

СИСТЕМЫ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Бовыкин В. Н., Миклашевич А. В., Мокеев А. В., Родионов А. В.

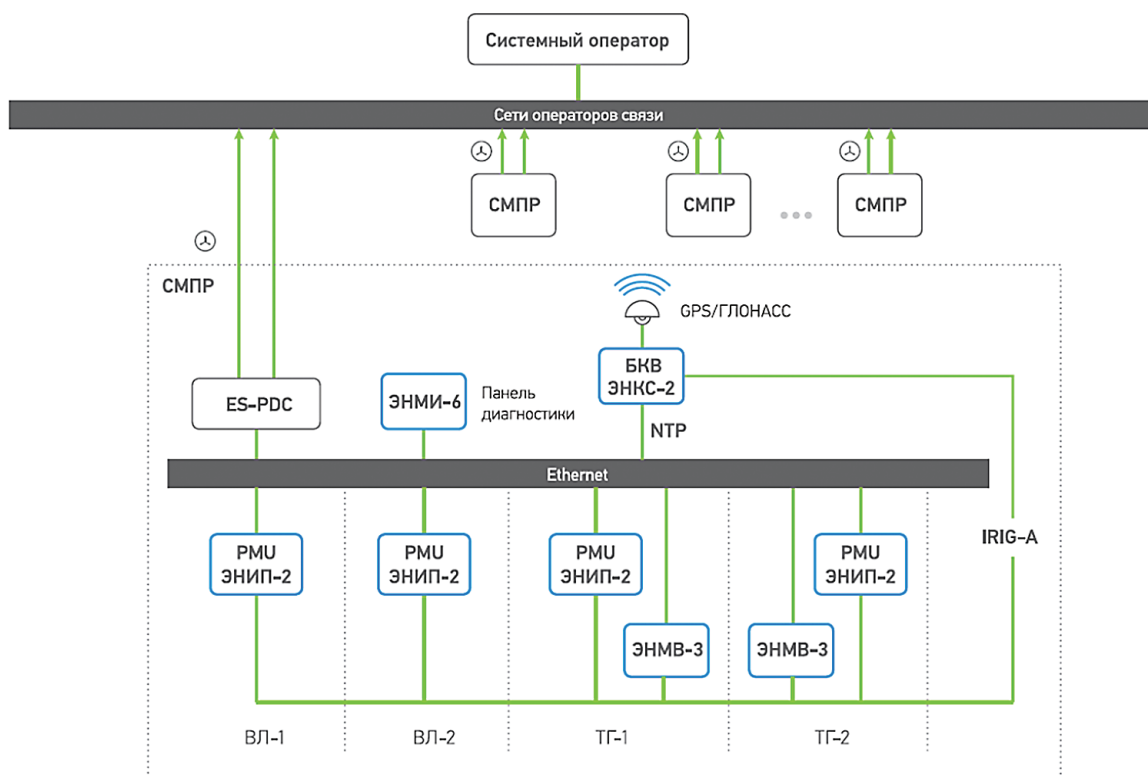
На совершенствование интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) энергосистем определяющее влияние оказывают две основные технологии: векторных измерений и цифровой подстанции.

Современные ИЭУ должны обеспечивать быстрые и точные синхронные измерения, обладать высокой степенью достоверности контроля параметров режима энергосистемы в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов, также они предусматривают применение скоростных коммуникаций на основе промышленного Ethernet с поддержкой технологий резервирования и безопасности. В максимальной степени соответствуют перечисленным выше требованиям устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ) или Phasor Measurement Unit (PMU).

Подобные устройства в последние годы, наряду с традиционной областью применения – системами мониторинга переходных режимов WAMS (Wide Area Measurement Systems), все чаще стали применяться в АСУ ТП подстанций, в автоматизированных системах измерений, защиты и управления нового поколения WAMPAC (Wide Area Monitoring, Protection and Control System), а также в качестве основных элементов управления и регулирования активно-адаптивных сетей [1,2].

На основе измерений синхрофазоров тока и напряжения в УСВИ другие параметры режима энергосистемы могут быть вычислены в других ИЭУ, например, раз-

Рис. 1. Система мониторинга переходных режимов.



