

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ СЕТЕЙ

МОКЕЕВ А.В., заместитель генерального директора ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис», к.т.н.

Перспективы развития ФСК и холдинга МРСК связаны с внедрением технологий активно-адаптивных сетей. Это предполагает значительное повышение темпов сбора технологической информации в автоматизированных системах управления, особенно в АСУ ТП подстанций, что, в свою очередь, связано с повышением требований к интеллектуальным электронным устройствам (ИЭУ).

В связи с совершенствованием технологической базы управления электрическими сетями к современным интеллектуальным электронным устройствам (ИЭУ) предъявляются повышенные требования по основным показателям качества обработки сигналов, определяющих их техническое совершенство. Прежде всего, это относится к быстродействию и точности обработки сигналов, обеспечению синхронности измерений. Необходимость в быстрых синхронных измерениях связана с широким применением в активно-адаптивных сетях (ААС) систем автоматического управления и регулирования с использованием различных регуляторов, в том числе статических и электромашиных устройств для компенсации реактивной мощности, устройств для регулирования параметров сети, устройств продольно-поперечного включения, преобразователей вида тока и т.д. [1]. Поэтому к ИЭУ, используемым в автоматизированных системах технологического управления ААС, предъявляются повышенные требования по основным показателям качества обработки сигналов в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

В максимальной степени соответствуют указанным выше требованиям ИЭУ на основе технологии векторных измерений. Подобные устройства в последние годы, наряду с традиционной областью применения WAMS (Wide Area Measurement Systems), все активнее стали применяться в АСУ ТП подстанций, в автоматизированных

системах технологического управления WACS (Wide Area Control Systems), для создания распределенных систем релейной защиты и автоматики WAPS (Wide Area Protection System), а также в качестве основных элементов управления и регулирования ААС [1–3].

С другой стороны, ИЭУ с функциями синхронных измерений параметров режима энергосистемы являются более доступной альтернативой по отношению к ИЭУ на основе технологии векторных измерений. Для выполнения синхронных измерений параметров режима энергосистем ИЭУ должны самостоятельно, или по запросу от специальных устройств, обеспечивать фиксацию текущих измерений. Получаемые таким образом в АСУ ТП подстанций и в АСТУ электрических сетей единовременные срезы параметров режима энергосистем со всех присоединений подстанции и с разных подстанций могут быть использованы для выполнения функций режимной и противоаварийной автоматики ААС. При этом появляется возможность ввести элементы ААС для обычных подстанций с учетом имеющихся средств регулирования (силовые трансформаторы с РПН, батареи конденсаторов и т.д.) и реализовать более эффективные алгоритмы регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности.

В качестве примера ИЭУ, реализующего функции быстрых синхронных измерений параметров режима энергосистемы, можно привести многофункциональный измерительный преобразователь ЭНИП-2. За счет применения

оригинальных алгоритмов обработки сигналов [4, 5] в ЭНИП-2 обеспечено сочетание высокого быстродействия и высокой точности обработки сигналов (класс точности 0,2 и 0,5, быстродействие 40 мс, опционально 20 мс). С целью обеспечения синхронных измерений основные измерения выполняются каждые 0,5 мс, точность синхронизации часов точного времени составляет 0,5 мс (опционально 0,1 мс). ЭНИП-2 обеспечивает измерение параметров режима энергосистем на основе среднеквадратических значений и на основе токов и напряжений основной гармоники, выполнение функций телеуправления и телесигнализации, технического учета электроэнергии, мониторинга качества электроэнергии. Для расширения функциональных возможностей ЭНИП-2 дополняются блоками телеуправления со встроенными реле, модулями ввода-вывода и различными модулями индикации. Преобразователи ЭНИП-2 опционально имеют до двух портов Ethernet с поддержкой протоколов обмена Modbus TCP/IP, МЭК 608705-104 и МЭК 61850-8-1.

