



#### 4.3. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ СИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

А. В. МОКЕЕВ

Северный (Арктический) федеральный университет  
Россия

**Контактное лицо:**

А. В. МОКЕЕВ

a.mokeev@ens.ru

**Ключевые слова:**

Синхронизированные векторные измерения (СВИ), устройства синхронизированных векторных измерений (УСВИ), обработка сигналов, анализ и синтез фильтров.



## ВВЕДЕНИЕ

Увеличение количества УСВИ в энергосистемах и расширение сферы их применения [1, 2, 3] требует развитие теории СВИ. Это необходимо, во-первых, для анализа поведения УСВИ как в нормальных режимах работы, так и при электромеханических и электромагнитных переходных

процессах в энергосистеме. Во-вторых, это требуется для синтеза новых алгоритмов УСВИ, обеспечивающих заданные показатели качества обработки сигналов. Например, обеспечение предельного быстродействия при выполнении требований к другим показателям качества обработки сигналов, например, обеспечению заданной точности.

В настоящем докладе обобщаются и развиваются работы автора по методам анализа и синтеза УСВИ [4-11]. Методы анализа можно рассматривать основанны на использования расширенных частотно-временных представлений сигналов и предназначены для анализа УСВИ при сигналах с постоянными и переменными параметрами. Использование предложенных методов анализа значительно упрощает формализацию требований к синтезу алгоритмов функционирования УСВИ.

Перед рассмотрением методов анализа и синтеза УСВИ предварительно рассмотрим вопросы математического описания входных сигналов УСВИ.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ УСВИ

### Математические модели сигналов

Математическое описание входных сигналов УСВИ представлено в табл. 1. Самыми простыми моделями являются синусоидальный сигнал (п. 1) и сигнал из набора синусоидальных составляющих (п. 2), которые компактно можно описать набором комплексных амплитуд и мнимых частот. В третьем и четвертом случаях сигнал представлен в виде одной или нескольких затухающих колебательных составляющих или их частных случаях («полубесконечный» синусоидальный сигнал, экспоненциальная составляющая, единичный скачок и т. д.). Данные сигналы компактно могут быть описаны набором комплексных амплитуд и комплексных частот. Сигнал в виде финитных затухающих колебательных составляющих представлен в п. 5. Наряду с комплексными амплитудами и частотами для их компактного описания дополнительно используются два вектора  $\mathbf{t} = [t_n]_N$  и  $\mathbf{t}_1 = [t_{1n}]_N$ , компоненты которых определяют время начала и конца каждой составляющей сигнала. С помощью данной модели сигнала могут быть описаны входные сигналы УСВИ, соответствующие ряду последовательно следующих друг за другом нормальных и аварийных режимов. В шестой модели сигнала комплексная амплитуда является функцией времени. Приведена зависимость между комплексной амплитудой  $\dot{\mathbf{X}}_1(t)$  и синхронизированным вектором (далее синхровектором)  $\dot{\mathbf{X}}(t)$ .

№	Полное описание	Краткое описание	Примечание
1	$x(t) = X_{m1} \cos(\omega_1 t - \varphi_1) = \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{X}}_1 e^{j\omega_1 t})$	$\dot{\mathbf{X}}_1, \omega_1$	$\dot{\mathbf{X}}_1 = X_{m1} e^{-j\varphi_1}$
2	$x(t) = \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{X}}^T e^{j\omega_1 t})$	$\dot{\mathbf{X}}, \mathbf{w}$	$\dot{\mathbf{X}} = [\dot{\mathbf{X}}_n]_N = [X_{m_n} e^{-j\varphi_n}]_N, \mathbf{w} = [\omega_n]_N$
3	$x(t) = X_{m1} e^{-\beta_1 t} \cos(\omega_1 t - \varphi_1) = \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{X}}_1 e^{p_1 t})$	$\dot{\mathbf{X}}_1, p_1$	$p_1 = -\beta_1 + j\omega_1$
4	$x(t) = \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{X}}^T e^{pt})$	$\dot{\mathbf{X}}, \mathbf{p}$	$\mathbf{p} = [-\beta_n + j\omega_n]_N$
5	$x(t) = \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{X}}^T e^{p \circ (Ct - t_1)} - \dot{\mathbf{X}}_1^T e^{p \circ (Ct - t_1)})$	$\dot{\mathbf{X}}, \mathbf{p}, \mathbf{t}, \mathbf{t}_1$	$\dot{\mathbf{X}}_1 = \dot{\mathbf{X}} \circ e^{p \circ (t - t_1)}, \mathbf{t} = [t_n]_N, \mathbf{t}_1 = [t_{1n}]_N, \mathbf{C} = [1]_N$ где $\circ$ – операция умножения векторов.



