

## Повышение надежности и эффективности работы энергосистем на основе технологии синхронизированных векторных измерений<sup>1</sup>

МОКЕЕВ А.В.

*Опыт внедрения автоматизированных систем мониторинга переходных режимов (СМПР) на основе применения устройств синхронизированных векторных измерений доказал эффективность использования СМПР для повышения надежности энергосистемы. Рассматриваются вопросы повышения надежности и эффективности функционирования энергосистем за счет широкого внедрения интеллектуальных электронных устройств различного функционального назначения с поддержкой технологии синхронизированных векторных измерений. При разработке подобных устройств важную роль приобретают вопросы анализа функционирования интеллектуальных электронных устройств в условиях электромагнитных и электромеханических переходных процессов и вопросы синтеза цифровых фильтров, обеспечивающих улучшение статических и динамических характеристик указанных устройств.*

**Ключевые слова:** энергосистема, надежность, мониторинг, векторные измерения, алгоритмы обработки сигналов, цифровые фильтры

Опыт внедрения автоматизированных систем мониторинга переходных режимов (СМПР) на основе применения устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ) доказал эффективность использования СМПР для повышения надежности энергосистемы [1, 2]. В последние годы интеллектуальные системы на основе технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ) стали использоваться для решения и других задач, связанных с повышением надежности и эффективности функционирования энергосистем [3, 4]. Так, применение интеллектуальных электронных устройств (ИЭУ) с поддержкой технологии векторных измерений позволяет значительно улучшить оценку состояния энергосистем [5–9]. Перспективными областями применения указанных ИЭУ являются АСУ ТП подстанций, WACS, WAPS, WAMPACS и активно-адаптивные сети.

К ИЭУ, применяемым в WAPS и WAMPACS, по сравнению с УСВИ 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. Это требует проведения дополнительных тестовых испытаний наряду с испытаниями, предусмотренными стандартами [10, 11]. Наряду с испытаниями следу-

ет активнее использовать математическое моделирование как более доступный способ анализа функционирования ИЭУ в различных режимах работы энергосистем.

Расширение сферы применения ИЭУ с поддержкой технологии СВИ напрямую связано с совершенствованием алгоритмов обработки сигналов для улучшения основных показателей качества ИЭУ, например, быстродействия и точности обработки сигналов. Это требует наряду с использованием эффективных методов анализа функционирования ИЭУ разработки новых методов синтеза цифровых фильтров, которые в большинстве устройств определяют статические и динамические погрешности измерений синхронизированных векторов (синхровекторов) тока и напряжения.

**Анализ УСВИ.** При типовом алгоритме обработки сигналов согласно стандарту IEEE C37.118.1 над входным сигналом УСВИ проводятся две основные операции:

преобразование спектра сигнала за счет его перемножения на комплексную экспоненциальную функцию с последующей фильтрацией сигнала с помощью усредняющего фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтра). Анализ функционирования УСВИ в этом случае сводится к анализу фильтров, и поэтому актуальной задачей является разработка эффективных экспресс-методов анализа частотных фильтров.

В настоящее время методы экспресс-анализа функционирования УСВИ широко применяются только при входных синусоидальных сигналах на

<sup>1</sup> По материалам доклада, представленного на заседании Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Кыргызстан, сентябрь 2017 г.).

основе использования частотных характеристик фильтров. При этом входные сигналы УСВИ полностью описываются набором комплексных амплитуд и мнимых частот составляющих токов и напряжений. На основе указанных характеристик формируются требования к фильтрам при проектировании УСВИ.

Для входных сигналов, соответствующих электромагнитным и электромеханическим переходным процессам, экспресс-методы анализа находятся в стадии разработки. В статье проводится обобщение работ автора, связанных с разработкой экспресс-методов анализа УСВИ в условиях электромагнитных и электромеханических переходных процессов [12, 13]. Далее рассматриваются методы анализа фильтров для аналоговой системы—прототипа УСВИ, для того чтобы не учитывать погрешности микропроцессорных устройств, связанных с дискретизацией сигнала по времени и по уровню.

