

Устройства синхронизированных векторных измерений с поддержкой стандартов IEEE C37.118 и IEC 61850

А.В. МОКЕЕВ

**Северный (Арктический) федеральный университет,
В.Н. БОВЫКИН, А.В. МИКЛАШЕВИЧ, Д.Н. УЛЬЯНОВ**

ЗАО “Инженерный центр ”Энергосервис”

Россия

a.mokeyev@ens.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Устройства синхронизированных векторных измерений, интеллектуальные электронные устройства, режимная и противоаварийная автоматика, алгоритмы обработки сигналов, цифровые фильтры.

1 ВВЕДЕНИЕ

Совершенствование управления энергосистемами напрямую связано с повышением темпов сбора и качества технологической информации для автоматизированных систем управления, широким применением интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) нового поколения, к которым предъявляются повышенные требования по основным показателям качества обработки сигналов.

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. В максимальной степени соответствуют перечисленным требованиям устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ) или Phasor Measurement Unit (PMU). Подобные устройства в последние годы наряду с традиционной областью применения – системы 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. Применение данного класса ИЭУ позволяет реализовать принципиально новые алгоритмы противоаварийного управления и управления нормальными режимами энергосистем [1-4].

При использовании УСВИ точность синхронизации времени составляет несколько микросекунд и на основе измерений комплексных амплитуд токов и напряжений основной гармоники другие параметры режима энергосистемы могут быть вычислены в других устройствах, в том числе могут быть вычислены параметры 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 [1,4].

В докладе рассматриваются вопросы разработки и испытаний ИЭУ с поддержкой технологии векторных измерений IEEE C37.118 и цифровой подстанции IEC 61850.

2 ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ УСТРОЙСТВО ЭНИП-3

Интеллектуальные электронные устройства ЭНИП-3 с функциями векторных измерений разработаны на базе многофункциональных измерительных преобразователей ЭНИП-2.

Разработаны две основные модификации нового устройства: с аналоговыми входами (ЭНИП-3) и с цифровыми входами согласно IEC 61850-9-2LE (ЭНИП-3-0).

Для передачи данных предусмотрено использование следующих протоколов: IEEE C37.118.2, IEC 60870-5-104 и IEC 61850-90-5 (в разработке). Передача векторных измерений производится 10, 25, 50, 100, 200, 400 раз в секунду. Точность синхронизации встроенных часов реального времени составляет 1 мкс.

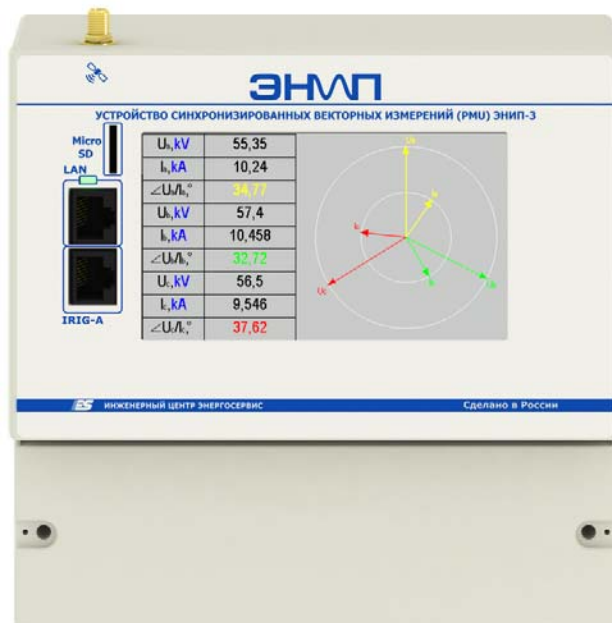


Рис. 1: Интеллектуальное электронное устройство ЭНИП-3

Опционально ЭНИП-3 содержит встроенный GPS/ГЛОНАСС-приемник, регистратор переходных режимов, ftp-сервер для доступа к архивным данным, 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 [5], так и нестационарный характер входных сигналов ИЭУ – устройство отстроено от помех в виде свободных составляющих электромагнитных переходных процессов и высших гармоник, 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 изменении нагрузки, вследствие работы АРВ и иных устройств автоматики энергосистем [6-10].

Для более точной оценки комплексной амплитуды основной гармоники и ее частоты в условиях интенсивных электромеханических и электромагнитных переходных процессов в ЭНИП-3 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. 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 [6,9].

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 [6,9]. Ряд других противоречий

стандарта отмечены в работе [11]. 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 "НТЦ ЕЭС" [12].