6	$x(t) = X_{m1}(t) \cos(\omega_0 t - \varphi_1(t)) = \operatorname{Re}(\dot{X}(t) e^{j\omega_0 t})$	$\dot{X}_1(t), \omega_0$	$\omega_0 = 2\pi 50; \dot{X}(t) = \dot{X}_1(t) e^{-\varphi_1(t)} / \sqrt{2}$
7	$x(t) = \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{X}}(t)^T e^{\mathbf{p}t})$	$\dot{\mathbf{X}}(t), \mathbf{p}$	
8	$x(t) = \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{X}}(t)^T e^{\mathbf{p} \circ (\mathbf{C}t - \mathbf{t})} - \dot{\mathbf{X}}_1(t)^T e^{\mathbf{p} \circ (\mathbf{C}t - \mathbf{t}_1)})$	$\dot{\mathbf{X}}(t), \mathbf{p}, \mathbf{t}, \mathbf{t}_1$	$\dot{\mathbf{X}}_1(t) = \dot{\mathbf{X}}(t) \circ e^{\mathbf{p} \circ (\mathbf{t} - \mathbf{t}_1)}$

Табл. 1. Математическое описание входных сигналов УСВИ.

Седьмая модель использует набор составляющих с зависимой от времени комплексной амплитудой как в шестой модели, но в общем случае с комплексными частотами. С помощью седьмой и восьмой моделей сигнала могут быть описаны сигналы, состоящие из набора «полубесконечных» или финитных составляющих с переменными параметрами.

#### Математическое описание УСВИ

Рассмотрим базовый алгоритм УСВИ [12] для аналоговой системы-прототипа. В этом случае нет необходимости учитывать погрешности аналого-цифрового преобразования сигналов, влияние частоты дискретизации и т.д. Оценка синхровектора напряжения (тока) производится согласно реализации выражения для оконного преобразования Фурье на номинальной частоте энергосистемы  $\omega_0$

$$\hat{\mathbf{X}}(t) = 2 \int_{t-T}^t x(\tau) e^{-j\omega_0 \tau} g(t-\tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $g(t)$  – импульсная функция усредняющего КИХ-фильтра или временное окно интегрального преобразования (1),  $T$  – длительность (длина) импульсной функции фильтра.

Процессы обработки сигнала (1) в УСВИ можно условно отобразить с помощью структурной схемы рис. 1. При этом в УСВИ реализуются две основные операции: смещение спектра сигнала с последующей обработкой сигнала усредняющим КИХ-фильтром.

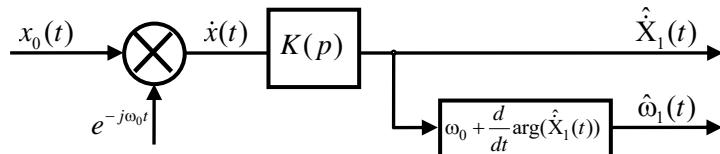


Рис. 1. Структурная схема аналогового прототипа УСВИ для алгоритма.

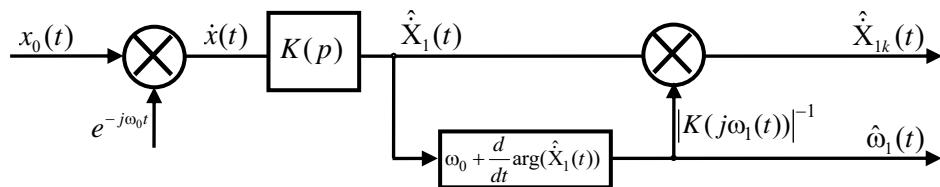


Рис. 2. Структурные схемы модернизированного алгоритма УСВИ.

Следует отметить, что для сигнала согласно п. б табл. 1 при оценке синхровектора имеет место переменная и постоянная составляющие погрешности измерений. Если подавлена должным образом переменная составляющая, то оценка синхровектора может быть скомпенсирована, так как в УСВИ производится измерение частоты [5, 7]. На рис. 2 представлена структурная схема модернизированного алгоритма УСВИ.

Строго говоря, можно говорить об алгоритме УСВИ, когда подобран или синтезирован усредняющий КИХ-фильтр. Именно фильтр определяет в данном случае статические и динамические характеристики УСВИ. Анализ поведения УСВИ в этом случае сводится к анализу фильтра. Поэтому актуальной задачей является разработка методов анализа фильтров при входных сигналах УСВИ с постоянными и переменными параметрами.