При использовании ИЭУ на основе технологии векторных измерений точность синхронизации времени составляет несколько микросекунд, и поэтому на основе измерений комплексных амплитуд токов и напряжений основной гармоники другие параметры режима энергосистемы могут быть вычислены в других устройствах. Дополнительно могут быть вычислены параметры режима энергосистемы на основе информации от нескольких ИЭУ, например,

разность фаз напряжений по концам линии (WAMS), разность комплексных амплитуд токов по концам линии (продольная дифференциальная защита), напряжение у потребителей (системы регулирования напряжения). На основе информации, поступающей с различных ИЭУ, могут быть реализованы различные виды противоаварийной и режимной автоматики [1, 2, 6].

Основные проблемы, стоящие перед разработчиками ИЭУ на основе технологии векторных измерений, связаны с обеспечением требований по качеству обработки сигналов в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов. При этом следует отметить, что существующий стандарт IEEE C37.118.1-2011 [7] ориентирован, прежде всего, на устройства, используемые в WAMS, и не отражает специфических требований к ИЭУ для выполнения функций WACS и WAPS, прежде всего связанных с необходимостью обеспечения требуемого качества обработки при нестационарных входных сигналах и необходимостью более высокого темпа передачи данных.

Стандартом IEEE C37.118.1-2011 предусмотрены испытания ИЭУ для определения показателей качества устройств при электромеханических переходных процессах, но отсутствуют испытания при нестационарных входных сигналах, соответствующих электромагнитным переходным процессам. Более того, рекомендуемые в стандарте временные окна усредняющих КИХ-фильтров не обеспечивают эффективное подавление свободных составляющих электромагнитных переходных процессов [5]. Ряд других противоречий стандарта отмечены в работе [8]. Поэтому в практике энергосистем Российской Федерации предусмотрены дополнительно испытания ИЭУ на основе осциллограмм реальных аварий в энергосистемах и аномальных режимов, или испытания на электродинамической модели ОАО «НИИПТ» [2].

При разработке интеллектуального электронного устройства ЭНИП-3 на основе технологии векторных измерений были учтены как требования стандарта IEEE C37.118.1, так и нестационарный характер входных сигналов – устройство отстроено от помех в виде свободных составляющих электромаг-

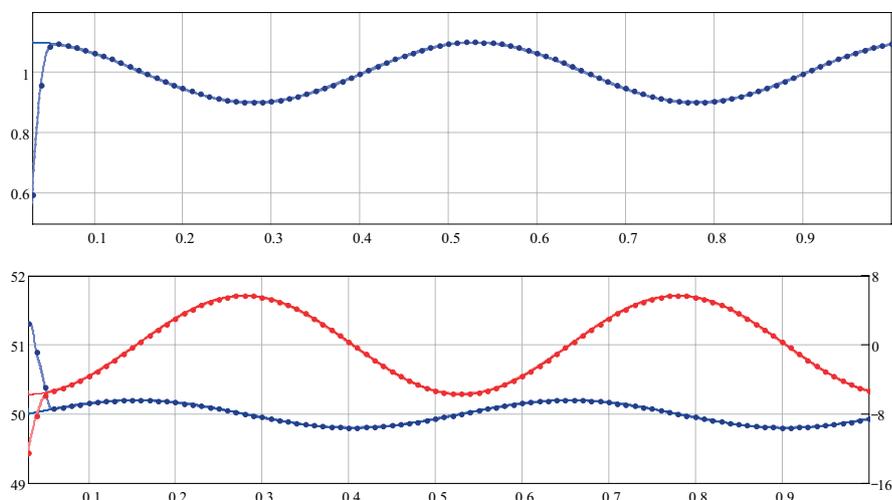


Рис. 1. Испытания ЭНИП-3 (Dynamic compliance – measurement bandwidth)

нитных переходных процессов и вышних гармоник, обеспечивает требуемую точность измерения векторов тока и напряжений при изменении частоты энергосистемы, а также при изменении огибающих токов и напряжений основной гармоники в условиях электромеханических переходных процессов в энергосистеме, при изменении нагрузки, вследствие работы АРВ и иных устройств автоматики энергосистем.

