

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ, ИСПЫТАНИЙ И ВНЕДРЕНИЯ УСТРОЙСТВ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А.В. Мокеев

Введение

Успешное внедрение автоматизированных систем мониторинга переходных режимов WAMS (Wide Area Measurement Systems) на основе устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) или Phasor Measurement Unit (PMU), предопределило перспективность использования указанных устройств 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. Применение данного класса интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) позволяет реализовать принципиально новые алгоритмы противоаварийного управления и управления нормальными режимами энергосистем [1,2].

В докладе рассматриваются вопросы разработки, испытаний и внедрения интеллектуальных электронных устройств с поддержкой технологии векторных измерений IEEE C37.118 и цифровой подстанции IEC 61850.

Особенности разработки УСВИ

Современные УСВИ должны обеспечивать быстрые и точные синхронные измерения, обладать высокой степенью достоверности контроля параметров режима энергосистемы в условиях интенсивных электромагнитных и электромеханических переходных процессов.

Стандарт IEEE C37.118.1-2011 ориентирован на применение устройств синхронизированных векторных измерений для WAMS и не отражает специфических требований к ИЭУ для выполнения функций WAMPAC, прежде всего связанных с необходимостью обеспечения требуемого качества обработки при нестационарных входных сигналах и необходимостью более высокого темпа передачи данных, а также с необходимостью обеспечения достоверности измерений в режимах, сопровождающихся резким изменением амплитуды или фазы тока (напряжения) основной гармоники.

При разработке алгоритмов обработки сигналов современных ИЭУ для WAMPAC необходимо учитывать нестационарный характер контролируемых процессов и обеспечить выполнение требований к показателям качества обработки сигналов при различных сочетаниях параметров принужденных и свободных составляющих токов и напряжений контролируемого энергообъекта.

Устройство синхронизированный векторных измерений ЭНИП-3

Специалистами ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис» разработаны две основные модификации устройств синхронизированный векторных измерений ЭНИП-3: с аналоговыми входами и с цифровыми входами ЭНИП-3-0 согласно IEC 61850-9-2LE. Передача векторных измерений производится от 10 до 400 раз в секунду при использовании протоколов IEEE C37.118.2 и IEC 60870-5-104. 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.

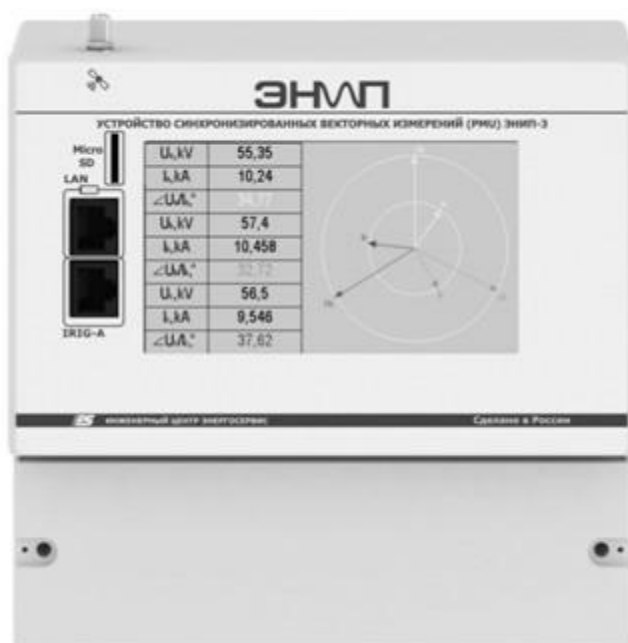


Рисунок 1. Интеллектуальное электронное устройство ЭНИП-3

При разработке ЭНИП-3 были учтены требования стандарта IEEE C37.118.1 и нестационарный характер входных сигналов. Устройства синхронизированный векторных измерений ЭНИП-3 отстроены от помех в виде свободных составляющих электромагнитных переходных процессов и высших гармоник, обеспечивают 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 изменении нагрузки, вследствие работы АРВ и иных устройств автоматики энергосистем [3-7].