## АНАЛИЗ УСВИ

*Анализ УСВИ при входных сигналах с постоянными параметрами*

Автором разработаны методы анализа фильтров при входных сигналах с постоянными параметрами (пп. 1-5 табл. 1), позволяющие определить комплексные амплитуды принужденных и свободных составляющих выходного сигнала фильтра, а также определить сами указанные составляющие, путем простых арифметических операций [5, 8]. Приведем в краткой форме основные выражения для анализа фильтров для четвертой модели сигнала (табл. 1). Приведенные ниже выражения могут быть распространены и для остальных перечисленных выше моделей сигналов [8].

Принципиально возможно распространение частотно-временного подхода как для входного сигнала, так и для импульсной функции фильтра [5, 11]. Рассмотрим второй подход, основанный на использовании зависимой от времени передаточной функции фильтра или, по-другому, обобщенной передаточной функции

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

Обобщенную передаточную функцию представим в виде двух составляющих

$$K(p,t) = K_0(p) + K_1(p,t).$$

где  $K_0(p)$  – обычная передаточная функция,

$K_1(p,t)$  – переменная компонента обобщенной передаточной функции.

На основе исследования особенностей сигналов и импульсных функций фильтров на основе расширенных спектральных представлений преобразования Лапласа получено следующее выражения для определения комплексных амплитуд выходного сигнала фильтра

$$\dot{\mathbf{Y}}(t) = \dot{\mathbf{X}} \circ K_0(\mathbf{p}) + \dot{\mathbf{X}} \circ K_1(\mathbf{p}, t). \quad (2)$$

С помощью первой  $\dot{\mathbf{Y}}_0$  и второй  $\dot{\mathbf{Y}}_1(t)$  компонент определяются соответственно принужденные и свободные комплексные амплитуды выходного сигнала фильтра.

Определение принужденных и свободных компонент реакции фильтра

$$y_0(t) = \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{Y}}_0^\top e^{pt}), \quad y_1(t) = \operatorname{Re}(\dot{\mathbf{Y}}_1(t)^\top e^{pt}).$$

На основе рассмотренного метода предложены экспресс-методы анализа фильтров, позволяющих быстро и эффективно проводить анализ работы УСВИ при всех возможных сочетаниях параметров входных сигналов УСВИ [5, 8].

*Анализ фильтров при входных сигналах с переменными параметрами*

Предложенный автором метод анализа частотных фильтров при сигналах с переменными параметрами [7, 11] позволяет оперировать при анализе фильтров комплексными амплитудами входных и выходных сигналов, зависящими от времени

$$\dot{\mathbf{Y}}(t) = \dot{\mathbf{X}}(t) \circ K_0(\mathbf{p}) + \int_0^t K_1(\mathbf{p}, \tau) \circ \dot{\mathbf{X}}' (t - \tau) d\tau + \dot{\mathbf{X}}(0) \circ K_1(\mathbf{p}, t). \quad (3)$$

При  $\dot{\mathbf{X}}(t) = \dot{\mathbf{X}}$  вектор производных  $\dot{\mathbf{X}}'(t) = 0$  и выражение (3) упрощается и соответствует выражению (2). Первая и третья компоненты выражения (3) однозначно определяют соответственно принужденные и свободные составляющие реакции фильтра. Вторая компонента связана как с принужденными, так и свободными составляющими реакции фильтра. В ряде случаев, например, при амплитудной модуляции сигнала, вторая компонента мала по отношению к первой и третьей и ей можно пренебречь. А в случае



частотной модуляции наибольший вклад во вторую компоненту вносит принужденная составляющая.

Разделить принужденные и свободные составляющие от второй компоненты в выражении (3) возможно при нахождении аналитически или численно первообразной интеграла  $\mathbf{F}(\mathbf{p}, t, 0)$ . В этом случае комплексные амплитуды принужденных и свободных составляющих можно найти на основе следующих выражений

$$\dot{\mathbf{Y}}_0(t) = \dot{\mathbf{X}}(t) \circ K_0(\mathbf{p}) - \mathbf{F}(\mathbf{p}, t, 0), \quad \dot{\mathbf{Y}}_1(t) = \dot{\mathbf{X}}(0) \circ K_1(\mathbf{p}, t) + \mathbf{F}(\mathbf{p}, t, t).$$

Следует отметить, что определение первообразной интеграла для большинства непрерывных функций, а в ряде случаев и для функций с разрывами, возможно при использовании символьного интегрирования, реализованного во многих математических пакетах, например, Mathematica, Maple, Matlab, Axiom, Mathcad.