**Анализ при сигналах с постоянными параметрами.** Входные сигналы УСВИ часто могут быть описаны совокупностью затухающих колебательных составляющих:

$$x(t) = \text{Re}(\dot{X}^T e^{pt}) = 0,5\dot{X}^T e^{pt} + 0,5\bar{X}^T e^{\bar{p}t}, \quad (1)$$

где  $\dot{X} = [\dot{X}_n]_N = [Xm_n e^{-j\varphi_n}]_N$ ,  $p = [p_n]_N = [-\beta_n + j\omega_n]_N$  — векторы комплексных амплитуд и частот входного сигнала;  $\bar{X}$ ,  $\bar{p}$  — комплексно-сопряженные векторы.

В отличие от традиционного метода комплексных амплитуд сигнал (1) оперирует комплексными частотами. Поэтому сигналами (1) могут быть представлены не только сигналы нормального режима энергосистемы в виде совокупности гармоник, но и сигналы при электромагнитных переходных процессах, например сигнал в виде совокупности синусоидального сигнала и свободных составляющих переходных процессов (экспоненциальных и/или затухающих колебательных составляющих), и в ряде случаев также сигналы УСВИ при некоторых электромеханических переходных процессах, например в случае тестов УСВИ согласно [10] при амплитудной и фазовой модуляции.

Сигнал на входе КИХ-фильтра УСВИ с учетом умножения входного сигнала (1) на комплексную экспоненциальную функцию  $2e^{-j\omega_0 t}$

$$\dot{z}(t) = \dot{X}^T e^{(p-Cj\omega_0)t} + \dot{X}^T e^{(\bar{p}-Cj\omega_0)t} = \dot{Z}^T e^{p_1 t}, \quad (2)$$

где  $\omega_0$  — номинальная частота энергосистемы;  $C = [1]_N$ ,  $\dot{Z} = [\dot{X} \ \bar{X}]$ ;  $p_1 = [p - Cj\omega_0 \ \bar{p} - Cj\omega_0]$ .

Согласно (2) входной сигнал КИХ-фильтра содержит в 2 раза больше компонент, чем входной сигнал УСВИ (1). При этом от полезной компоненты входного сигнала УСВИ (1) промышленной частоты  $\omega_1$  с комплексной амплитудой  $\dot{X}_1$  на входе фильтра будем иметь две компоненты — низкочастотную (постоянную при  $\omega_1 = \omega_0$ ) и составляющую с частотой  $\omega_1 + \omega_0$  ( $2\omega_0$  при  $\omega_1 = \omega_0$ ). Первая составляющая является полезным сигналом, а вторая должна быть подавлена.

Для экспресс-анализа фильтров УСВИ при входных сигналах (1) разработано несколько методов [12], основанных на обобщении метода комплексных амплитуд и использовании расширенных частотных характеристик в координатах комплексной частоты. Рассмотрим метод анализа, основанный на использовании зависимой от времени передаточной функции фильтра:

$$K(p, t) = \int_0^t g(\tau) e^{-p\tau} d\tau, \quad (3)$$

где  $g(t)$  — импульсная функция фильтра.

Выходной сигнал фильтра может быть полностью описан в виде набора зависимых от времени комплексных амплитуд:

$$\dot{Y}(t) = \dot{Z} \circ K(p_1, t), \quad (4)$$

где  $\circ$  — операция умножения векторов.

В каждой зависимой от времени комплексной амплитуде вектора  $\dot{Y}(t)$  заключена информация не только о принужденной, но и о свободной составляющей собственного переходного процесса в фильтре. При  $t \rightarrow \infty$  выражение преобразовывается к виду

$$\dot{Y} = \dot{Z} \circ K(p_1), \quad (5)$$

и вместо набора зависимых от времени комплексных амплитуд  $\dot{Y}(t)$  получим набор комплексных амплитуд  $\dot{Y}$ , соответствующих принужденным составляющим реакции фильтра.

Выходной сигнал КИХ-фильтра, представляющий собой оценку синхровектора, определяется следующим образом:

$$\hat{X}_1(t) = \text{Re}(\dot{Y}(t)^T e^{p_1 t}).$$

На основе (4) и (5) получаем простой аналитический метод экспресс-анализа фильтров с использованием только алгебраических операций над комплексными амплитудами и значениями расши-

ренных частотных характеристик фильтра на комплексных частотах входного сигнала [12].