Для более точной оценки комплексной амплитуды основной гармоники и ее частоты в условиях интенсивных электромеханических и электромагнитных переходных процессов в ЭНИП-3-0 используется модернизированный вариант алгоритма обработки сигналов IEEE C37.118.1 и предусмотрена возможность выбора временных окон усредняющих КИХ-

фильтров. В том числе временных окон, рекомендуемых стандартом IEEE C37.118.1, а также временных окон, разработанных с помощью специально разработанного метода синтеза фильтров, основанного на спектральных представлениях преобразования Лапласа и многокритериальной оптимизации с ограничениями [3-7].

Разработанный 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. При этом временные окна могут быть синтезированы под конкретную область применения с целью обеспечения заданного качества обработки сигналов при заданных диапазонах изменения параметров полезного сигнала и помехи [3,6].

Стоимость базовой модификации ЭНИП-3 сопоставима со стоимостью обычных многофункциональных измерительных преобразователей телемеханики. Это во многом связано с применением в ЭНИП-3 специально разработанных "быстрых" алгоритмов КИХ-фильтров, благодаря которым существенно снижаются требования к вычислительной мощности микропроцессора.

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 IEEE C37.118.1-2011 временные окна усредняющих КИХ-фильтров не обеспечивают эффективное подавление свободных составляющих электромагнитных переходных процессов [3,6]. Для применения в энергосистемах Российской Федерации согласно требований Системного оператора предусмотрены дополнительные испытания ИЭУ на основе осциллограмм реальных аварий в энергосистемах и аномальных режимов или испытания на электродинамической модели ОАО "НТЦ ЕЭС" [8].

Новые разработки

В настоящее время разработаны опытные образцы интеллектуальных электронных устройств нового поколения с поддержкой стандартов цифровой подстанции и технологии векторных измерений: объединяющее устройство (Merging Unit), устройства синхронизированных векторных измерений, контроллер выключателя и контроллер присоединения.

Все устройства имеют модульную конструкцию. Так объединяющее устройство ENMU (рис.2) состоит из модуля тока, модуля напряжения, процессорного модуля и модуля питания. При этом возможна реализация как комбинированного объединяющего устройства ENMU с модулями и напряжения, так и отдельная реализация - только с модулем тока или только с модулем напряжения. Для реализации SAMU (Stand-Alone Merging Unit)

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

Каждый модуль имеет несколько модификаций. Например, процессорный модуль может включать одну или две процессорные платы с различными комбинациями портов Ethernet: 2 порта 100BASE-TX или 2 порта 100BASE-FX, один порт 100BASE-TX и один порт 100BASE-FX. Каждая процессорная плата содержит USB-порт для конфигурирования, порт IRIG-A для синхронизации часов реального времени. Ведется работа по обеспечению синхронизации внутренних часов ENMU-4 при использовании протокола PTP (IEEE 1588).

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 как одновременная передача данных по протоколам IEC 61850-9-2LE и IEEE C37.118.2 как через один порт, так и через разные порты.