3 ИСПЫТАНИЯ ЭНИП-3

3.1 Испытания ЭНИП-3 на соответствие стандарту IEEE C37.118.1

В марте 2012 года в 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 компьютере с установленным специализированным программным обеспечением.

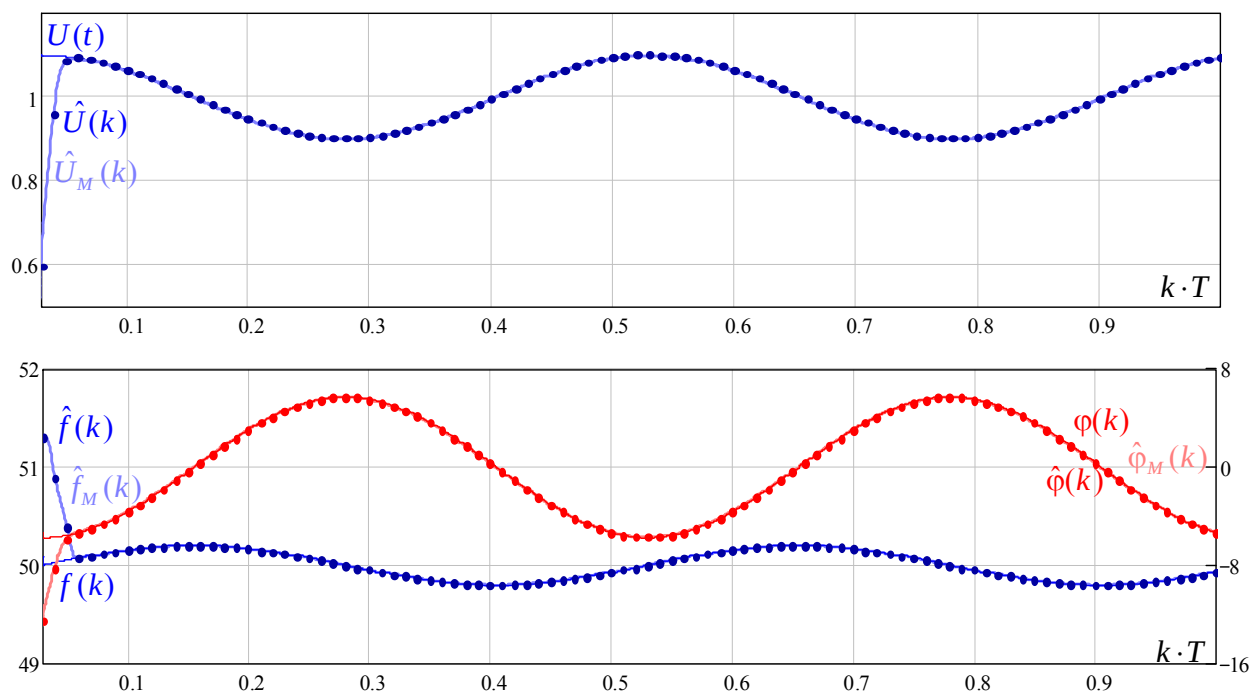


Рис. 2: Испытания ЭНИП-3 (Dynamic compliance – measurement bandwidth)

На рис. 2 представлены результаты испытаний ЭНИП-3-0 при использовании первого испытания стандарта IEEE C37.118.1 (Dynamic compliance – measurement bandwidth). На графике показаны относительное значение огибающей $U(k)$, частота $f(k)$ и начальная фаза $\phi(k)$ 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-3-0. Передача векторных измерений производится 100 раз в секунду.

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

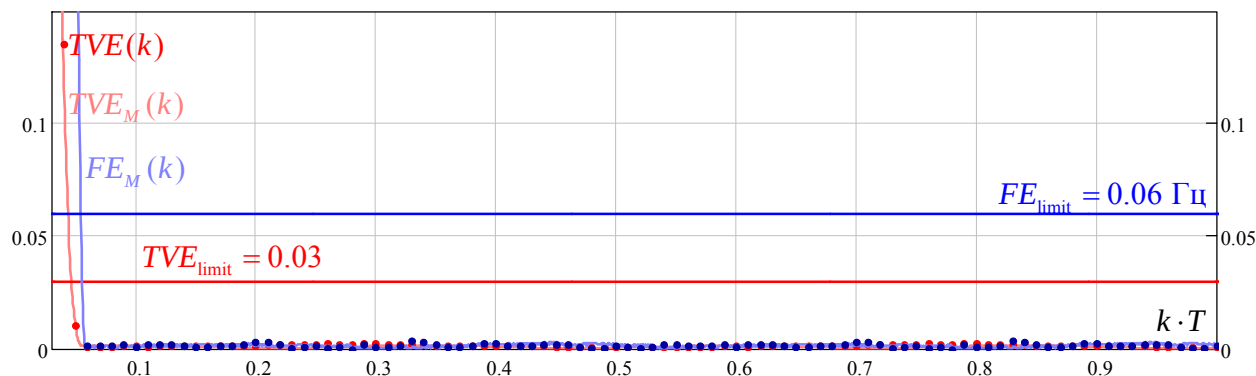


Рис. 3: Графики TVE и FE

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.