Экспресс-анализ с учетом влияния собственных переходных процессов в фильтре проводится на базе частотно-временного подхода на основе построения частотных характеристик  $K(p, t)$  в координатах комплексной частоты. В более простых случаях целесообразно применять экспресс-анализ на базе частотных характеристик  $K(p)$  при использовании спектральных представлений преобразования Лапласа.

Рассмотрим экспресс-анализ простейшего усредняющего КИХ-фильтра с прямоугольным временным окном длиной  $T_0 = 20$  мс при входном сигнале УСВИ в виде совокупности синусоидальной составляющей промышленной частоты и свободной аperiodической составляющей переходного процесса в энергосистеме:

$$\dot{X} = [\dot{X}_1 \quad -X_2]; \quad \mathbf{p} = [j\omega_1 \quad -\beta_2].$$

Зададим диапазоны изменения параметров полезного сигнала и экспоненциальной помехи:  $\omega_1 = 2\pi(45 \div 55)$  рад/с;  $\beta_2 = 2 \div 200$  с<sup>-1</sup>;  $X_{2 \max} = |\dot{X}_1|$ .

Входной сигнал фильтра полностью определяется следующим набором комплексных амплитуд и частот:  $\dot{\mathbf{Z}} = [\dot{X}_1 \quad \bar{X}_1 \quad -2X_2]$ ,  $\mathbf{p}_1 = [j(\omega_1 - \omega_0) \quad (\omega_1 + \omega_0) \quad -\beta_2 - j\omega_0]$ .

На рис. 1 представлена трехмерная АЧХ рассматриваемого фильтра при использовании спектральных представлений преобразования Лапласа (график на рис. 1, а).

Рассмотрим два сечения трехмерной АЧХ:  $p = j\omega$  (кривая 1) и  $p = -\beta + j\omega_0$  (кривая 2). Указанные сечения определяют законы изменения трех комплексных амплитуд входных сигналов фильтра: две первые комплексные амплитуды определяют сечение  $p = j\omega$ , а третья комплексная амплитуда – сечение  $p = -\beta + j\omega_0$ . Для упрощения анализа при экс-

поненциальной помехе на входе УСВИ АЧХ умножена на функцию  $e^{-\beta T_0}$ . Множитель  $e^{-\beta T_0}$  при  $\beta \neq 0$  учитывает затухание аperiodических принужденных составляющих к моменту окончания переходного процесса в фильтре. Быстродействие КИХ-фильтра определяется значением  $T_0$  только в том случае, если затухающие компоненты помехи подавлены до уровня допустимой погрешности за время, равное длине фильтра.

Для более детального анализа подавления фильтром составляющей от экспоненциальной помехи построим график функции  $2|K(-\beta + j\omega_0)|e^{-\beta t}$  (рис. 1, б).

Как следует из графиков рис. 1, анализируемый фильтр обладает большими погрешностями оценки синхровектора при отклонении частоты энергосистемы от номинального значения и недостаточно подавляет составляющую от аperiodической помехи, особенно при коэффициентах затухания  $\beta_2 = 20 \div 60$  с<sup>-1</sup>. Так, при допустимой погрешности 5% время подавления фильтром составляющей от экспоненциальной помехи составляет более 50 мс.

Для анализа фильтра с учетом качества собственных переходных процессов в фильтре следует использовать расширенные частотно-временные характеристики фильтра на основе зависимой от времени передаточной функции  $K(p, t)$  [12].

Приведенные графики наглядно демонстрируют эффективность предложенных методов экспресс-анализа УСВИ при входных сигналах в виде совокупности затухающих колебательных составляющих.

