

5-я ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

• **МЕТРОЛОГИЯ • ИЗМЕРЕНИЯ •**
УЧЕТ И ОЦЕНКА КАЧЕСТВА
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ •

Материалы конференции
«Энергия Белых ночей 2012»

Санкт-Петербург
2012 г.

Ответственные за подготовку трудов
конференции к изданию:

Менеджер оргкомитета:

Корнеева Наталья Борисовна

Тел./факс: (812) 327-21-11

Зам. председателя оргкомитета:

Шапиро Ефим Зиновьевич, д. т. н.

Тел.: 323-96-79

Ответственность за подбор, достоверность и точность приведенных фактов, экономико-статистических и технических данных, собственных имен и прочих сведений, а также за то, что в материалах не содержится данных, не подлежащих открытой публикации, несут авторы опубликованных материалов и рекламодатели.

© Верстка сборника — Н. А. Дубовская, 2012

© Дизайн обложки — В. В. Морозов, 2012

Разработка и испытания интеллектуальных электронных устройств ЭНИП-3 на основе технологии векторных измерений

Мокеев А. В.
ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис»

Введение

Перспективы развития интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) энергосистем определяют две основные технологии: векторных измерений (IEEE C37.118–2011) и цифровой подстанции (IEC 61850). Успешное внедрение автоматизированных систем мониторинга переходных режимов WAMS (Wide Area Measurement Systems) на основе специализированных устройств — синхрофазоров (PMU, Phasor Measurement Unit), предопределило перспективность использования ИЭУ на основе технологии векторных измерений (ТВИ) для решения других важных задач, связанных с повышением надежности и экономичности функционирования энергосистем.

Перспективными областями применения подобных ИЭУ являются АСУ ТП подстанций, автоматизированные системы технологического управления нового поколения WACS (Wide Area Control Systems), распределенные системы релейной защиты и автоматики WAPS (Wide Area Protection System), а также системы управления и регулирования активно-адаптивных сетей (ААС). Необходимость в быстрых синхронных измерениях параметров режима энергосистемы связана с широким применением в активно-адаптивных сетях систем автоматического управления и регулирования сетями и подстанциями с использованием различных регуляторов, в том числе статических и электромашинных устройств для компенсации реактивной мощности, устройств для регулирования параметров сети, устройств продольно-поперечного включения, преобразователей вида тока и т. д. [1].

При точности синхронизации времени ИЭУ порядка несколько микросекунд на основе измерений комплексных амплитуд токов и напряжений основной гармоники остальные 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 [2–4].

Следует отметить, к интеллектуальным электронным устройствам, используемым в автоматизированных системах технологического управления ААС, предъявляются повышенные требования по основным показателям качества обработки сигналов (быстродействие, точность обработки сигналов, синхронность измерений и т. д.) в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов. При этом следует отметить, что существующий стандарт IEEE C37.118.1–2011 ориентирован прежде всего устройства, используемые в WAMS, и не отражает ряда специфических требований к ИЭУ для WACS, WAPS, ACC, прежде всего связанных с необходимостью обеспечения требуемого качества обработки нестационарных входных сигналов, обеспечению более широкого диапазона измерений векторов тока и напряжений, необходимостью более высокого темпа передачи данных. Кроме того, процесс интеграции стандартов цифровой подстанции (IEC 61850) и стандарта векторных измерений (IEEE C37.118) в настоящее время еще не завершен — стандарт IEC 61850-90-5 (Use of IEC 61850 to transmit synchrophasor information according to IEEE C37.118) находится в разработке.

Интеллектуальные электронные устройства ЭНИП-3

Интеллектуальные электронные устройства ЭНИП-3 разработаны на базе серийно выпускаемых с 2009 года многофункциональных измерительных преобразователей ЭНИП-2, отличительная особенность которых связана с реализацией быстрых синхронных измерений параметров режима энергосистемы [5].

Разработаны две основные модификации ЭНИП-3: с аналоговыми входами (далее ЭНИП-3А) и с цифровыми входами согласно IEC 61850-9-2LE (далее ЭНИП-3Ц). Для передачи данных в ЭНИП-3 предусмотрено использование протоколов IEC 60870-5-104, IEEE C37.118.2 и IEC 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.