Разработаны две основные модификации ЭНИП-3: с аналоговыми входами (далее ЭНИП-3А) и с цифровыми входами согласно МЭК 61850-9-2LE (далее ЭНИП-3Ц). Для передачи данных в ЭНИП-3 предусмотрено использование протоколов IEEE C37.118.2, МЭК 60870-5-104 и МЭК 61850-8-1. Передача векторных измерений производится 10, 25, 50, 100, 200, 400 раз в секунду. Точность синхронизации встроенных часов реального времени составляет 1 мкс. Опционально ЭНИП-3 содержит встроенный GPS/ГЛОНАСС-приемник, регистратор переходных режимов, ftp-сервер для доступа к архивным данным, встроенный цветной сенсорный индикатор.

В марте 2012 года в лаборатории ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис» и в научно-исследовательской лаборатории технических средств управления ОАО «Энергосетьпроект» проведены испытания ЭНИП-3А и ЭНИП-3Ц. Цель испытаний состояла в определении статических и динамических характеристик ЭНИП-3 согласно IEEE C37.118.1, тестировании ЭНИП-3 при использовании comtrade-файлов

реальных аварий в энергосистемах, предоставленных НИЛ ТСУ Энергосетьпроект [3]. Дополнительно на вход ЭНИП-3 подавались сигналы на основе специально сгенерированных comtrade-файлов электромагнитных и электромеханических процессов с известными законами изменения амплитуды, частоты и фазы основной гармоники тока и напряжения.

При испытаниях ЭНИП-3А и ЭНИП-3Ц использовалось следующее оборудование: испытательные установки «УПУ-МЭ 3.1К», РЕТОМ-41М и РЕТОМ-51, устройство для формирования цифрового потока данных МЭК 61850-9-2LE на основании «проигрывания» comtrade-файлов. Данные ЭНИП-3 фиксировались в устройствах сбора данных ЭНКС-4 (PDC, Phasor Data Concentrator) со встроенным ftp-сервером и компьютере с установленным специализированным программным обеспечением.

На основании результатов, полученных в результате математического моделирования работы и испытаний ЭНИП-3А и ЭНИП-3Ц, произведен сравнительный анализ полученных результатов. Результаты испытаний показали очень точное совпадение результатов математического моделирования функционирования ЭНИП-3 и испытаний ЭНИП-3Ц. Результаты испытаний подтвердили соответствие ЭНИП-3 по статистическим характеристикам и динамическим характеристикам согласно IEEE C37.118.1-2011.