#### Анализ при сигналах с переменными параметрами.

Для простоты ограничимся рассмотрением анализа КИХ-фильтров только при одной составляющей входного сигнала УСВИ с переменными параметрами, как это приведено в стандарте [10]:

$$x(t) = \text{Re}(\dot{X}_1(t)e^{j\omega_0 t}) = 0,5\dot{X}_1(t)e^{j\omega_0 t} + 0,5\bar{X}_1(t)e^{-j\omega_0 t}.$$

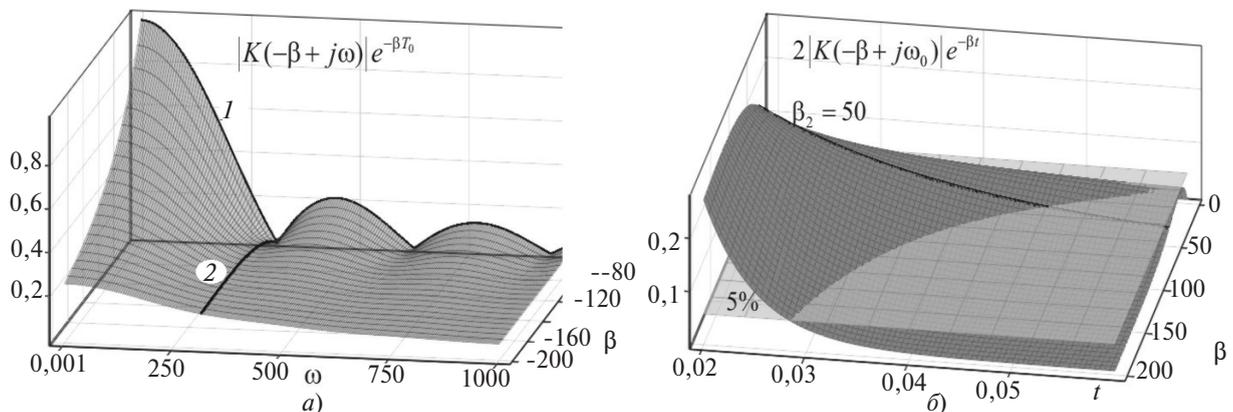


Рис. 1. АЧХ фильтра в координатах комплексной частоты

Тогда сигнал на входе КИХ-фильтра

$$\dot{z}(t) = \dot{X}_1(t) + \bar{X}_1(t)e^{-j2\omega_0 t} = \dot{\mathbf{Z}}^T e^{\mathbf{p}_1 t},$$

где  $\dot{\mathbf{Z}}(t) = [\dot{X}_1(t) \ \bar{X}_1(t)]$ ;  $\mathbf{p}_1 = [0 \ -j2\omega_0]$ .

Для анализа функционирования УСВИ актуально определение комплексных амплитуд как составляющих оценки синхровектора, т.е. использование обобщенных комплексных амплитуд и методов анализа фильтров на случай сигналов с переменными параметрами, соответствующими электромагнитическим процессам в энергосистеме.

Определение комплексных амплитуд для двух составляющих выходного сигнала фильтра может быть проведено на основе предложенной автором зависимости [12]:

$$\dot{\mathbf{Y}}(t) = \int_0^t \dot{\mathbf{Z}}(\tau) \circ K'(\mathbf{p}_1, t-\tau) d\tau,$$

где  $K'(p, t) = \frac{d}{dt} K(p, t)$ .

При  $\dot{\mathbf{Z}}(t) = \dot{\mathbf{Z}}$  выражение для расчета комплексных амплитуд вырождается в зависимость (4).

При определенных допущениях (глубина модуляции сигнала, скорость изменения частоты) комплексные амплитуды могут быть рассчитаны приблизительно с помощью зависимости, близкой к приведенной ранее зависимости (4). Это позволяет использовать рассмотренные ранее методы экспресс-анализа фильтров при входных сигналах УСВИ с переменными параметрами. Необходимо отметить важное преимущество предлагаемых методов анализа, связанное с возможностью формализации требований к частотным характеристикам фильтров в координатах комплексной частоты, что позволяет упростить решение задачи синтеза фильтров для УСВИ.

**Синтез фильтров.** Предложенный метод синтеза КИХ-фильтров [13] базируется на следующих ос-

новных положениях: использование расширенных спектральных представлений сигналов и фильтров на базе преобразования Лапласа и методов нелинейной оптимизации с ограничениями [14].