3.2 Испытания ЭНИП-3 при использовании comtrade-файлов

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-3Ц.

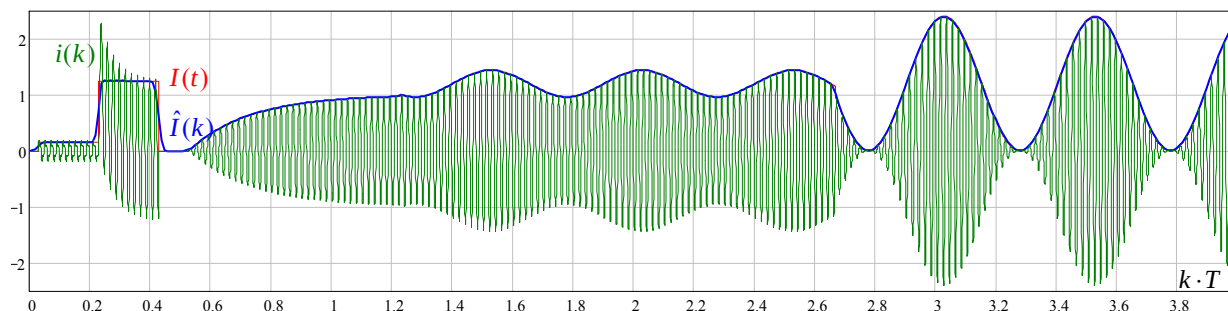


Рис. 4: График измерения амплитуды тока в ЭНИП-3

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.

При использовании испытательной установки РЕТОМ-61850 полученные от устройства ЭНИП-3-0 данные имеют очень точное совпадение с результатами математического моделирования ЭНИП-3 при подаче на его вход сигналов, соответствующим реальным авариям в энергосистемах и сигналов, соответствующих электромагнитным и электромеханическим процессам с известными законами изменения амплитуды, частоты и фазы основной гармоники тока и напряжения.

3.3 Сравнительные испытания ЭНИП-3 на ЦАФК

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 [12]. В данном опыте моделировалась автономная работа энергосистемы при отключении двух генераторов ГРЭС.

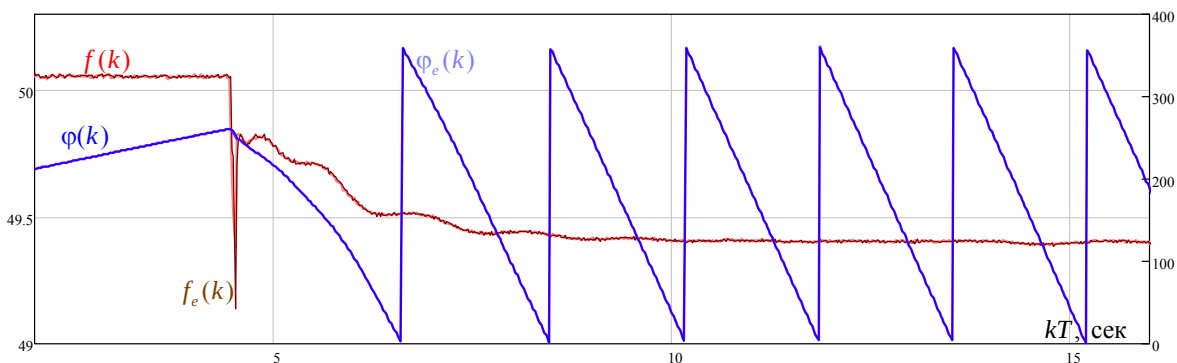


Рис. 5: Результаты испытаний ЭНИП-3

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 $\varphi_e(k)$.

4 ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ УСВИ ДЛЯ WAMPAC

Стандарт IEEE C37.118.1-2011 [5] 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.