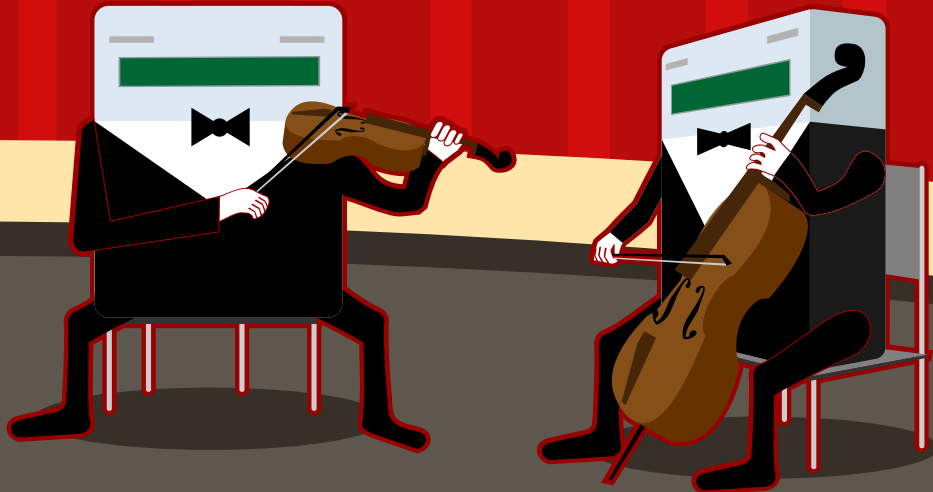


Рис. 2. Интеллектуальное электронное устройство ЭНИП-3.



61850-90-5 (в разработке). Передача векторных измерений производится 10, 25, 50, 100 раз в секунду. Точность синхронизации встроенных часов реального времени составляет 1 мкс. Опционально ЭНИП-3 содержит встроенный GPS/ГЛОНАСС-приемник и встроенный цветной сенсорный индикатор. Стоимость базовых модификаций ЭНИП-3 сопоставима со стоимостью цифровых измерительных преобразователей телемеханики.

При разработке интеллектуального электронного устройства ЭНИП-3 были учтены как требования стандарта IEEE C37.118.1, так и нестационарный характер входных сигналов – устройство отстроено от помех в виде свободных составляющих электромагнитных переходных процессов и высших гармоник, обеспечивает требуемую точность измерения синхрофазоров тока и напряжения при электромеханических переходных процессах [5].

При разработке УСВИ специалистами ЗАО "Инженерный центр "Энергосервис" использованы робастные и адаптивные алгоритмы обработки сигналов [6,7]. Первый тип алгоритмов основан на использовании робастных частотных фильтров, которые имеют низкую чувствительность к изменению параметров помехи и к отклонению частоты в энергосистеме. Применение адаптивных ал-

горитмов обработки сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем позволяет реализовать устройства с максимально возможным быстродействием.

ИСПЫТАНИЯ ЭНИП-3

За последние годы проведены испытания ЭНИП-3 на соответствие стандарту IEEE C37.118.1 и исследования функционирования в различных режимах работы энергосистем, в т.ч. испытания в лаборатории ЗАО "Инженерный центр "Энергосервис", исследовательской лаборатории технических средств управления ОАО "Энергосетьпроект", на цифро-аналого-физическом комплексе ОАО "НТЦ ЕЭС" в исследовательской лаборатории НИУ МЭИ.

В декабре 2012 г. на цифро-аналого-физическом комплексе ОАО "НТЦ ЕЭС" проходили сравнительные испытания нескольких образцов УСВИ российских производителей. На основании результатов 26 обязательных и ряда дополнительных опытов ОАО "НТЦ ЕЭС" была подтверждена эффективность использования УСВИ ЭНИП-3 в системах мониторинга переходных процессов.

В августе 2013 года на кафедре РЗА МЭИ на установке RTDS прошли тестовые испытания устройств синхронизированных векторных измерений российских производителей на соответствие стандарту IEEE C37.118.1.