Эффективность предложенного метода синтеза для УСВИ подробно рассмотрена в [13]. Так, для УСВИ класса М удалось вдвое повысить быстродействие по сравнению с фильтром, предложенным в стандарте [10], при тех же требованиях по точности при отклонении частоты энергосистемы от номинального значения, при тех же требованиях по подавлению синусоидальной составляющей двойной частоты, возникающей в результате операции смещения спектра входного сигнала УСВИ, а также подавлению высших гармоник и интергармоник. При небольшой модернизации алгоритма обработки сигналов УСВИ быстродействие удалось повысить еще приблизительно в 2 раза.

Рассмотрим синтез КИХ-фильтров для УСВИ класса Р, а также многофункциональных ИЭУ, выполняющих функции УСВИ класса Р и устройств РЗА.

На рис. 2 и 3 приведены импульсные функции и амплитудно-частотные характеристики КИХ-фильтров для следующих случаев: рекомендованные стандартом [10] для УСВИ класса Р (кривая 1), широко используемые в микропроцессорных устройствах РЗА (кривая 2), вновь синтезированные фильтры (кривые 3, 4, 5, 6).

Все синтезированные фильтры за исключением первого (кривая 3 на рис. 2, а, б и рис. 3) разработаны для модернизированного алгоритма обработки УСВИ. При синтезе существенно ужесточены требования по допустимому диапазону изменения частоты:  $\pm 5$  Гц вместо  $\pm 2$  Гц по стандарту [10].

Первый из синтезированных фильтров (кривая 3) обладает классом точности 0,5 и имеет наименьшую длительность импульсной характеристики фильтра. Данный фильтр может применяться только в устройствах для измерения синхронизиру-

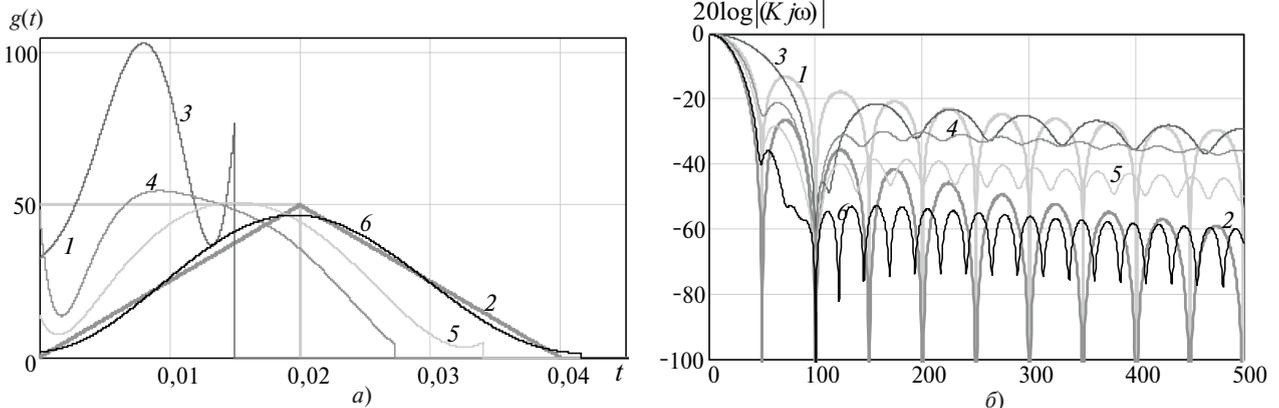


Рис. 2. Импульсные характеристики (а) и АЧХ фильтров (сечение  $p = j\omega$ ) (б)

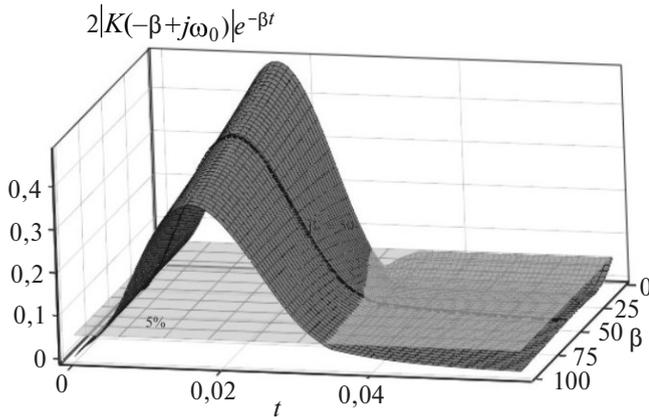


Рис. 3. АЧХ фильтров (сечение  $p = -\beta + j\omega_0$ )

ванных векторов напряжения в однородной электрической сети, когда в напряжении практически отсутствуют апериодические составляющие.

