рис. 3 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 сработают правильно при использовании всех исследуемых ПТТ, тогда как во втором цикле при использовании ПТТ без иммунитета к апериодическим составляющим



значительно искажают форму кривой тока, что приведет к существенной задержке срабатывания защиты.

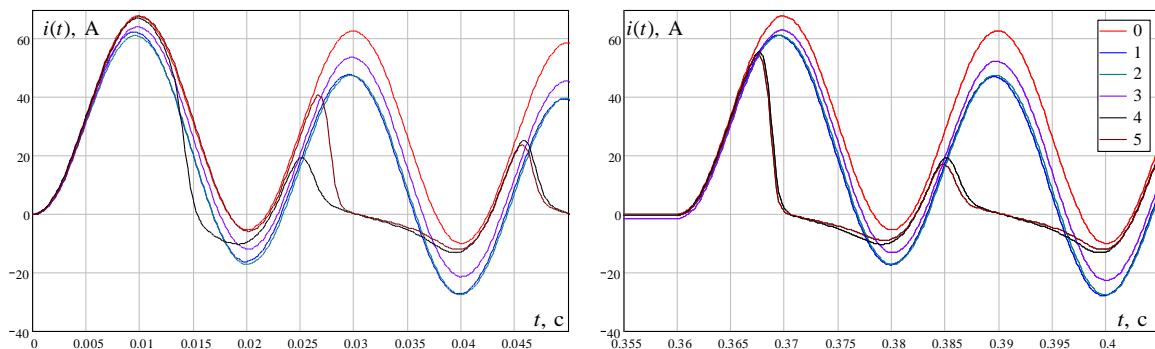


Рис. 3. Исследование ПАС при использовании пяти ПТ:
0 – исходный сигнал; 1, 2, 3, 4, 5 – после ПТ.

Последнее наглядно продемонстрировано на рис. 4, где приведена оценка амплитуды основной гармоники при использовании алгоритма Фурье, широко применяемого во многих устройствах РЗА зарубежных и российских производителей [9].

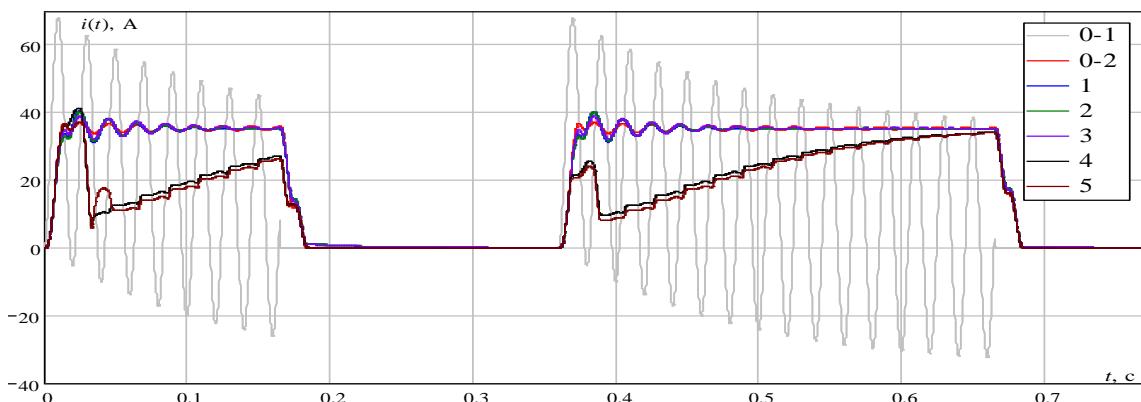


Рис. 4. Исследование ПАС при использовании пяти ПТ.

0-1 – исходный сигнал,

0-2 – исходный сигнал после обработки алгоритмом Фурье,

1, 2, 3, 4, 5 – сигналы после обработки выходных сигналов ПТ алгоритмом Фурье.

Корректное восстановление синусоидальной и апериодической составляющей возможно лишь в случае использования 1-3 ПТ.

Рассмотрим восстановление синусоидальной составляющей для 3 ПТ (рис. 5) на основании оценки комплексной амплитуды первой гармоники при использовании алгоритма Фурье. Красным цветом показан исходный синусоидальный сигнал, фиолетовым – восстановленный сигнал.