На рис. 3 представлены результаты испытаний ЭНИП-3 при использовании первого испытания стандарта IEEE C37.118.1 (Dynamic compliance – measurement bandwidth). На графике показаны: относительное значение огибающей, частоты и начальной фазы входного напряжения; , , - результаты, полученные (в результате) (путем?) математического моделирования, , , - результаты измерений с помощью ЭНИП-3. Передача векторных измерений производится 100 раз в секунду.

На основании результатов, полученных в результате математического моделирования работы и испытаний ЭНИП-3, произведен сравнительный анализ полученных результатов. Результаты

ность фаз напряжений по концам линии (WAMS), разность комплексных амплитуд токов по концам линии (продольная дифференциальная защита), напряжение у потребителей (системы регулирования напряжения). При использовании информации, поступающей с различных ИЭУ, могут быть реализованы различные виды режимной и противоаварийной автоматики.

В статье рассматриваются вопросы разработки, испытаний и внедрения систем векторных измерений при использовании продукции ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис».

АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ

На рис.1 представлена структурная схема системы мониторинга переходных режимов.

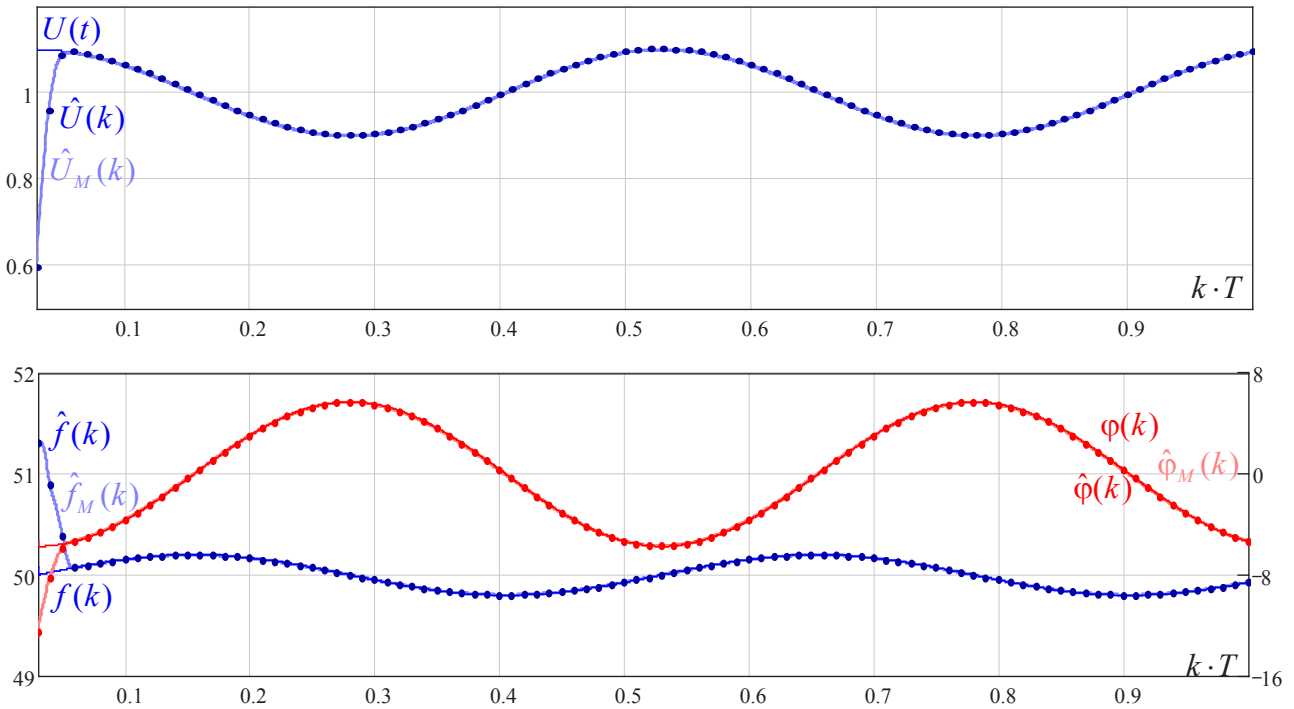
Система мониторинга переходных режимов может быть реализована полностью с использованием продукции ЗАО "Инженерный центр "Энергосервис", в том числе УСВИ ЭНИП-2-Х-А1Е4-Х3 (сокращенно ЭНИП-3), новых устройств с поддержкой технологии векторных измерений и стандартов цифровой подстанции (ENMU, ЭНИП-4), модулей аналогового ввода постоянного напряжения и постоянного тока цепей возбуждения генераторов ЭНМВ-3, блока коррекции времени ЭНКС-2, концентратора данных векторных измерений ES-PDC, панели диагностики на основе модуля индикации ЭНМИ-6 и специализированного программного обеспечения.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ЭНИП-3