#### *Упрощенный метод анализа фильтров при входных сигналах с переменными параметрами*

Автором предложены упрощенные выражение для определения комплексных амплитуд выходного сигнала при различных видах модуляции, максимально близкие к символическому методу [7, 11]. Использование упрощенных выражений значительно упрощает анализ УСВИ и упрощает формирование требований к частотным характеристикам фильтров при их синтезе.

Можно обобщить результаты работ автора и использовать следующую упрощенную зависимость вход-выход

$$\dot{\mathbf{Y}}(t) \approx \dot{\mathbf{X}}(t) \circ K_0(\mathbf{p}(t)) + \dot{\mathbf{X}}(t) \circ K_1(\mathbf{p}(t), t),$$

где  $\mathbf{p}(t)$  - вектор мгновенных частот составляющих входного сигнала.

В табл. 2 приведен пример анализа УСВИ (рис. 1) для случая, когда мгновенная частота входного сигнала изменяется во времени по линейному закону. В примере используется усредняющий КИХ-фильтр с прямоугольной импульсной характеристикой (алгоритм Фурье).

№	Наименование	Примечание
1	Входной сигнал УСВИ	$x_0(t) = X_{m1} \cos(\omega_0 t + \pi R_f t^2) = 0,5 \dot{X}_1(t) e^{j\omega_0 t} + 0,5 \bar{X}(t) e^{-j\omega_0 t};$ $\dot{X}_1(t) = X_{m1} e^{-j\pi R_f t^2}, \quad \bar{X}(t) = X_{m1} e^{j\pi R_f t^2}; \quad \omega_1(t) = \omega_0 - 2\pi R_f t$
2	Компактная форма записи входного сигнала	$x_0(t) = \dot{\mathbf{X}}_0(t)^T e^{\mathbf{p}_0 t}; \quad \dot{\mathbf{X}}_0(t) = [0,5 \dot{X}_1(t) \quad 0,5 \bar{X}(t)]^T;$ $\mathbf{p}_0 = [j\omega_0 \quad -j\omega_0]^T$
3	Входной сигнал КИХ-фильтра	$x(t) = 2x_0(t) e^{-j\omega_0 t} = \dot{\mathbf{X}}(t)^T e^{\mathbf{p} t};$ $\dot{\mathbf{X}}(t) = [\dot{X}_1(t) \quad \bar{X}(t)]^T; \quad \mathbf{p} = [0 \quad -j2\omega_0]^T$
4	Компоненты обобщенной передаточной функции фильтра	$K(p, t) = \frac{k_1}{p} \left( 1 - e^{-pt} - (1 - e^{-p(t-T_0)}) e^{-pT_0} \right) \Gamma(t - T_0),$ $K_0(p) = \frac{k_1}{p} (1 - e^{-pT_0}), \quad K_1(p, t) = K(p, t) - K_0(p)$
5	Комплексные амплитуды принужденных составляющих	$\dot{\mathbf{Y}}_0(t) \approx \dot{\mathbf{X}}(t) \circ K_0(\mathbf{p}(t)) = \begin{bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \bar{X}(t) \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} K_0(j(\omega_1(t) - \omega_0)) \\ K_0(-j(\omega_1(t) + \omega_0)) \end{bmatrix};$ $\mathbf{p}(t) = [j(\omega_1(t) - \omega_0) \quad -j(\omega_1(t) + \omega_0)]^T$
6	Оценка синхровектора по Принужденным составляющим	$\hat{\mathbf{X}}_{10}(t) = \dot{\mathbf{Y}}_0(t)^T e^{\mathbf{p} t}$
7	Комплексные амплитуды свободных составляющих	$\dot{\mathbf{Y}}_1(t) \approx \dot{\mathbf{X}}(t) \circ K_1(\mathbf{p}(t), t) = \begin{bmatrix} \dot{X}_1(t) \\ \bar{X}(t) \end{bmatrix} \circ \begin{bmatrix} K_1(j(\omega_1(t) - \omega_0), t) \\ K_1(-j(\omega_1(t) + \omega_0), t) \end{bmatrix}$



8	Свободные составляющие оценки синхровектора	$\hat{X}_{11}(t) = \dot{\bar{Y}}_1(t)^T e^{pt}$
9	Оценка синхровектора и мгновенной частоты	$\hat{X}_1(t) = \hat{X}_{10}(t) + \hat{X}_{11}(t); \hat{\omega}_1(t) = 2\pi 50 + \frac{d}{dt} \arg \hat{X}_1(t)$

Табл. 2. Пример анализа УСВИ.