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 ИЭУ — устройство отстроено от помех в виде свободных составляющих электромагнитных переходных процессов и высших гармоник и обеспечивает требуемую точность измерения векторов тока и напряжения при изменении частоты энергосистемы, а также при изменении огибающих токов и напряжений основной гармоники в условиях электромеханических переходных процессов в энергосистеме, при из-

менении нагрузки, вследствие работы АРВ и иных устройств автоматики энергосистем.



Рис. 1. Интеллектуальное электронное устройство ЭНИП-3

При разработке алгоритмов функционирования ЭНИП-3 особое внимание уделялось синтезу цифровых фильтров. Синтез фильтров производился с использованием специально разработанного метода синтеза, основанного на спектральных представлениях преобразования Лапласа и многокритериальной оптимизации с ограничениями [6–8]. Применяемый метод синтеза позволяет получить временные окна (импульсные функции) усредняющих КИХ-фильтров, обеспечивающие сочетание высокого быстродействия и высокой точности обработки сигналов при заданных диапазонах изменения параметров полезного сигнала и помехи [6,7]. Получены временные окна для усредняющих КИХ-фильтров для различных применений ЭНИП-3.

Находится в разработке новая модификация ЭНИП-3, в которой заказчику будет предоставлена возможность выбора временного окна из перечня широко используемых окон, в т. ч. и описанных в стандарте IEEE C37.118.1, и перечня специально синтезированных окон. Также будет предоставлена пользователю возможность задания собственных временных окон.

В доступных для заказа модификациях ЭНИП-3 возможность выбора временного окна отсутствует. В указанных модификациях ЭНИП-3 использован специально разработанный простой в реализации «быстрый» алгоритм усредняющего КИХ-фильтра. За счет использования указанного алгоритма уменьшается требования к основному микропроцессору и стоимость указанных модификаций ЭНИП-3 сопоставима со стоимостью обычных многофункциональных измерительных преобразователей.

Испытания ЭНИП-3

Особенность испытаний ИЭУ на основе технологии векторных измерений связана с необходимостью определения динамических характеристик при заданных входных сигналах, соответствующих напряжениям (токам) электромеханических переходных процессов. Другая особенность испытаний ИЭУ на основе технологии векторных измерений связана с необходимостью использования испытательного оборудования, которое обеспечивает подачу на входы ИЭУ синхронизированных токов и напряжений в аналоговой или в цифровой форме (цифровой поток данных согласно IEC 61850-9-2).

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 [9]. Более того, рекомендуемые в стандарте временные окна усредняющих КИХ-фильтров не обеспечивают эффективное подавление свободных составляющих электромагнитных переходных процессов [6]. Ряд других противоречий стандарта отмечены в работе [10]. 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 [3].

Полноценный комплекс испытаний ИЭУ на основе ТВИ может быть проведен при использовании испытательных установок зарубежных производителей, например установки СМС 256plus фирмы Omicron [11]. Указанная испытательная установка обеспечивает формирование наряду с синхронизированными аналоговыми токами и напряжениями цифровых сигналов согласно IEC 61850-9-2. Установка СМС 256plus обладает высокой точностью воспроизведения токов и напряжений и может использоваться не только для испытаний устройств РЗА, но и счетчиков электроэнергии класса точности 0,2 и РМУ (класс точности 0,015, разрешение по фазе 0,0010, погрешность по фазе 0,0050, разрешение по частоте 5 мкГц, погрешность синхронизации времени 1 мкс).

Среди установок российских производителей следует отметить новую разработку НПП «Динамика» РЕТОМ-61850, которая обладает необходимыми характеристика для поверки ИЭУ с цифровыми входами согласно IEC 61850-9-2LE. При этом возможна совместная работа установок РЕТОМ-61850 и РЕТОМ-51(61) с одновременной выдачей синхронизированных аналоговых и цифровых сигналов.