Три других синтезированных фильтра обеспечивают подавление составляющей от экспоненциальной помехи на входе устройства соответственно в 20, 50 и 100 раз. Последний фильтр (кривая б на рис. 2 и рис. 3) обеспечивает высокую точность измерений (класс точности 0,2).

На рис. 3 приведены АЧХ четвертого синтезированного фильтра (кривая 5 на рис. 2, а, б) в сечении  $p = -\beta + j\omega_0$ , из которых следует, что данный фильтр обеспечивает заданный уровень подавления составляющей от экспоненциальной помехи. С учетом данного обстоятельства указанные фильтры обладают лучшим быстродействием, чем широко применяемый в релейной защите усредняющий КИХ-фильтр с прямоугольной импульсной характеристикой длительностью 20 мс.

Переход аналоговых фильтров-прототипов к цифровым фильтрам производится с помощью известных методов перехода. Возможна и прямая реализация синтеза цифровых фильтров [12].

**Реализация и опыт внедрения.** Специалистами «Инженерный центр «Энергосервис» разработан ряд ИЭУ с поддержкой технологии векторных измерений [15]. Для применения в WAMS разработано многофункциональное устройство ЭНИП-2-УСВИ. Опционально ЭНИП-2-УСВИ содержит встроенный GPS-ГЛОНАСС приемник сигналов точного времени, цветной сенсорный экран и встроенный концентратор векторных измерений, что позволяет с минимальными затратами провести установку одного УСВИ на объекте и снизить требования к каналам передачи данных.

Следует отметить, что устройства ЭНИП-2-УСВИ по сравнению с большинством других УСВИ обладают очень малыми габаритными размерами. В настоящее время завершаются работы по подготов-

ке к серийному производству многофункционального интеллектуального устройства ESM, габариты и стоимость которого сопоставимы с аналогичными параметрами многофункциональных измерительных преобразователей телемеханики. Это позволяет в перспективе широко их применять как в SCADA, так и в WACS.

Для применения в WAMPACS и в составе цифровых подстанций разработано многофункциональное устройство сопряжения ENMU, которое подключается к релейной и измерительной обмоткам электромагнитных трансформаторов тока, а также к измерительным трансформаторам напряжения и обеспечивает формирование выборочных значений токов и напряжений согласно МЭК 61850-9-2. При этом устройство ENMU наряду с реализацией функций SAMU выполняет функции нескольких интеллектуальных электронных устройств, в том числе многофункционального измерительного преобразователя телемеханики, устройства синхронизированных векторных измерений, регистратора аварийных процессов и концентратора векторных данных. Векторные измерения можно рассматривать как дополнение или как альтернативу *sampled values*, особенно для реализации устройств релейной защиты и автоматики, в том числе реализации продольных дифференциальных защит и дифференциальных защит шин.

Устройство ENMU постоянно совершенствуется. В настоящее время ведется работа по расширению функциональных возможностей ENMU за счет добавления дискретных входов-выходов и поддержки протоколов МЭК 61850-8-1 (MMS и GOOSE-сообщения). Это значительно расширяет возможности ENMU с точки зрения использования в WAMPACS.

Для применения в закрытых распределительных устройствах напряжением 6–10 кВ разработан опытный экземпляр цифрового комбинированного датчика тока и напряжения TECV.P1-10 со встроенным устройством сопряжения, предназначенный для совместного использования с устройствами РЗА и измерительными ИЭУ; этот датчик содержит маломощный электромагнитный трансформатор тока со встроенным шунтом (Low Power Current Transformer, LPCT), катушку Роговского и емкостный датчик напряжения. Встроенное устройство сопряжения размещается в ограниченном объеме в основании TECV.P1-10.