Интеллектуальные электронные устройства ЭНИП-3 с функциями векторных измерений разработаны на базе многофункциональных измерительных преобразователей ЭНИП-3. Разработаны две основные модификации нового устройства: с аналоговыми измерительными входами и с цифровым входом согласно IEC 61850-9-2LE [3,4].

Для передачи данных предусмотрено использование следующих протоколов: IEEE C37.118.2, IEC 60870-5-104 и IEC

Рис. 3. Испытания ЭНИП-3, тест Dynamic compliance – measurement bandwidth.



испытаний показали очень точное совпадение результатов математического моделирования функционирования ЭНИП-3 и результатов испытаний.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ЭНИП-3 С ПОДДЕРЖКОЙ ШИНЫ ПРОЦЕССА МЭК 61850-9-2LE

Первым интеллектуальным электронным устройством с поддержкой шины процесса, разработанным ЗАО "Инженерный центр" Энергосервис", является специальная модификация устройства синхронизированных векторных измерений ЭНИП-3. Устройство имеет те же функциональные возможности, что и обычный ЭНИП-3.

В качестве источника цифровых данных для ЭНИП-3 могут использоваться современные датчики тока и напряжения с цифровым выходом, а также специальные разновидности устройств сопряжения с шиной процесса – SAMU (Stand-Alone Merging Unit), подключаемых к традиционным трансформаторам тока и напряжения.

В рамках первой сессии испытаний на совместимость оборудования по стандарту МЭК 61850, проводимых в 2013 году в НИУ МЭИ при поддержке ООО «Теквел», устройства ЭНИП-3 прошли успешные испытания с волоконно-оптическими трансформаторами тока и напряжения, производимыми фирмой ЗАО «Профотек».

НОВЫЕ УСТРОЙСТВА С ПОДДЕРЖКОЙ ТЕХНОЛОГИЙ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ

В последние годы специалистами ЗАО "Инженерный центр" Энергосервис" ведется разработка новых устройств с поддержкой технологии векторных измерений и стандартов цифровой подстанции, а именно: устройства сопряжения с шиной процесса ENMU, устройства синхронизированных векторных измерений ЭНИП-4, многофункционального интеллектуального электронного устройства ESM, контроллера присоединения ENBC.

Разработка устройств сопряжения с шиной процесса ENMU (рис.4) ведется с 2011 года. Устройства имеют модульную структуру. Основные модули: модуль

тока для подключения к измерительной и релейной обмоткам трансформатора тока, модуль напряжения, процессорный модуль, модуль дискретного ввода-вывода, модуль питания [4].

Процессорный модуль может включать 2 порта 100BASE-TX или 2 порта 100BASE-FX, USB-порт и сервисный Ethernet-порт для конфигурирования, порт IRIG-A для синхронизации часов реального времени. Ведется работа по обеспечению синхронизации внутренних часов ENMU при использовании протокола PTP (IEEE 1588). Опционально процессорный модуль может включать встроенный GPS-приемник. Модули питания

Рис. 4. Устройство сопряжения с шиной процесса ENMU.