В отличие от других методов анализа фильтров, например применения интеграла свертки, предложенный метод анализа дает возможность определить все компоненты выходного сигнала УСВИ, т.е. полезную компоненту оценки синхровектора, а также принужденные и свободные составляющие погрешности данной оценки. На рис. 3 приведена часть указанных компонент для модуля выходного сигнала УСВИ: истинный модуль синхровектора (кривая 1), принужденная составляющая от первой составляющей (п. 3, кривая 2), суммарный сигнал от первой составляющей (кривая 3), суммарный сигнал (кривая 4), набор свободных составляющих (кривая 5). На этом же рисунке приведены компоненты для аргумента выходного сигнала УСВИ: истинный аргумент (кривая 6), набор принужденных составляющих (кривая 7), суммарный аргумент (кривая 8).

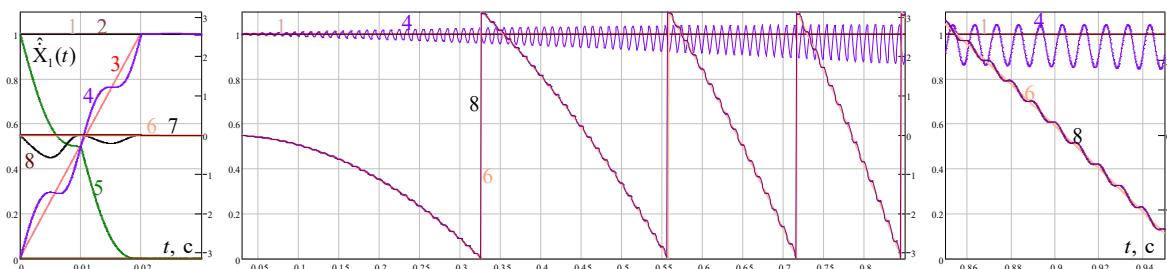


Рис. 3. Компоненты выходного сигнала УСВИ.

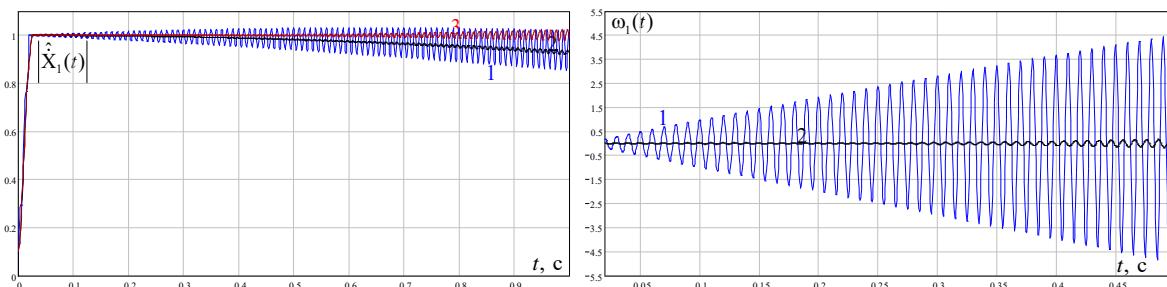


Рис. 4. Оценка модуля синхровектора и мгновенной частоты.

Как следует из приведенных графиков, наибольший негативный вклад в погрешности оценки модуля и аргумента синхровектора дает слабо подавленная вторая составляющая входного сигнала фильтра (п. 3 табл. 2). Для сравнения на рис.4 приведены графики оценки модуля синхровектора и оценки мгновенной частоты исследуемого фильтра (кривая 1) и специально синтезированного фильтра (кривая 2). Характеристики специально синтезированного фильтра (кривая 4 рис. 6) таковы, что имеется возможность повысить точность оценки синхровектора (кривая 3) за счет применения алгоритма согласно рис. 2.

Следует отметить, что предложенные автором методы анализа фильтров при входных сигналах с переменными параметрами, могут быть распространены и для исследований электромеханических переходных процессов [13]. При этом появляется возможность простого определения синхровекторов тока и напряжения указанных процессов и их отдельных составляющих. Это в значительной мере упрощает анализ различных электромеханических процессов, например, асинхронных режимов, синхронных качаний, обеспечивает эффективный анализ низкочастотных колебаний и поиска источника указанных колебаний и т. д. Это позволяет на основании исследований производить выбор наиболее



важных признаков распознавания повреждений и аномальных режимов работы для УСВИ и устройств релейной защиты и автоматики.

## Синтез УСВИ

### Постановка задачи

Использование предложенных методов анализа значительно упрощает формализацию требований к синтезу фильтров для УСВИ [5, 7, 9] и в сочетании с применением методов нелинейной оптимизации с ограничениями позволяет получить решения, близкие к предельным по быстродействию при заданной точности обработки сигналов [7]. При этом ограничения накладываются на значения частотных характеристик фильтра для заданных комплексных частот.