На рис. 1 представлены результаты испытаний ЭНИП-3Ц при использо-

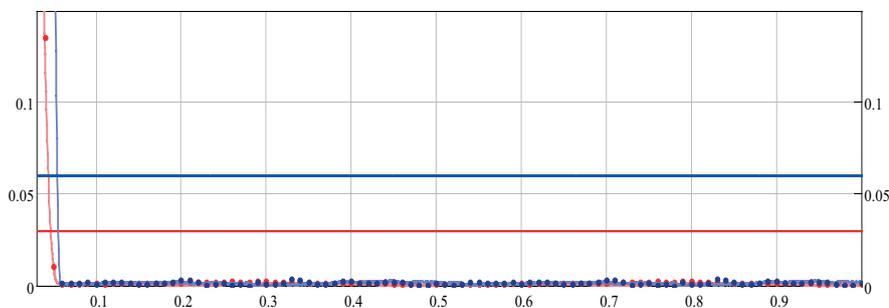


Рис. 2. Графики TVE и FE

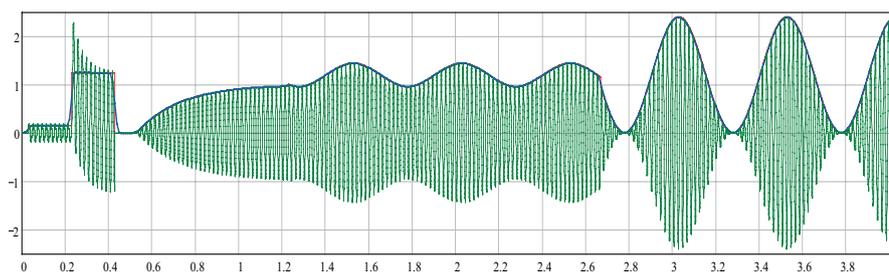


Рис. 3. График измерения амплитуды тока в ЭНИП-3

вании первого испытания стандарта IEEE C37.118.1 (Dynamic compliance – measurement bandwidth). На графике показаны огибающая  $U(t)$ , частота  $f(t)$  и начальная фаза  $\varphi(t)$  входного напряжения;  $\hat{U}_M(k)$ ,  $\hat{f}_M(k)$ ,  $\hat{\varphi}_M(k)$  – результаты, полученные в результате математического моделирования,  $\hat{U}(k)$ ,  $\hat{f}(k)$ ,  $\hat{\varphi}(k)$  – результаты измерений с помощью ЭНИП-3Ц. Передача векторных измерений производится 100 раз в секунду.

Из рис. 2 следует, что полная погрешность измерения вектора напряжения  $TVE$  (Total vector error) и погрешность в измерении частоты  $FE$  (Frequency Measurement Error) значительно меньше допустимых значений.

При воспроизведении comtrade-файлов реальных аварий в энергосистемах и специально сгенерированных comtrade-файлов имеют место кратковременные «всплески» погрешностей измерений ЭНИП-3 комплексных амплитуд токов и напряжений и частоты в режимах энергосистемы, сопровождающимися скачкообразным изменением амплитуды или начальной фазы токов (напряжений) основной гармоники при электромагнитных переходных процессах и в режимах, связанных с подачей на электроустановку напряжения. Указанные явления неизбежны. Вопрос

лишь в минимизации уровня данных погрешностей, их продолжительности и обеспечения достоверности данных. Один из способов обеспечения достоверности векторных измерений описан в работе [5].

На рис. 3 представлены результаты испытаний ЭНИП-3Ц при «проигрывании» comtrade-файла, в котором последовательно воспроизводятся несколько режимов с известными законами изменения амплитуды, частоты и фазы основной гармоники тока и напряжения. На графике показаны мгновенный ток  $i(k)$ , огибающая тока основной гармоники  $I(k)$  и ее оценка  $\hat{I}(k)$  с помощью ЭНИП-3Ц. Как следует из рис. 3, при электромагнитных переходных процессах, сопровождающихся скачкообразным изменением амплитуды тока основной гармоники и наличием свободных составляющих переходного процесса, оценка амплитуды тока производится без наличия перерегулирования собственного переходного процесса в ИЭУ даже при наличии в токе апериодической составляющей.

Математическое моделирование ЭНИП-3 в различных режимах работы энергосистем, в том числе в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов, и результаты испытаний ЭНИП-3А и ЭНИП-3Ц позволяют