При разработке УСВИ специалистами ЗАО "Инженерный центр "Энергосервис" используются робастные и адаптивные алгоритмы обработки сигналов [6,9]. 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 алгоритмов обработки сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем позволяет реализовать устройства с максимально возможным быстродействием.

Особое внимание при разработке УСВИ было уделено вопросам синтеза "быстрых" алгоритмов реализации цифровых КИХ-фильтров, реализация которых позволяет существенно снизить объем вычислений, а следовательно, и стоимость устройств синхронизированных векторных измерений.

5 НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ

В 2012 году специалистами ЗАО "Инженерный центр "Энергосервис" завершен основной объем работ по разработке 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.6) 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 раздельная реализация - только с модулем тока или только с модулем напряжения.

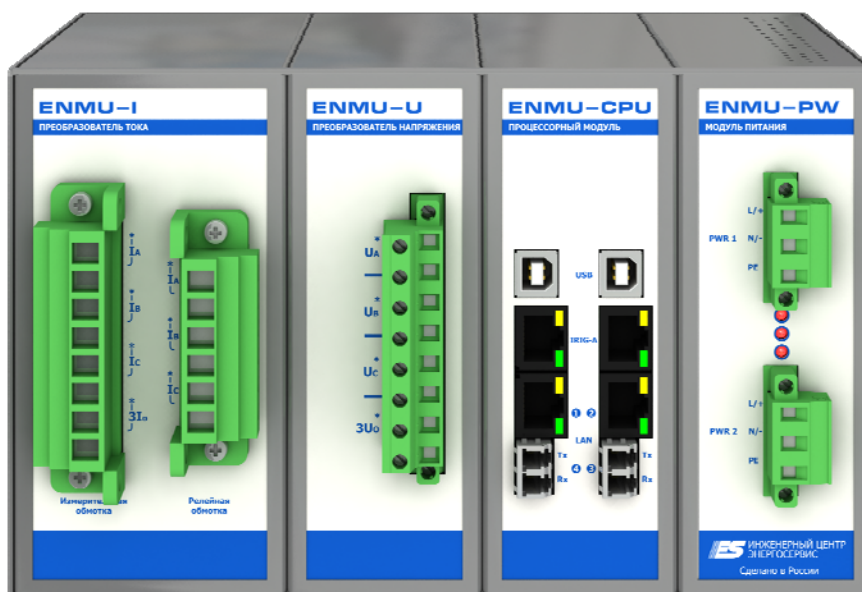


Рис. 6: объединяющее устройство ENMU

Каждый модуль имеет несколько модификаций. Например, процессорный модуль может включать одну или две процессорные платы (до 2-х микропроцессоров на каждой плате), каждая процессорная плата может включать различные комбинации портов Ethernet: 2 порта 100BASE-TX или 2 порта 100BASE-FX, один порт 100BASE-TX и один порт 2 порта 100BASE-FX. Опционально процессорный модуль может включать встроенный GPS-приемник и регистратор событий и процессов. Каждая процессорная плата содержит USB-порт для конфигурирования, порт IRTG-A для синхронизации часов реального времени и два порта Ethernet. Ведется работа по обеспечению синхронизации внутренних часов ENMU-4 при использовании протокола PTP (IEEE 1588). Модули питания предусматривают подключение к одному или двум источникам оперативного тока.

Необходимость в разработке различных модификаций модулей тока и модулей напряжения связана как с реализацией устройств сопряжения MU (Merging Unit), например, при использовании оптических датчиков тока или датчиков тока с использованием тора Роговского, емкостных или резистивных датчиков напряжения, так и для реализации специальной разновидности объединяющих устройств – SAMU (Stand-Alone Merging Unit), подключаемых к традиционным трансформаторам тока и напряжения. Отдельные модификации модулей тока и напряжения для SAMU разрабатываются для применения в распредустройствах 110 кВ и выше и связаны с необходимостью подключения одновременно к двум трансформаторам тока (напряжения).

Для реализации SAMU при конфигурировании ENMU задаются следующие возможные режимы работы: формирование раздельных или совмещенного потоков данных (от релейной и

измерительной обмоток трансформатора тока) для samples values и для векторных измерений.

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.

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.

На рис.7 приведена структурная схема цифровой подстанции с использованием интеллектуальных электронных устройств нового поколения.