### Примеры синтеза фильтров

При использовании рассматриваемого метода синтеза усредняющих КИХ-фильтров удалось для УСВИ класса М увеличить быстродействие в 2 раза при использовании базового алгоритма (рис. 1) и в 3 раза при использовании модернизированного алгоритма (рис. 2) [14, 15]. На рис. 5 и рис. 6 приведены АЧХ и импульсные характеристики следующих фильтров: широко применяемого в устройствах РЗА (алгоритм Фурье, кривая 1), рекомендованного для УСВИ класса Р (кривая 2) и шести синтезированных фильтров (кривые 3-8). Наряду с традиционными АЧХ фильтров (рис. 5) рассматривается сечение трехмерной АЧХ на комплексной частоте  $p = -\beta + j\omega_0$ , умноженное на величину  $e^{-\beta T_1}$ , где  $T_1$  - длина фильтра. Последнее дает возможность учесть значение компоненты от апериодической составляющей входного сигнала УСВИ к моменту завершения переходного процесса в фильтре.

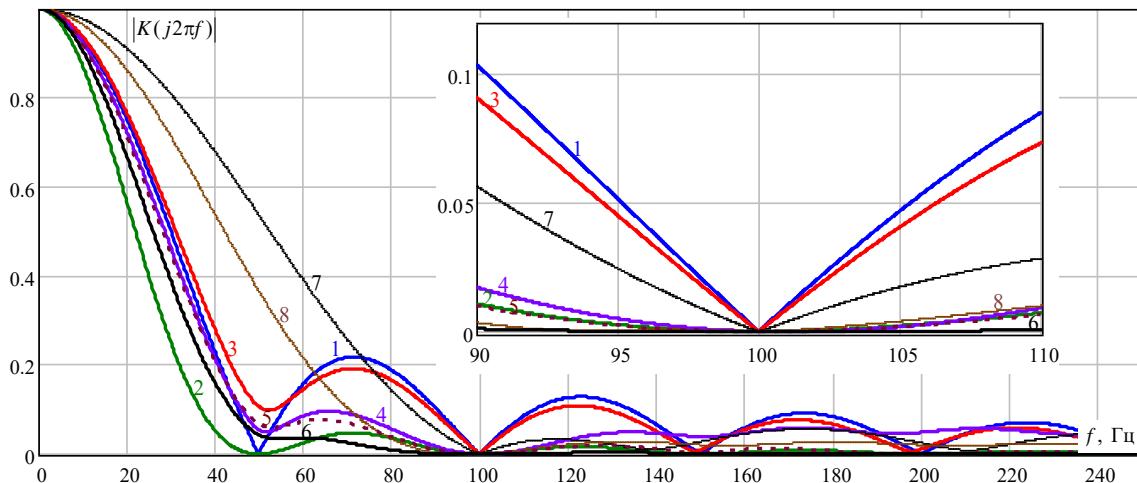
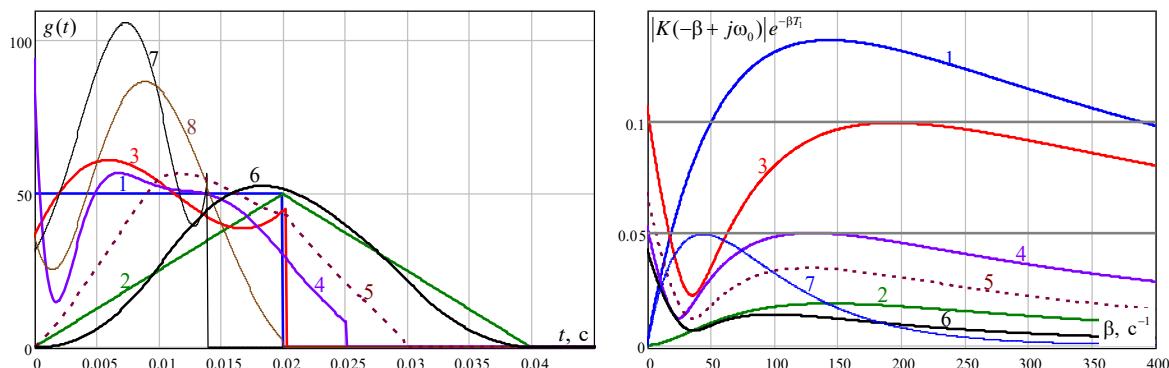


Рис. 5: АЧХ фильтров



Рис. 6. Импульсные характеристики фильтров и обобщенная АЧХ в сечении  $p = -\beta + j\omega_0$ .