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 [4]. Дополнительно на вход ЭНИП-3А и ЭНИП-3Ц 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 «УППУ-МЭ 3.1К», РЕТОМ-41М и РЕТОМ-51, устройство для формирования цифрового потока данных IEC 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 ЭНИП-3 и испытаний ЭНИП-3А и ЭНИП-3Ц произведен сравнительный анализ полученных результатов. Результаты испытаний показали очень точное совпадение результатов математического моделирования функционирования и испытаний статических характеристик ЭНИП-3, а также точное совпадение результатов математического моделирования и испытаний ЭНИП-3Ц. Для проведения полноценных испытаний ЭНИП-3А с целью определения динамических характеристик устройства требуется использование испытательной установки с лучшими метрологическими характеристиками, чем у установки РЕТОМ-51.

Ниже приведены результаты испытаний ЭНИП-3А и ЭНИП-3Ц согласно тестов IEEE C37.118.1. Из испытаний следует, что метрологические характеристики ЭНИП-3 соответствуют заявленным и превосходят требования стандарта по точности и диапазонам измерения комплексных амплитуд тока и напряжения, частоты, допустимому уровню высших гармоник.

Входной сигнал ИЭУ с цифровыми входами согласно IEC 61850-9-2LE, соответствующий входному напряжению или току, для трех динамических тестов описывается с помощью следующего выражения

$$x(k) = X(k) \cos(\psi(k)),$$

В первом динамическом тесте (dynamic compliance – measurement bandwidth) огибающая входного сигнала ИЭУ $X(k)$, полная фаза $\psi(k)$, начальная фаза и частота изменяются по периодическому закону и описываются с помощью следующих выражений

$$X(k) = X_m \left(1 + k_x \cos(\omega_x kT)\right), \psi(k) = \omega_0 t + k_a \cos(\omega_x kT - \pi),$$

$$\varphi(k) = k_a \cos(\omega_x kT - \pi), f(k) = \frac{\omega_0}{2\pi} - k_a \frac{\omega_x}{2\pi} \cos(\omega_x kT - \pi),$$

где $k_x = 0,1(0); k_a = 0,1; \omega_x = 0,1 \div 4\pi(10\pi); kT$ – дискретное время, $T = 0,0005$ с – шаг дискретизации.

На рис. 1 представлены результаты испытаний ЭНИП-3Ц по первому тесту (class P) при $\omega_x = 4\pi, k_x = 0,1; k_a = 0,1$ и при скорости передачи данных $F_s = 100$ Гц.

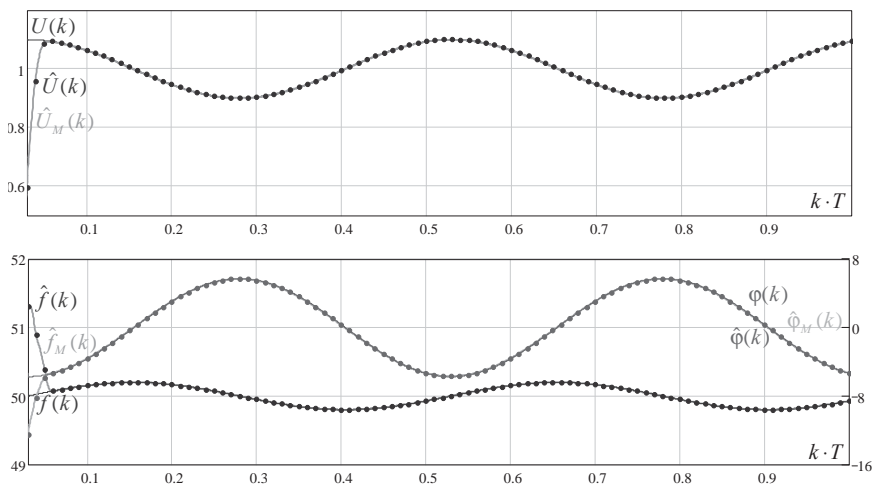


Рис. 2. Испытания ЭНИП-3 (dynamic compliance – measurement bandwidth)

На графике показаны относительное значение огибающей $U(k)$, частоты $f(k)$ и начальная фаза $\varphi(k)$ входного напряжения; $\hat{U}_M(k), \hat{f}_M(k),$

$\hat{\Phi}_M(k)$ — результаты, полученные в результате математического моделирования, $\hat{U}(k)$, $\hat{f}(k)$, $\hat{\Phi}(k)$ — результаты измерений с помощью ЭНИП-3Ц.