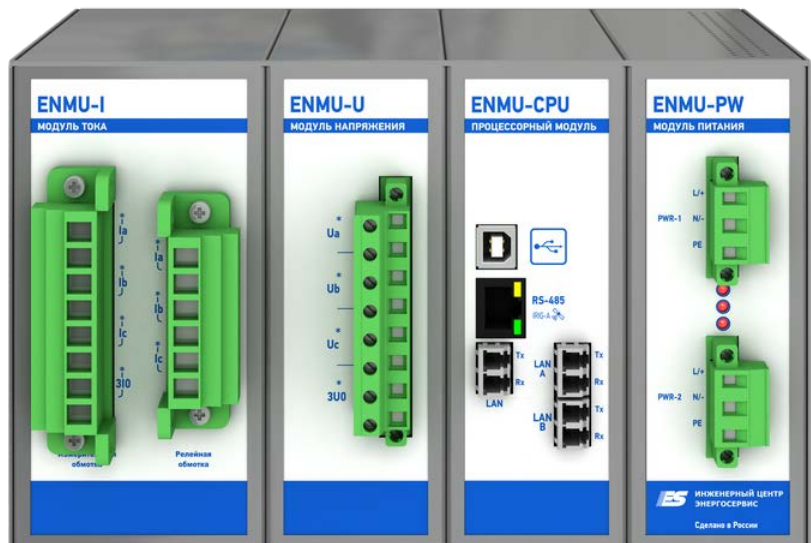


Рис. 5. Многофункциональное интеллектуальное устройство ESM.



предусматривают подключение к одному или двум источникам оперативного тока.

Для реализации SAMU при конфигурировании ENMU задаются следующие возможные режимы работы: формирование отдельных или совмещенных потоков данных (от релейной и измерительной обмоток трансформатора тока) для sampled values и для векторных измерений.

В последних модификациях ENMU реализована одновременная передача 3 потоков sampled values (sv256, sv80m, sv80g), также реализован протокол резервирования PRP (IEC 62439-3). Процессорная плата содержит дополнительный сервисный порт Ethernet.

Отличительной особенностью ENMU является реализация в одном устройстве функций двух устройств: Merging Unit и PCMU (Phasor Control and Measurement Unit). В ENMU наряду с IEC 61850-9-2LE реализована поддержка протокола IEEE C37.118.2 и ведутся работы по поддержке протокола IEC 61850-90-5. Это дает возможность использования ENMU в территориально-распределенных системах управления и измерений WAMPAC. В ENMU предусмотрена одновременная передача данных по протоколам IEC 61850-9-2LE и IEEE C37.118.2 как через один порт, так и через разные порты.

Использование векторных измерений можно рассматривать как альтернативу sampled values (IEC 61850-9-2LE), так как для многих ИЭУ достаточно использование синхрофазоров токов и напряжений основной гармонике для вычисления параметров режима энергосистемы. Дополнительно в ENMU обеспечивается измерение среднеквадратических значений токов и напряжений, а также эквивалентных углов между ними.

В дополнение к устройству синхронизированных векторных измерений ЭНИП-3 с цифровым входом разрабатывается новое устройство ЭНИП-4 с поддержкой шины процесса. Принципиальное отличие ЭНИП-4 от ЭНИП-3 связано с увеличением диапазонов работы по току и напряжению (полные диапазоны по

току и напряжению в соответствии с IEC 61850-9-2LE). Это дает возможность использовать данные от ЭНИП-4 в системах не только режимной, но и противоаварийной автоматики. Другие отличия связаны с увеличением портов Ethernet: 2 порта для поддержки шины процесса IEC 61850-9-2LE и 2 порта для поддержки протоколов IEEE C37.118.2 и/или IEC 61870-90-5, IEC 60870-5-104.

В 2013 году специалисты ЗАО "Инженерный центр" Энергосервис приступили к разработке многофункционального устройства нового поколения ESM с поддержкой шины процесса и шины подстанции. В ESM в настоящее время реализованы функции устройства синхронизированных векторных измерений, многофункционального измерительного преобразователя телемеханики, счетчика коммерческого учета электроэнергии и прибора измерения показателей качества электроэнергии и (рис.5).