При этом синтезированный фильтр под номером 3 (кривая 3) в отличии от первого фильтра обеспечивает заданный десятикратный уровень подавление апериодической составляющей во всем заданном диапазоне изменения коэффициента затухания ( $\beta \geq 2 \text{ c}^{-1}$ ). А 4-й фильтр, обладающий чуть большей длиной импульсной характеристики, обеспечивает более чем 20 кратное подавление апериодической помехи, более чем 50 кратное подавление подавление компоненты с двойной частотой. Это позволяет производить оценку мгновенной частоты (рис. 4) и коррекцию оценки синхровектора (рис. 2, рис. 4).

На рис. 7 приведен набор графиков полной погрешности (TVE) УСВИ с использованием первого фильтра (1) и четвертого фильтра без частотной коррекции (2) при входном сигнале УСВИ в виде набора синусоидального сигнала и апериодической составляющей. Диапазон изменения частоты от 45 до 55 Гц, коэффициента затухания апериодической составляющей от 10 до 200  $\text{c}^{-1}$ . При использовании первого фильтра TVE становится меньше 10 % при 70 мс (в 3,5 раза больше длины фильтра), тогда как в случае применения 4 фильтра это время определяется длиной импульсной функции. При этом погрешность может быть уменьшена за счет коррекции оценки синхровектора на основе измерения мгновенной частоты.

Фильтры 5 и 6 синтезированы на базе фильтра 3 путем улучшения его характеристик по подавлению апериодической помехи и составляющей двойной частоты. Обеспечивают более точную оценку синхровектора ( $TVE \leq 1\%$  при использовании алгоритма рис. 2) и точное измерение мгновенной частоты. Данные фильтры могут применяться как для УСВИ класса Р, так и для устройств РЗА. Фильтры 7 и 8 синтезированы для случая, когда не требуется подавление апериодической помехи.

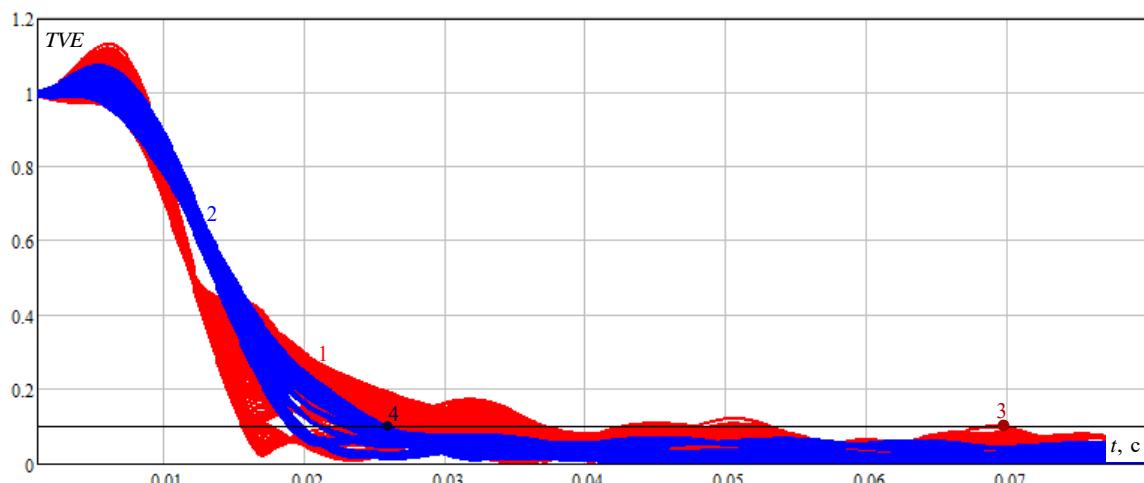




Рис. 7. Полная погрешность (TVE) оценки синхровектора.

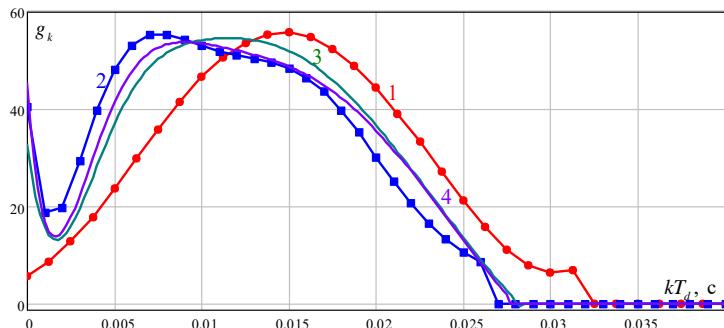


Рис. 8. Импульсные характеристики цифровых фильтров.