На рис. 3 показано, что полная погрешность измерения вектора напряжения TVE (Total vector error) и погрешность в измерении частоты FE (Frequency Measurement Error) в ЭНИП-3Ц значительно меньше допустимых значений.

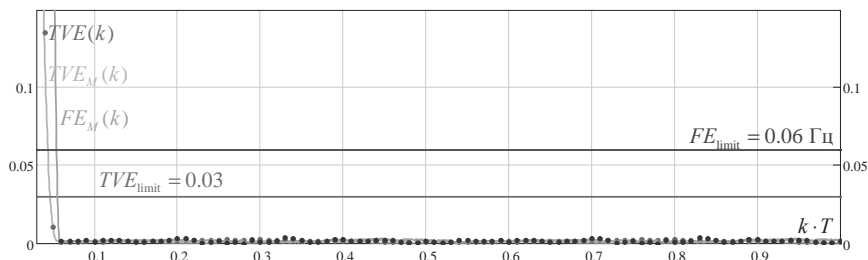


Рис. 3. Графики TVE и FE

Скорость изменения частоты (RFE, Rate of change of Frequency Error) во всех опытах первого теста, также как и TVE и FE, не превышает допустимых значений для ИЭУ классов Р и М.

При испытаниях по второму тесту (dynamic compliance — performance during ramp of system frequency) огибающая входного сигнала неизменна, а частота изменяется по линейному закону

$$X(k) = X_m, \psi(k) = \omega_0 kT + \pi R_f (kT)^2,$$

$$\varphi(k) = \pi R_f (kT)^2, f(k) = \frac{\omega_0}{2\pi} + R_f kT,$$

где $R_f = 1$ Гц/с.

Результаты испытаний для ИЭУ (class Р) при $F_s = 100$ Гц представлены на рис. 4 и 5.

Результатам испытаний ЭНИП-3Ц по второму тесту: соответствие требованиям стандарта по TVE, FE и RFE (class Р и class М).

Математическое описание входного сигнала ИЭУ **по испытаниям третьего теста** (Dynamic compliance — performance under step changes in phase and magnitude)

$$X(k) = X_m [1 + k_x f_1(kT)], \psi(k) = \omega_0 kT + k_a f_1(k)$$

$$f_1(k) = 1(kT); k_x = 0, 1; k_a = \pm\pi / 18.$$

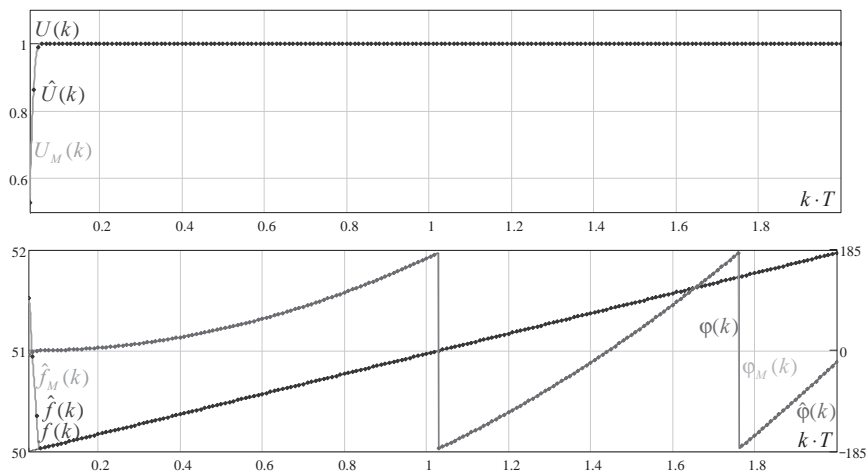


Рис. 4. Испытания ЭНИП-3 (performance during ramp of system frequency)