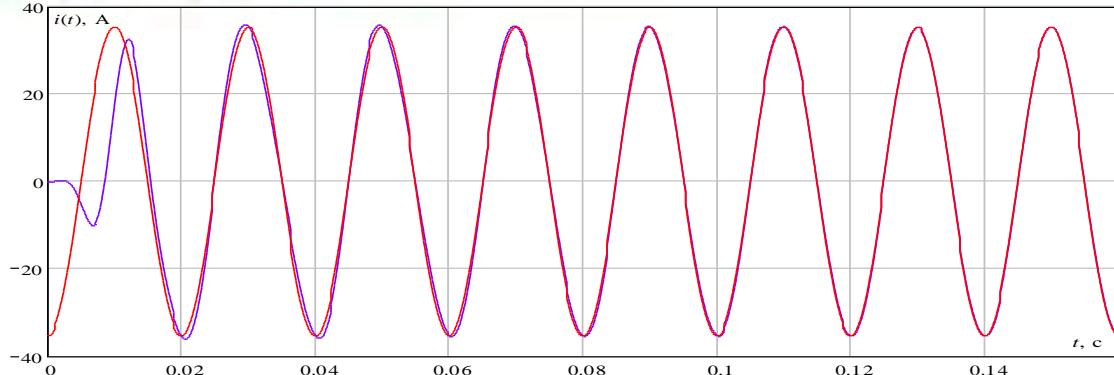


Рис. 5. Восстановление синусоидальной составляющей 3-го образца.

Восстановление апериодической составляющей возможно на основе оценки нулевой гармоники (рис. 6). Погрешность восстановления апериодической 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 апериодической составляющей требуется применение более сложных алгоритмов. Это особенно 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 апериодической составляющей.

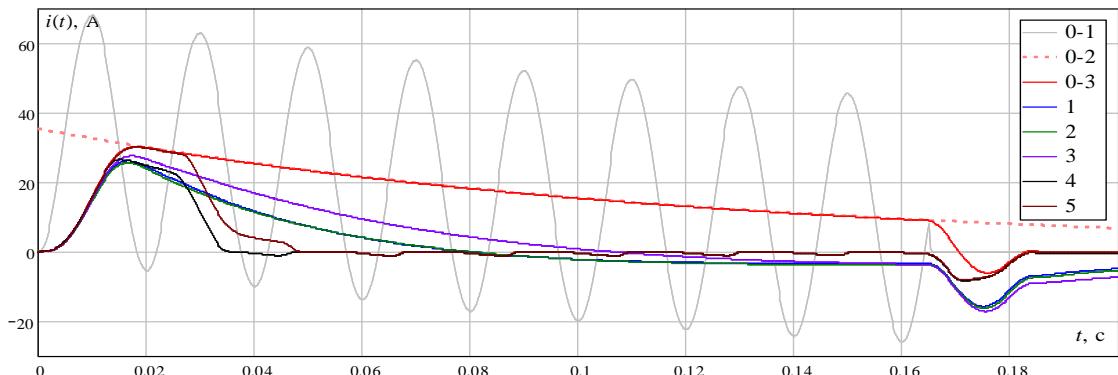


Рис. 6. Восстановление апериодической составляющей.

0-1 – исходный сигнал,

0-2 – исходная апериодическая составляющая,

0-3 – оценка апериодической составляющей по исходному сигналу,

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

Но в измерительном канале тока влияние на качество измерений (сохранение информации содержащейся в исходном сигнале) оказывает не только ПТТ, но и измерительный ТТ. Рассмотрим моделирование совместного влияния ТТ и ПТТ на исходный сигнал.

СЕКЦИЯ 1



В ходе исследований проведено математическое моделирование совместной работы первичных измерительных трансформаторов тока и промежуточных трансформаторов тока нескольких типов.

В качестве промежуточных трансформаторов тока были использованы модели ПТТ под номерами 3 и 4. Математические модели ПТТ были разработаны в программной среде MATLAB/Simulink. Кроме того, было разработано две модели первичного измерительного трансформатора тока (ТТ). Технические параметры первой модели: коэффициент трансформации 1000/5 А, класс точности релейной обмотки 10Р, номинальная вторичная нагрузка 15 ВА и номинальная предельная кратность 10. Вторая модель – с аналогичными техническими параметрами, но соответствующая классам точности для работы в переходных режимах [3].