Датчик TECV.P1-10 является не только источником информации для ИЭУ различного функционального назначения, но и способен выполнять функции ряда ИЭУ за счет реализации дополни-

тельных функций: телеизмерения, измерения синхронизированных векторов тока и напряжения и т.д. Использование синхронизированных векторов тока и напряжения позволит существенно снизить требования к микроконтроллерам или сигнальным процессорам устройств релейной защиты и автоматики в распределительных устройствах 6–10 кВ.

**Выводы.** Повышение эффективности управления энергосистемой во многом определяется качеством поступающей от объектов управления информации. Наилучшим образом реализуют современные требования по качеству данных ИЭУ с поддержкой технологии векторных измерений. При разработке ИЭУ нового поколения задача анализа качества оценки синхровекторов тока и напряжения эффективно может быть решена с помощью рассмотренных методов экспресс-анализа фильтров, определяющих динамические характеристики ИЭУ с поддержкой технологии векторных измерений.

Использование расширенных спектральных представлений позволяет формализовать требования к частотным характеристикам фильтров и упростить задачу синтеза фильтров для ИЭУ различного функционального назначения. Это в свою очередь позволяет реализовать более совершенные ИЭУ с поддержкой технологии векторных измерений с расширенными функциональными возможностями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kezunovic M., Meliopoulos S., Venkatasubramanian V., Vittal V. Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks. – NY: Springer, 2014, 190 p.
2. Жуков А.В., Дубинин Д.М. Внедрение ПТК СМПР на объектах электроэнергетики: эффективный инструмент повышения надежности энергосистемы. – Релейщик, 2013, № 3.
3. Долежилек Д.Дж., Швайцер С.Л. Практическое применение интеллектуальных сетей. – Энергоэксперт, 2009, № 5, с. 54–61.
4. Небера А.А. Прикладные вопросы применения векторных измерений параметров электрического режима. – Сб. матер. Межд. науч.-техн. конф. «Современные направления развития

систем релейной защиты и автоматики энергосистем – 2011», СПб., 2011.

5. Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. – NY: Springer Science & Business Media, 2008, 247 p.

6. Ferrer H.J.A, Schweitzer III E.O. et al. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems. – Pullman: SEL, 2010, 400 p.

7. Task Force on Synchrophasor Protection Applications. NASPI Engineering Analysis Task Team, Integrating Synchrophasor Technology into Power System Protection Applications, September 2016.

8. Monti A., Muscas C., Ponci C. Phasor Measurement Units and WideArea Monitoring Systems. – London: Academic Press. – 298 p.

9. Гамм А.З., Глазунова А.М., Гришин Ю.А., Колосок И.Н., Коркина Е.С. Развитие алгоритмов оценивания состояния электроэнергетической системы на основе интеграции данных SCADA и УСВИ. – Электричество, 2009, № 6, с. 2–9.

10. IEEE C37.118.1-2011/C37.118.1a. Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.

11. Стандарт АО «СО ЕЭС». Релейная защита и автоматика. Устройства синхронизированных векторных измерений. Нормы и требования (СТО 59012820.29.020.011–2016), 2017.

12. Mokeev A.V. Direct Methods for Frequency Filter Performance Analysis. In: Mbrquez FPG and Zaman N. (ed.) Digital Filters and Signal Processing. – Rijeka: InTech, 2013, pp. 81–107.

13. Mokeev A.V. Optimal filter synthesis. – IEEE International Siberian Conference on Control and Communications. Krasnoyarsk (Russia), 2013, pp. 1–4.

14. Wilhelm F., Hoffmann D. Optimization – Theory and Practice. – Springer, 2010, 402 p.

15. Бovyкин В.Н., Мокеев А.В., Перельгин Л.В. Расширение функциональных возможностей интеллектуальных электронных устройств. – Релейная защита и автоматизация, 2016, № 4, с. 28–34.