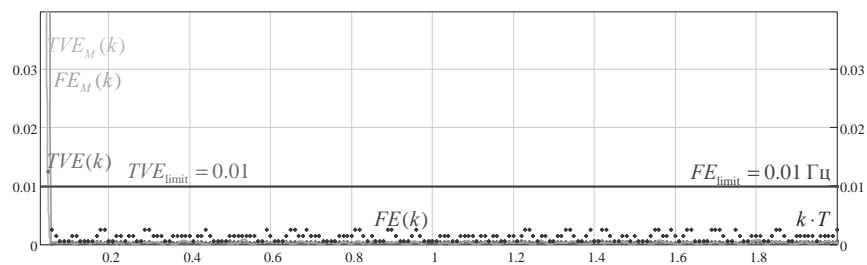


Рис. 5. Графики TVE и FE

В ходе данных испытаний скачкообразно изменяется на 10 % амплитуда входного сигнала или на 10^0 начальная фаза сигнала и определяются следующие параметры: время отклика (response time), время задержки (delay time), перерегулирование (overshoot). В зависимости от скорости передачи данных накладываются ограничения на следующие параметры: TVE, FE и RFE.

Результаты испытаний для ЭНИП-3Ц при $F_s = 100$ Гц представлены на рис. 6 и 7.

Результаты испытаний ЭНИП-3Ц по третьему тесту: соответствие требованиям стандарта при большинстве значений F_s . Таким образом, результаты испытаний подтвердили соответствие ЭНИП-3 по всем статистическим и динамическим характеристикам стандарта IEEE C37.118.1–2011.

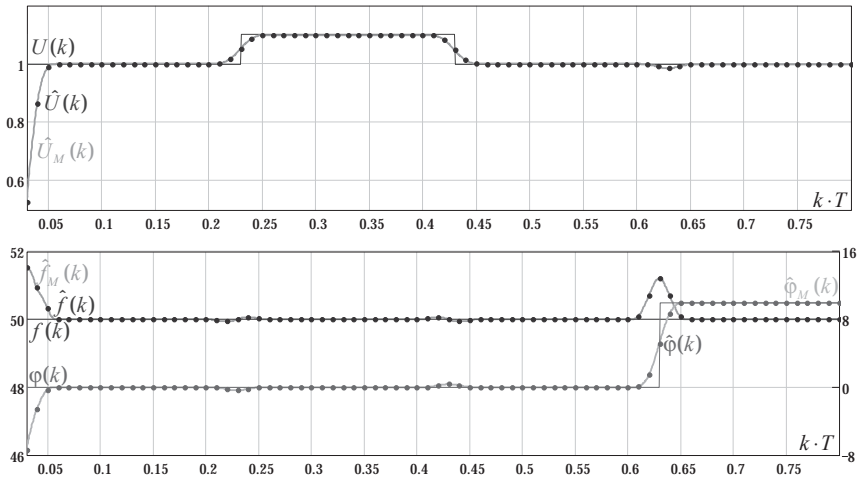


Рис. 6. Испытания ЭНИП-3
(performance under step changes in phase and magnitude)

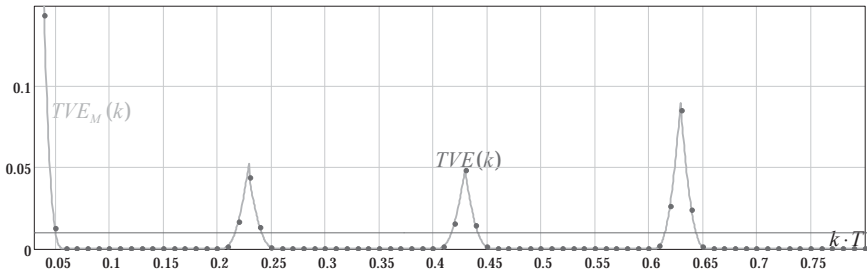


Рис. 7. Графики полной погрешности измерения вектора напряжения

Как следует из рис. 6 и 7 при скачкообразном изменении амплитуды или фазы напряжения (тока) основной гармоники имеют место кратковременные «всплески» погрешностей измерения комплексных амплитуд (фазоров) тока (напряжения) основной гармоники и частоты сети. Еще в большей степени это проявляется при скачкообразным изменением амплитуды или начальной фазы токов или напряжений основной гармоники при электромагнитных переходных процессах или при включении установки под напряжение (см. рис. 2–5). Указанные явления неизбежны. Вопрос лишь в минимизации уровня данных погрешностей, их продолжительности или обеспечения достоверности измерений. Один из способов обеспечения достоверности данных векторных измерений описан в работе [6].