Все синтезированные фильтры являются аналоговыми фильтрами-прототипами. Для получения описания цифрового фильтра можно воспользоваться известными способами перехода. Но как показали исследования, для фильтров с ярко выраженной несимметричной импульсной характеристики предпочтительнее использовать прямой синтез цифровых фильтров. При этом аналоговый фильтр-прототип следует рассматривать как эталон. На рис. 8 приведены импульсные функции цифровых фильтров при тех же условиях синтеза, что и для фильтра 4 на рис. 5 и 6 при различной частоте дискретизации: 16, 20, 80, 96 точек на период промышленной частоты.

Следует отметить, что для УСВИ наряду с классическим алгоритмом (рис.1) разработано много других алгоритмов обработки сигналов, ряд из них описаны в работах известных специалистов по синхронизированным векторным измерениям [3, 16]. Подробный анализ алгоритмов УСВИ выходит за рамки настоящей работы, но следует отметить, что в большинстве алгоритмов в явной или неявной форме используется фильтрация сигналов. Поэтому рассматриваемые ниже методы анализа фильтров применимы для анализа функционирования УСВИ, в которых реализованы данные алгоритмы УСВИ. Базовые алгоритмы УСВИ являются анализаторами мгновенного спектра на одной частоте. Поэтому дальнейшее развитие указанных алгоритмов связано с использованием анализаторов мгновенного спектра на нескольких комплексных частотах. Другой путь совершенствования связан с использованием нестационарных алгоритмов УСВИ, в том числе применение адаптивных фильтров [17].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использования расширенных частотно-временных представлений сигналов и импульсных функций фильтров в координатах комплексной частоты позволило разработать простые и эффективные методы анализа УСВИ при входных сигналах с постоянными и переменными параметрами. Использование расширенных спектральных представлений и предложенных методов анализа значительно упрощает формализацию требований к синтезу алгоритмов функционирования УСВИ и в сочетании с методами многокритериальной оптимизации с ограничениями позволяет получить решения, близкие к предельным по быстродействию при заданной точности обработки сигналов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Phadke A. G., Thorp J. S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. NY, Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] Héctor J. Altuve Ferrer, Edmund O. Schweitzer, III et al. Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems. SEL, 2010.



- [3] Kezunovic M. et al. Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks. NY, Springer, 2014. 190 p.
- [4] Mokeev, A. V. Spectral expansion in coordinates of complex frequency application to analysis and synthesis filters // TICSP Report 37. Tampere, 2007. pp. 159-167.
- [5] Мокеев А. В. Обработка сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем: 2-5 т. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2008. 764 с.
- [6] Ванин В. К., Мокеев А. В., Попов М. Г. Аналоговые и цифровые фильтры в измерительных устройствах и устройствах автоматики энергосистем. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2008. 196 с.
- [7] Mokeev, A. V. Signal processing algorithms for intelligent electronic devices using phasor measurement technology // in Proc. Int. Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems, CIGRE-2011. S.-Petersburg, 2011.
- [8] Mokeev A. V. Application of spectral representations in coordinates of complex frequency for the digital filter analysis and synthesis // In: Márquez FPG (ed.) Digital Filters. Rijeka, InTech, 2011, P. 27-52.
- [9] Mokeev A. V. Optimal filter synthesis // in Proc. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications. Krasnoyarsk, 2013. P.1-4.
- [10] Mokeev A. V. Filter synthesis for PMU // IEEE International Conference SIBCON. Astana, 2017.
- [11] Mokeev A. V. The general approach to the analysis of filters for signals with constant and variable Parameters // IEEE International Conference SIBCON-2019. Tomsk, 2019.
- [12] IEC/IEEE 60255-118-1-2018. Measuring relays and protection equipment. Part 118-1: Synchrophasor for power systems. Measurements, 2018.
- [13] Mokeev A. V. Analysis of Digital Intellectual Devices Functioning under Electromagnetic and Electromechanical Transient Processes in Power Systems // SUSE-2021. Kazan, 2021.
- [14] Zhukov A. V., Dubinin D. M., Mokeev A. V. Enhancement of wide-area protection and automation systems based on PMU data // CIGRE Symposium, China, Chengdu, September 20-26, 2019.
- [15] Mokeev A. et al. Application of synchrophasor measurement technology for control, protection and automation // CIGRE B5 Colloquium in Tromsø, 2019.
- [16] Antonello M. et al. Phasor measurement units and wide area monitoring systems. Academic Press, 2016. 298 p.
- [17] Антонов В. И. Адаптивный структурный анализ электрических сигналов. теория и ее приложения в интеллектуальной электроэнергетике. Чебоксары, Изд-во ЧГУ, 2018. 334 с.