[17.01.2018]

*А в т о р: Мокеев Алексей Владимирович окончил электромеханический факультет Ленинградского политехнического института в 1982 г. В 2011 г. защитил докторскую диссертацию «Методы и алгоритмы обработки сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем различного функционального назначения». Профессор Северного (Арктического) федерального университета.*

## Achieving More Reliable and Efficient Operation of Power Systems by Using the Technology of Synchronized Phasor Measurements

MOKEYEV Aleksei V. (Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia) – Professor, Dr. Sci. (Eng.)

*Experience gained from application of automated transient mode monitoring systems (TMMS) involving the use of synchronized phasor measurement devices has proven a positive effect from application of TMMS*

for enhancing the power system reliability. The article considers matters concerned with achieving more reliable and efficient operation of power systems through wide-scale use of smart electronic devices for various functional purposes with supporting the technology of synchronized phasor measurements. In developing such devices, it is important to analyze the performance of smart devices under the conditions of electromagnetic and electromechanical transients and to consider synthesis of digital filters for improving the static and dynamic characteristics of these devices.

Key words: power systems, reliability, monitoring, phasor measurements, signal processing algorithms, digital filters

---

REFERENCES

1. **Kezunovic M., Meliopoulos S., Venkatasubramanian V., Vittal V.** Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks. – NY: Springer, 2014, 190 p.
2. **Zhukov A.V., Dubinin D.M.** *Releishchik – in Russ. (Specialist for relay protection)*, 2013, No. 3.
3. **Dolezhilek D. Dzh., Shchvaitser S.L.** *Energoekspert – in Russ. (Energoexpert)*, 2009, No. 5, pp. 54–61.
4. **Nebera A.A.** *Prikladnye voprosy primeneniya vektornykh izmerenii parametrov elektricheskogo rezhima. – Sb. Materialov Mezhd. Nauch.-tekhn. konf. «Sovremennye napravleniya razvitiya sistem releinoi zashchity i avtomatiki energosistem-2011»* (Application matters of using phasor measurements of electric operating parameters. In «Modern Development Lines of Power System Relay Protection and Automatic Controls – 2011»), St. Petersburg, 2011.
5. **Phadke A.G., Thorp J.S.** Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. – NY: Springer Science & Business Media, 2008, 247 p.
6. **Ferrer H.J.A., Schweitzer III E.O. et al.** Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems. – Pullman: SEL, 2010, 400 p.
7. **Task Force** on Synchrophasor Protection Applications. NASPI Engineering Analysis Task Team, Integrating Synchrophasor Technology into Power System Protection Applications, September 2016.
8. **Monti A., Muscas C., Ponci C.** Phasor Measurement Units and WideArea Monitoring Systems. – London: Academic Press. – 298 p.
9. **Gamm A.Z., Glazunova A.M., Grishin Yu.A., Kolosok I.N., Korkina Ye.S.** *Elektrichestvo – in Russ.* 2009, No. 6, pp. 2–9.
10. **IEEE C37.118.1-2011/C37.118.1a.** Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.
11. **Standart AO «CO EES».** *Releinaya zashchita i avtomatika. Ustroistva sinkhronizirovannykh vektornykh izmerenii. Normy i trebovaniya (STO 59012820.29.020.011-2016)* (The JSC UES System Operator Standard «Relay Protection and Automatic Controls. Synchronized Phasor Measurement Devices. Regulations and Requirements») STO 59012820.29.020.011-2016, 2017.
12. **Mokeyev A.V.** Direct Methods for Frequency Filter Performance Analysis. In: Mörquez FPG and Zaman N. (ed.) *Digital Filters and Signal Processing.* – Rijeka: InTech, 2013, pp. 81–107.
13. **Mokeyev A.V.** Optimal filter synthesis. – IEEE International Siberian Conference on Control and Communications. Krasnoyarsk (Russia), 2013, pp. 1–4.
14. **Wilhelm F., Hoffmann D.** Optimization – Theory and Practice. – Springer, 2010, 402 p.
15. **Bovykin V.N., Mokeyev A.V., Perelygin L.V.** *Releinaya zashchita i avtomatizatsiya – in Russ. (Relay protection and automation)*, 2016, No. 4, pp. 28–34.

[17.01.2018]