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.8, 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 аperiodической составляющей.

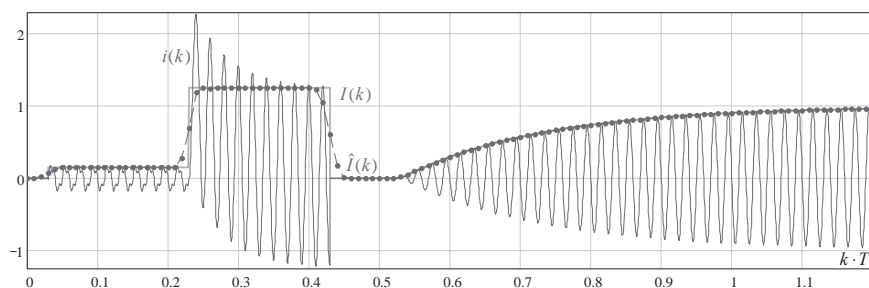


Рис. 8. График измерения амплитуды тока в ЭНИП-3

Области применения ЭНИП-3

Математическое моделирование и испытания ЭНИП-3 в различных режимах работы энергосистем, в том числе в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов и предварительные 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. Дорофеев, В. В. Активно-адаптивная сеть — новое качество ЕЭС России [Текст] / В. В. Дорофеев, А. А. Макаров // Энергоэксперт. — 2009. — № 5. — С. 28–34.
2. Долежилек, Д. Дж. Практическое применение интеллектуальных сетей [Текст] / Д. Дж. Долежилек, С. Л. Швайцер // Энергоэксперт. — 2009. — № 5. — С. 54–61.

3. Жуков, А. В. Развитие технологий векторной регистрации параметров для противоаварийного и режимного управления электрическими режимами энергосистем [Электронный ресурс] / А. В. Жуков // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем — 2011». — Режим доступа: <http://www.relayprotect.ru>.

4. Наровлянский, В. Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы [Текст] / В. Г. Наровлянский; ред. М. Ш. Мисриханов. — М.: Энергоатомиздат, 2004.

5. Мокеев, А. В. Разработка интеллектуальных электронных устройств с функциями синхронизированных измерений параметров режима энергосистем [Текст] / А. В. Мокеев, Д. Н. Ульянов // Сб. 4 Всерос. науч.-техн. конф. «Энергия белых ночей». — 2011. — С. 28–40.

6. Digital Filters [Text] / A. V. Mokeev and etc., ed. F.P.G. Márquez. — Rijeka, InTech, 2011. — 290 с.

7. Мокеев, А. В. Алгоритмы обработки сигналов ИЭУ на основе технологии векторных измерений [Электронный ресурс] / А. В. Мокеев // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем — 2011». — Режим доступа: <http://www.relayprotect.ru>.

8. Ванин, В. К. Аналоговые и цифровые фильтры в измерительных устройствах и устройствах автоматики энергосистем [Текст]: уч. пособие / В. К. Ванин, А. В. Мокеев, М. Г. Попов. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. — 196 с.

9. C37.118.1–2011 // IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.

10. Покидышев, А. Н. Анализ требований стандарта C37.118 [Электронный ресурс] / А. Н. Покидышев, П. Н. Казаков // Сб. мат. межд. науч.-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем — 2011». — Режим доступа: <http://www.relayprotect.ru>.

11. СМС 256plus Technical Data [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.omicon.at/fileadmin/user_upload/files/pdf/en/СМС-256plus-Technical-Data-ENU.pdf.

Сведения об авторе

Мокеев Алексей Владимирович,

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

Адрес: 163046, Россия, Архангельск, ул. Котласская, д. 26

Тел.: (8182) 64-60-00, 65-75-65

Факс: (8182) 23-69-55

E-mail: a.mokeev@ens.ru

www.enip2.ru, www.ens.ru