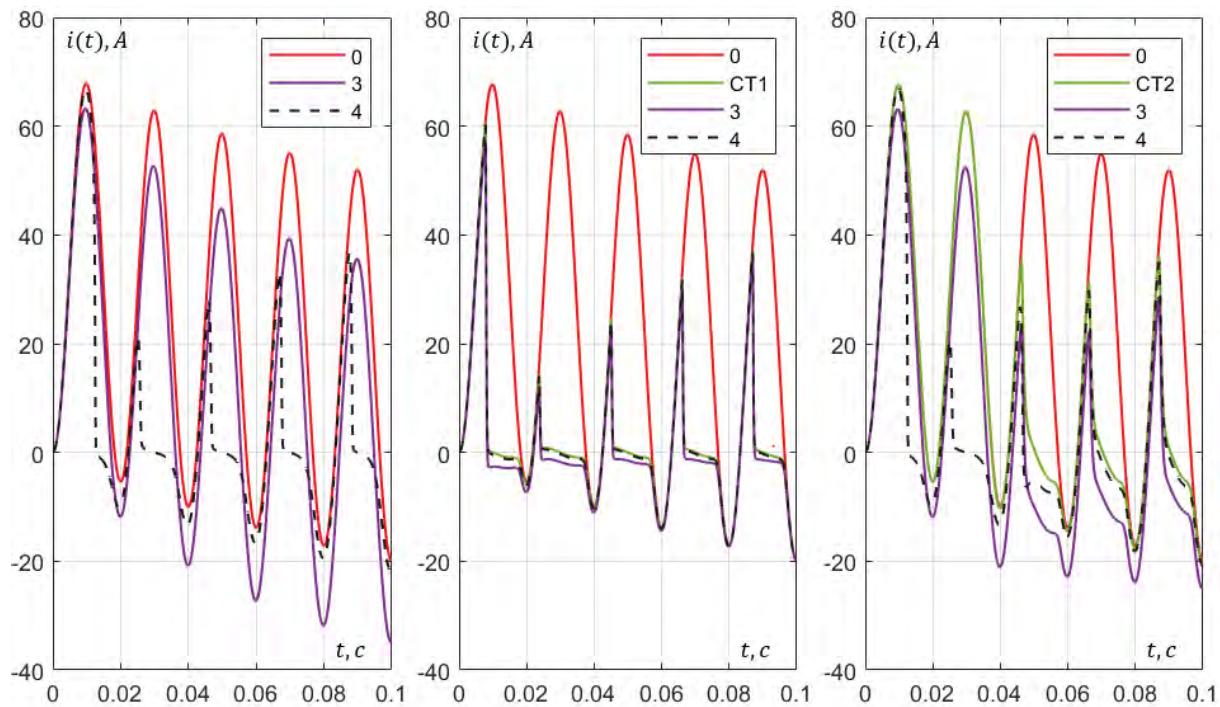
На рис. 7 показаны результаты моделирования совместной работы ТТ и ПТТ. В первом случае (рис. 7, левый график) исходный сигнал подается на первичную обмотку ПТТ (номер 3 и 4), во втором и третьем – на первичную обмотку ТТ (СТ1 и СТ2 соответственно), а со вторичной обмотки ТТ – на первичную обмотку ПТТ. Значения исходного сигнала на центральном и правом графике (рис. 7), а также все значения сигнала после ПТТ приведены ко вторичной обмотке первичного ТТ.

Эталонный сигнал показан кривой 0 (действующее приведенное значение синусоидальной составляющей 50 Гц 25 А, начальное значение апериодической составляющей $25\sqrt{2}$, постоянная времени 120 мс).

Когда эталонный сигнал 0 подается непосредственно на первичную обмотку ПТТ (рис. 7, левый график), форма сигнала после ПТТ соответствует ранее полученным данным об исследовании работы реальных ПТТ под номером 3 и 4 (рис. 2).

При подаче исходного сигнала на первичную обмотку СТ1 (первая модель) происходит искажение формы сигнала в результате насыщения сердечника данного ТТ (рис. 7, центральный график), при этом его номинальная предельная кратность не превышена. Таким образом, модель СТ1 при наличии значительной апериодической составляющей в исходном сигнале не обеспечивает его передачу в переходном режиме. Сигнал после ПТТ имеет схожую форму, но для модели ПТТ под номером 3 смешен вниз относительно вертикально оси, что можно объяснить различной частотой среза данных моделей ТТ и ПТТ.

В случае, когда ТТ обеспечивает передачу исходного сигнала в переходном режиме в течение некоторого времени (рис. 7, правый график, вторая модель ТТ обозначена СТ2), искажение сигнала может внести промежуточный трансформатор тока (на рис. 7 модель ПТТ под номером 4), который насыщается раньше СТ2.