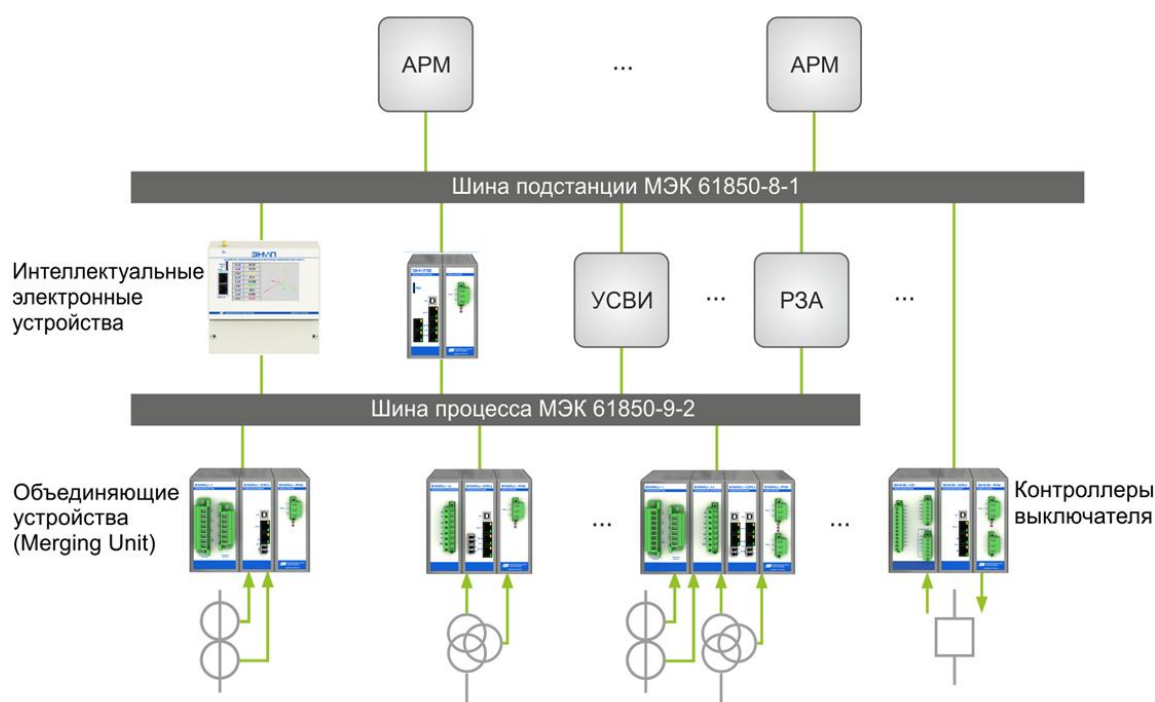


Рис. 7: Интеллектуальные электронные устройства

На структурной схеме рис.7 шина процесса и шина подстанции указаны условно. Может применяться различная топология сети и при необходимости использоваться разные протоколы резервирования (PRP или HSR) или специальные коммуникационные адаптеры для сетей с резервированием RedBox (Redundancy Box).

Контроллер выключателя разработан на основе серийно производимых устройств серии ЭНМВ. Контроллер присоединения ENMU-C включает модули всех перечисленных устройств и выполняет так же функции объединяющего устройства (Merging Unit) и устройства синхронизированных векторных измерений. Для присоединений 6-35 кВ в ENMU-C предусмотрена реализация функций релейной защиты и автоматики.

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.

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты испытаний устройств синхронизированных векторных измерений ЭНИП-3 подтвердили соответствие ЭНИП-3 по статистическим и динамическим характеристикам стандарту IEEE C37.118.1-2011. Дополнительные испытания ИЭУ 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 построения систем мониторинга переходных режимов (WAMS).

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

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Héctor J. Altuve Ferrer, Edmund O. Schweitzer, III et al. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems / SEL, 2010.
- [2] А.В. Жуков, А.Т. Демчук, Д.М. Дубинин. 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.
- [3] Наровлянский В.Г. Современные методы и средства предотвращения асинхронного режима электроэнергетической системы М., Энергоатомиздат, 2004. 360 с.
- [4] Небера А.А. Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем - 2011 // Сб. мат. межд. науч.-техн. конф., СПб, 2011.
- [5] IEEE C37.118.1-2011 // Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Hessling J.P., Márquez F.P.G., Mokeev A.V. and etc. Digital Filters. Rijeka, InTech, 2011. 290 p.
- [10] Márquez F.P.G., Mokeev A.V., Zaman N. and etc. Digital Filters and Signal Processing. Rijeka, InTech, 2013. 307 p.
- [11] Покидышев А.Н., Казаков П.Н. Анализ требований стандарта C37.118 / Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем - 2011 // Сб. мат. межд. науч.-техн. конф. СПб, 2011.
- [12] 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.