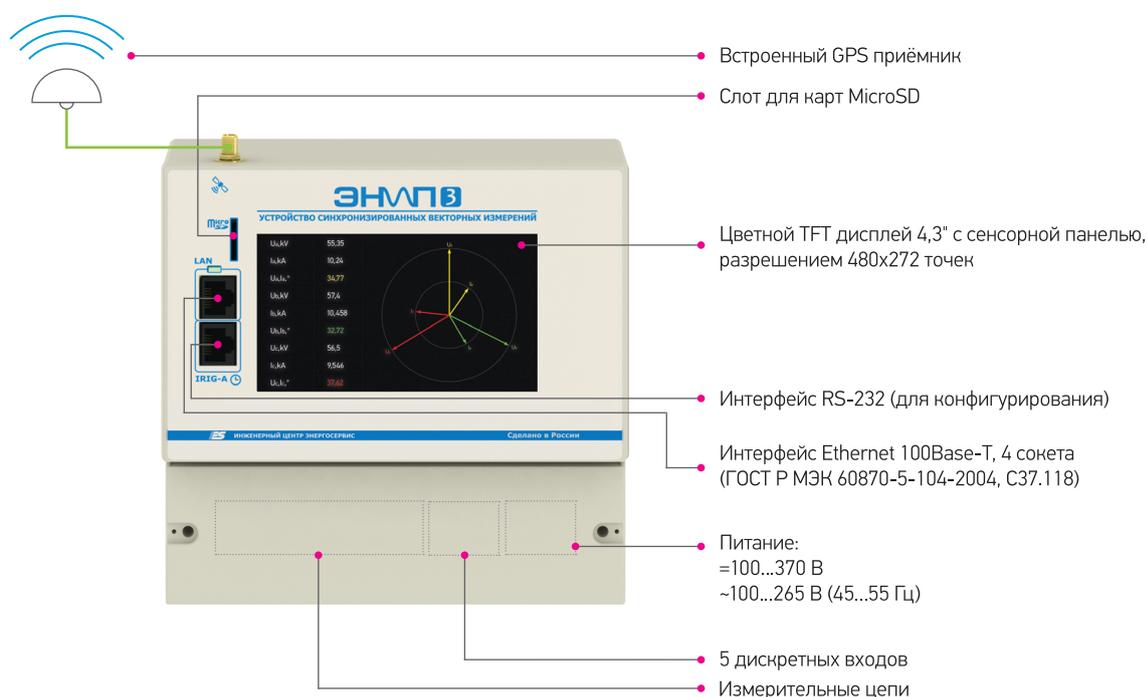
сделать вывод об эффективности использования ЭНИП-3 в системах мониторинга переходных режимов WAMS, в автоматизированных системах технологического управления нового поколения WACS и распределенных систем релейной защиты и автоматики WAPS.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дорощев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЭЭС России // Энергоэксперт. – 2009. – № 5. – С. 28–34.
2. Жуков А.В. Развитие технологий векторной регистрации параметров для противоаварийного и режимного управления электрическими режимами энергосистем // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем – 2011». – Режим доступа: <http://www.relayprotect.ru>.
3. Наровлянский В.Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы – М.: Энергоатомиздат, 2004.
4. Мокеев А.В. Разработка интеллектуальных электронных устройств с функциями синхронизированных измерений параметров режима энергосистем // Сб. 4 Всерос. науч.-техн. конф. «Энергия белых ночей». – 2011. – С. 28–40.
5. Digital Filters / A.V. Mokeev and etc., Ed. F.P.G. Márquez. – Rijeka, InTech, 2011. – 290 с.
6. Небера А.А. Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима [Электронный ресурс] // Сб. мат. межд. науч.-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем – 2011». – Режим доступа: <http://www.relayprotect.ru>.
7. IEEE C37.118.1-2011 // Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.
8. Покидышев А.Н., Казаков П.Н. Анализ требований стандарта C37.118 [Электронный ресурс] // Сб. мат. межд. науч.-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем – 2011». – Режим доступа: <http://www.relayprotect.ru>.

# ЭНИП-3

## ПОДДЕРЖКА ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ



- Соответствие IEEE C37.118.1-2011
- Подключение к измерительным трансформаторам тока и напряжения / поддержка шины процесса МЭК 61850-9-2LE
- Передача векторных измерений 10/25/50/100/200/400 раз в секунду
- Передача в соответствии с IEEE C37.118.2-2011, поддержка МЭК 60870-5-104-2004, МЭК 61850-8-1

# ЭНМГВ

## ДОСТУПНЫЕ ВЕКТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