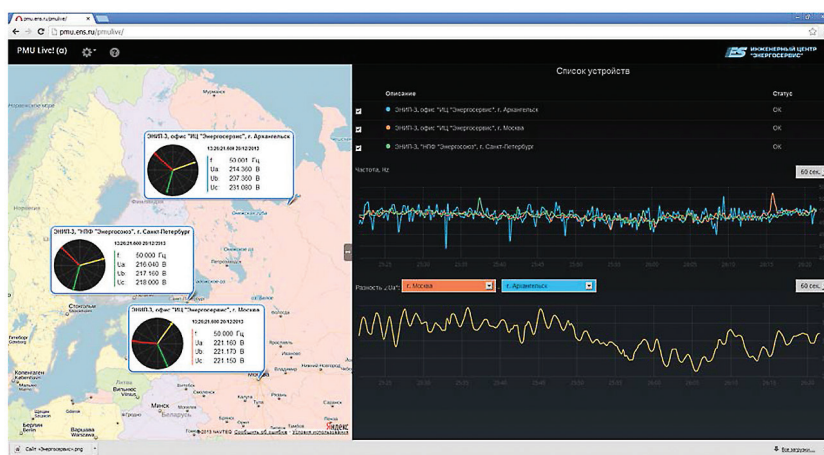
Для индикации показаний ESM разработан специальный модуль индикации ЭНМИ-6. В случае раздельной установки ESM и ЭНМИ-6 предусматривается как стандартный способ подключения ЭНМИ-6 к устройству ESM с помощью

PMU по метке времени UTC, передачу клиентским устройствам (вышестоящим РДС или автоматизированным системам обработки данных векторных измерений) пакетов объединяющих данные от нескольких PMU по протоколу согласно IEEE C37.118.2. В качестве УСВИ могут быть использованы многофункциональные преобразователи ЭНИП-3 или устройства других производителей.

РДС может осуществлять расчет следующих дополнительных параметров: мощности, средних и суммарных величин, пересчет величин с учетом коэффициентов трансформации, расчет симметричных составляющих токов, напряжений, мощностей и т.д.

ES-PDC обеспечивает регистрацию и хранение в архивах всех принятых пакетов данных от РМУ для предотвращения потери данных в результате сбоя исходящей линии связи. Данные от РМУ хранятся в циклических архивах внутренней базы данных с настраиваемой глубиной. В аварийных режимах ES-PDC дополнительно обеспечивает запись архивов аварийных событий. По наступлению настраиваемых событий (уставки, триггеры) производит запись

Рис. 6. Онлайн-трансляция векторных измерений.



интерфейса RS-485, так и подключение по локальной сети Ethernet. Модуль индикации ЭНМИ-6 в перспективе может использоваться как автономное устройство для отображения параметров устройств в рамках цифровой подстанции (подписка на GOOSE-сообщения, MMS-сообщения).

КОНЦЕНТРАТОР ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ES-PDC

ES-PDC выполняет функции концентратора данных векторных измерений (Phasor Data Concentrator, PDC), в том числе функции по сбору данных от устройств синхронизированных векторных измерений по протоколу IEEE C37.118.2 или других концентраторов векторных измерений, агрегацию данных векторных измерений от нескольких

полученных данных в аварийный архив (comtrade- и CSV-файлы). Доступ к архивным данным предоставляет по протоколам FTP, HTTPS/SOAP.

В концентраторе данных векторных измерений ES-PDC предусмотрена удобная система конфигурирования через Web-интерфейс, позволяющая настроить потоки данных, архивирование, вычисление дополнительных величин, контроль доступа, настройки входных и выходных потоков данных. Предусмотрена возможность установки панели индикации (на базе устройства ЭНМИ-6) с выводом диагностической информации о работе ES-PDC и опрашиваемых УСВИ.

Поддержка различных способов резервирования данных: на уровне дисковых накопителей внутри одного РДС, резерв

вирование каналов связи внутри одного PDC, резервирование каналов связи между двумя PDC, резервирование данных между PDC.

ES-PDC для обеспечения резервирования питания могут оборудоваться двумя встроенными источниками питания для подключения к двум независимым источникам питания на объекте.

ДЕМОНСТРАЦИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СИСТЕМЫ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для демонстрации возможностей ЭНИП-2 специалистами ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис» разработан специальный ресурс pmu.ens.ru/pmulative. На сайте в реальном времени отображаются данные с устройств векторных измерений, подключенных к энергосистеме в различных географических точках России: Архангельске, Москве, Санкт-Петербурге, Новосибирске. Результаты векторных измерений предоставляются в удобном графическом виде: расположение устройств на карте с привязкой к реальным координатам, векторные диаграммы, сводный график частоты, график относительных углов. Сайт разработан с помощью технологии HTML-5 и готов для просмотра на всех платформах, в том числе и на мобильных устройствах. По протоколу FTP доступен архив с данными от устройств ЭНИП-2 в виде сжатых CSV файлов в формате ZIP.

ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В начале 2014 года введен в работу программно-технический комплекс СМРР подстанции 500 кВ Елабуга. Устройства синхронизированных векторных измерений ЭНИП-3 установлены на линиях электропередачи 500 кВ Нижнекамская ГЭС – Елабуга и Елабуга – Удмуртская.

Передача данных векторных измерений с ES-PDC производится в диспетчерский центр ОАО «СО ЕЭС – ОДУ» Средней Волги в режиме реального времени по протоколу IEEE C37.118 с циклом передачи данных с концентратора векторных данных 50 раз/сек. В режиме «по запросу» по протоколам FTP, HTTPS/SOAP предусмотрена возможность передачи всего объема зарегистрированных параметров (циклических и аварийных архивов).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний устройств синхронизированных векторных измерений ЭНИП-3 подтвердили соответствие данных устройств стандарту IEEE C37.118.1-2011. Дополнительные испытания на основе «воспроизведения» осциллограмм реальных аварий в энергосистемах и аномальных режимов, а также испытания на электродинамической модели ОАО «НТЦ ЕЭС» подтвердили эффективность использования ЭНИП-3 для по-

строения систем мониторинга переходных режимов (WAMS).

Использование новых разработок ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис», в том числе ENMU, ESM и ЭНИП-4, позволяет использовать данные устройства в территориально-распределенных системах измерений, защиты и управления (WAMPAC).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков А.В., Сацук Е.И., Дубинин Д.М. Развитие технологий мониторинга и управления в ЕЭС России на базе системы мониторинга переходных режимов // Сб. межд. научно-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Екатеринбург, 2013.
2. Hector J. Altuve Ferrer, Edmund O. Schweitzer, III et al. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems / SEL, 2010.
3. Бovyкин В.Н., Миклашевич А.В., Мокеев А.В., Ульянов Д. Н. Устройства синхронизированных векторных измерений с поддержкой стандартов IEEE C37.118 и IEC 61850 // Сб. межд. научно-техн. конф. «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем». – Екатеринбург, 2013.
4. Бovyкин В.Н., Мокеев А.В. Доступные решения для цифровой подстанции // А&Т. - 2013. - № 3. - С. 2-6.
5. Мокеев А.В. Алгоритмы обработки сигналов ИЗУ на основе технологии векторных измерений / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. М., 2011.
6. Marquez F.P.G., Mokeev A.V., Zaman N. and etc. Digital Filters and Signal Processing. Rijeka, InTech, 2013. 307 p.
7. Mokeev, A.V. Optimal filter synthesis // IEEE International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON-2013. – Krasnoyarsk, 2013. – Pp. 1-4.



ОБ АВТОРАХ

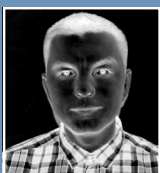
Бovyкин Владимир Николаевич окончил Архангельский государственный технический университет в 2000 году по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий», выпускник Президентской программы. В ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис» работает с 1999 года, заместитель директора Энергетического департамента, начальник управления производством и сбыта микропроцессорных устройств.



Мокеев А. В. родился в 1958 году в Архангельской области. Закончил в 1982 году Ленинградский политехнический институт (ныне НИУ С.-Петербургский государственный политехнический университет) в 1982. Защитил кандидатскую диссертацию в ЛПИ в 1986 году, докторскую диссертацию в 2011 году. Заместитель генерального директора ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис», доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Северного (Арктического) федерального университета.



Миклашевич Алексей Викторович окончил Архангельский государственный технический университет в 2001 году по специальности «Электроснабжение промышленных предприятий». В ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис» работает с 2000 года, начальник отдела разработки микропроцессорных устройств.



Родионов Андрей Вячеславович окончил Поморский государственный университет им. М. В. Ломоносова в 2010 году по специальности «Прикладная информатика». В ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис» работает с 2010 года, инженер-программист отдела разработки микропроцессорных устройств.