0 – исходный сигнал,

CT1, CT2 – сигнал после трансформатора тока,

3, 4 – сигнал после ПТТ.

Рис. 7. Моделирование работы трансформаторов тока.

Таким образом, для корректной передачи исходного сигнала в измерительном канале необходимо правильно подходить к выбору не только измерительных трансформаторов тока, но и промежуточных. Классы точности ТТ и ПТТ должны быть скоординированы для работы в переходном режиме. В противном случае даже применение ПТТ с классами точности ТРМ без соответствующего класса ТТ не гарантирует правильной трансформации первичного тока.

Исследование частоты среза (cutoff frequency) ПТТ проводилось двумя способами (рис. 11).

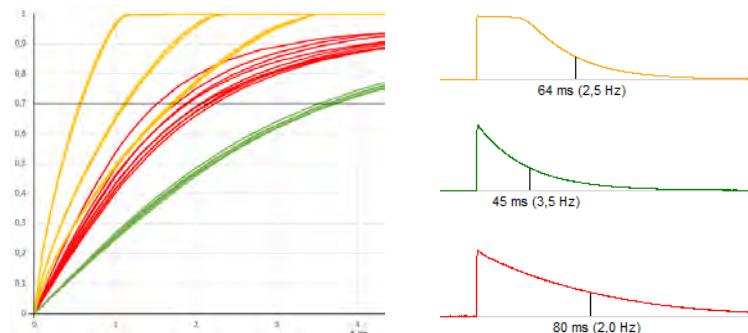


Рис. 11. Определение частоты среза: путем снятия АЧХ (слева)
и анализом отклика на ступенчатый сигнал (справа).



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 обеими методами сходятся между собой. Чем меньше частота среза, тем лучше устройство пропускает апериодическую составляющую. Частота среза измерительного канала определяется по наихудшей частоте среза компонентов канала (ТТ, ПАС, устройство РЗА).

Опыт внедрения пас

Преобразователь аналоговых сигналов ENMU внесен в реестр средств измерений в январе 2019 года (73811-19). С января 2018 ENMU проходит опытно-промышленную эксплуатацию в качестве источника данных для устройства РЗА и системы учета на ПС «Магистральная». В сентябре 2019 года успешно прошел испытания на совместимость с терминалами защит «ЭКРА» и «Прософт» на базе испытательного комплекса ОАО «Сетевая компания».

ПО «SVTest2» и преобразователь ENMU в августе 2019 года были использованы при исследованиях характеристик высоковольтных трансформаторов напряжения 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 качества. В конце 2019 года ENMU в составе АИИС КУЭ цифровой подстанции внесен в реестр средств измерений (76297-19, 76298-19).

Кроме того, ENMU является также многофункциональным интеллектуальным устройством [[11]]. В качестве примера многофункционального преобразователя аналоговых сигналов 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 цифровых подстанций ПС 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 и 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 300 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.

Заключение

При разработке устройств РЗА, а также при проектировании измерительных каналов релейной защиты необходимо учитывать требования современных международных стандартов к работе в переходном режиме.

Полученный опыт разработки и применения ПАС показывает, что требования стандартов являются не только достижимыми на практике, но и необходимыми в применении.

Производители ТТ, ПАС, РЗА 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 релейной защиты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [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] С. Л. Кужеков, А. А. Дегтярев, Б. Б. Сербиновский. О требованиях к трансформаторам тока и устройствам релейной защиты в переходных режимах при наличии апериодической составляющей в первичном токе // Сб. трудов междун. IV научно.-техн. 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 I16 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. – С.333
- [11] Мокеев А. В. и др. Многофункциональные устройства для цифровых подстанций // Энергия Единой сети. – 2019. – № 6. – С. 8-16
- [12] V. Skendzic, D. Dolezilek. New and emerging solutions for sampled value process bus IEC 61850-9-2 standard – an editor's perspective // Relay Protection and Automation for Electric Power Systems, 2017
- [13] Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций. М.: Энергоатомиздат, 2007. С. 150
- [14] Плакидин Р. С., Ульянов Д. Н., Попов Д. Н., Соснин А. С., Мокеев А. В. Требования к метрологическим характеристикам преобразователей аналоговых сигналов // «Релейная защита и автоматизация» №1 (42) 2021, С. 38-45.