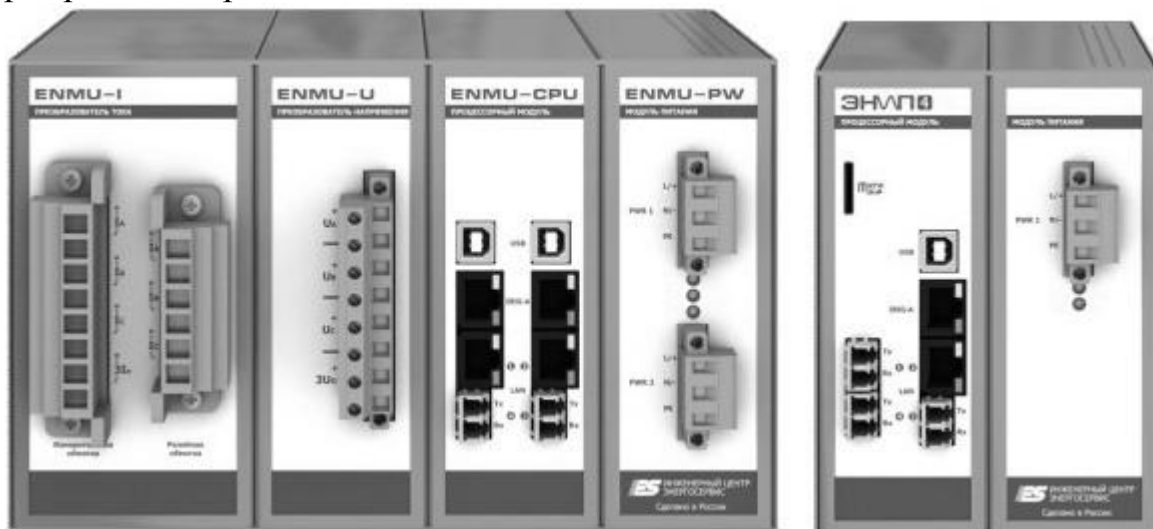


Рисунок 2. Объединяющее устройство ENMU и ЭНИП-4

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

Устройство синхронизированных векторных измерений ЭНИП-4 представляет собой усовершенствованный вариант устройства ЭНИП-3-0. Принципиальное отличие 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 два порта для поддержки IEEE C37.118.2 и/или IEC 61870-90-5, IEC 60870-5-104.

Испытания ЭНИП-3

В 2012 году специалистами ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис» совместно с сотрудниками исследовательской лаборатории технических средств управления ОАО «Энергосетьпроект» проведены испытания ЭНИП-3 и ЭНИП-3-0. 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-3 и ЭНИП-3-0 использовалось следующее оборудование: испытательные установки «УППУ-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 на компьютере с установленным специализированным программным обеспечением.

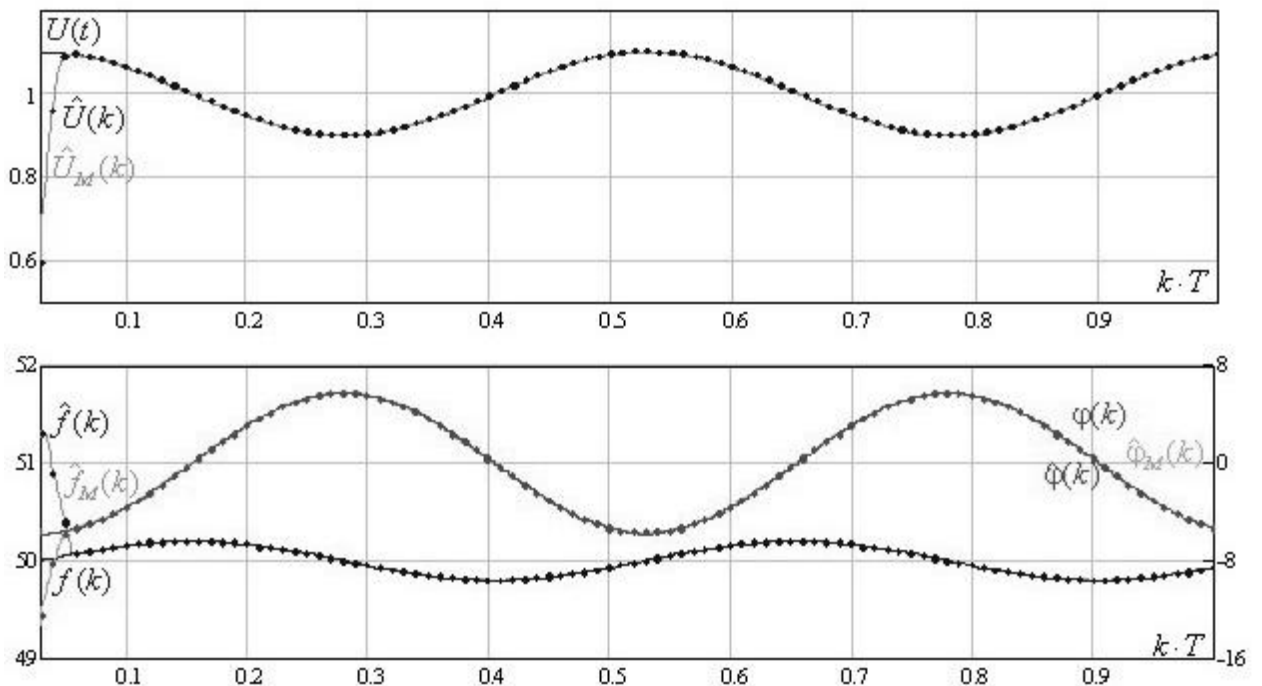


Рисунок 3. Испытания ЭНИП-3 (Dynamic compliance – measurement bandwidth)

На рис. 3 представлены результаты испытаний ЭНИП-3-0 по первому тесту стандарта IEEE C37.118.1 (Dynamic compliance – measurement bandwidth). На графике показаны относительное значение огибающей $U(k)$, частота $f(k)$ и начальная фаза $\varphi(k)$ 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-3-0. Передача векторных измерений производится 100 раз в секунду.

На основании результатов, полученных в результате математического моделирования работы и испытаний ЭНИП-3 и ЭНИП-3-0 произведен сравнительный анализ полученных результатов. Результаты испытаний показали очень точное совпадение результатов математического моделирования функционирования ЭНИП-3 и испытаний ЭНИП-3-0. Результаты испытаний подтвердили соответствие ЭНИП-3 по статистическим характеристикам и динамическим характеристикам согласно IEEE C37.118.1-2011.

На рис.4 представлены результаты испытаний ЭНИП-3-0 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-3-0.

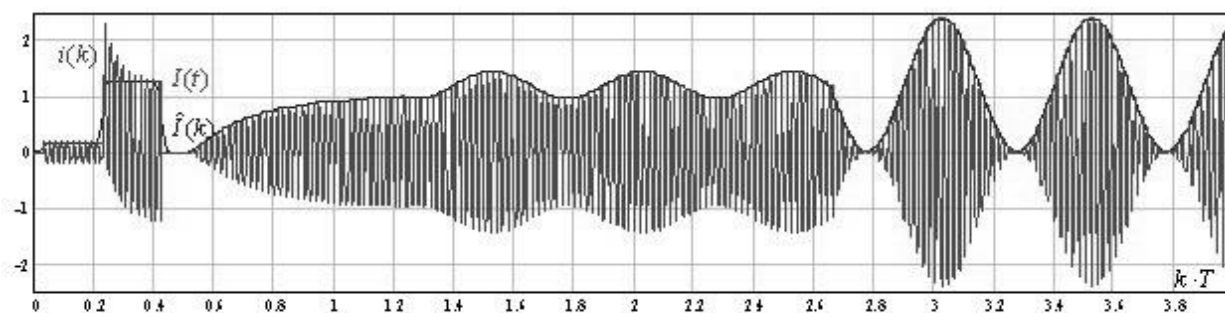


Рисунок 4. График измерения амплитуды тока в ЭНИП-3

Как следует из рис.4, 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.

Испытания ЭНИП-3-0, произведенные при использовании испытательной установки РЕТОМ-61850, выявили очень точное совпадение с результатами математического моделирования ЭНИП-3 при подаче на его вход сигналов, соответствующих реальным авариям в энергосистемах и сигналов, соответствующих электромагнитным и электромеханическим

процессам с известными законами изменения амплитуды, частоты и фазы основной гармоники тока и напряжения.

В декабре 2012 г. на цифро-аналого-физическом комплексе ОАО «НТЦ ЕЭС» проходили сравнительные испытания нескольких образцов векторных измерителей параметров электрического режима, разработанных российскими производителями. На основании результатов 26 обязательных и ряда дополнительных опытов, с учетом задач, возлагаемых на систему мониторинга переходных режимов, ОАО "НТЦ ЕЭС" подтвердило, что в качестве векторных измерителей могут использоваться устройства ЭНИП-3 производства ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис».

На рис.5 представлены результаты опыта под номером 19 [8]. В данном опыте моделировалась автономная работа энергосистемы при отключении двух генераторов ГРЭС.

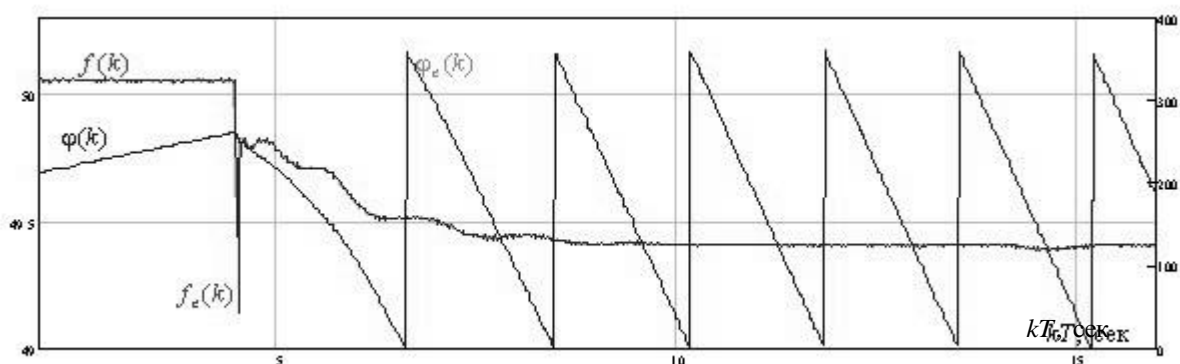


Рисунок 5. Результаты испытаний ЭНИП-3

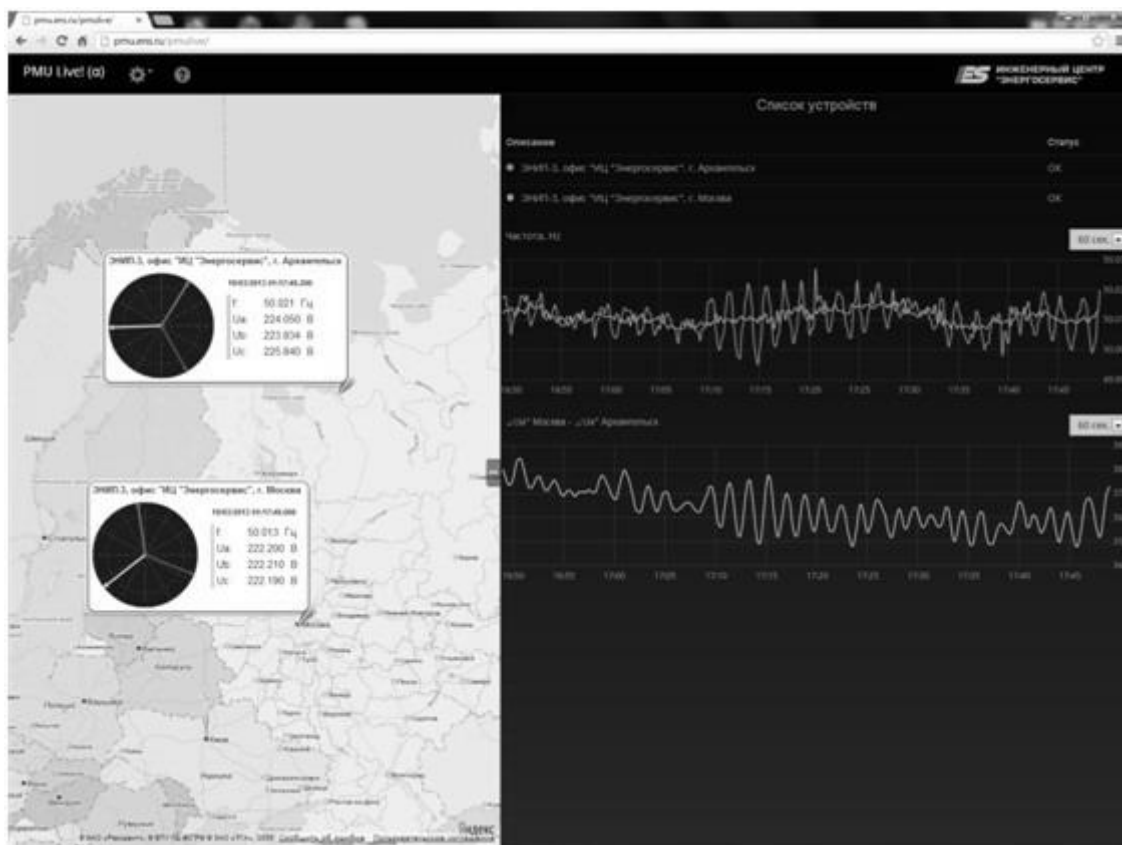


Рисунок 6. Демонстрация возможностей ЭНИП-3

Как следует из рис. 5, измерение частоты $f(k)$ и начальной фазы $\varphi(k)$ в ЭНИП-3 практически не отличаются от эталонного УСВИ: $f_e(k)$ и $\varphi_e(k)$.

Интернет-доступ к результатам векторных измерений

Для демонстрации возможностей ЭНИП-3 специалистами ЗАО «Инженерный центр «Энергосервис» разработан специальный ресурс pmu.ens/pmulive.

С помощью интернет-технологий организован доступ к результатам измерений двух устройств ЭНИП-3, установленных в офисах фирмы в г.Архангельске и г.Москва (рис.6). Обновление результатов измерений производится чаще, чем раз в секунду. Через ftp-сервер обеспечивается доступ к архивным файлам векторных измерений (дискретность измерений 50 раз/сек).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков А.В., Демчук А.Т., Дубинин Д.М.. Развитие технологий векторной регистрации параметров для противоаварийного и режимного управления электрическими режимами энергосистем / РЗА 2012 // Тез. докл. XXI междунар. науч.-техн. конф.М., ВВЦ, 2012. С. 232-245.
2. Наровлянский В.Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы М., Энергоатомиздат, 2004. 360 с.
3. Мокеев А.В. Алгоритмы обработки сигналов ИЭУ на основе технологии векторных измерений / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем // Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. М., 2011.
4. Ванин В.К., Мокеев А.В., Попов М.Г. Аналоговые и цифровые фильтры в измерительных устройствах и устройствах автоматики энергосистем. СПб., Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 196 с.
5. Mokeev A.V. Spectral expansion in coordinates of complex frequency application to analysis and synthesis filters / SMMSP 2007 // TICSP Report 37. Tampere, 2007. P. 159-167.
6. Hessling J.P., Márquez F.P.G., Mokeev A.V. and etc. Digital Filters. Rijeka, InTech, 2011. 290 p.
7. Márquez F.P.G., Mokeev A.V., Zaman N. and etc. Digital Filters and Signal Processing. Rijeka, InTech, 2013. 307 p.
8. Жуков А.В., Куликов Ю.А., Герасимов А.С., Есипович А.Х. Программа динамических испытаний цифровых регистраторов системы мониторинга в тестовой схеме физической модели энергосистемы / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем - 2011 // Сб. мат. межд. науч.-техн. конф.СПб, 2011.