



PS5 – Poster-15



Алгоритмы обработки сигналов ИЭУ на основе технологии векторных измерений

А.В. МОКЕЕВ

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Россия

a.mokeyev@ens.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Интеллектуальные электронные устройства, векторные измерения, релейная защита, робастные и адаптивные алгоритмы обработки сигналов, цифровые фильтры.

1 ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальные электронные устройства (ИЭУ) на основе технологии векторных измерений в последние годы наряду с традиционной областью применения WAMS, все активнее стали применяться в автоматизированных системах технологического управления WACS, для создания распределенных систем релейной защиты WAPS и в качестве основных элементов управления интеллектуальных электрических сетей [1,2].

В ИЭУ на основе технологии векторных измерений наиболее распространены алгоритмы измерения комплексных амплитуд тока и напряжения основной гармоники на основе предварительного формирования ортогональных составляющих комплексных амплитуд или формирования ортогональных составляющих тока и напряжения основной гармоники.

В докладе рассматриваются вопросы синтеза алгоритмов обработки сигналов ИЭУ с использованием робастных или адаптивных алгоритмов фильтрации сигналов. Первый тип алгоритмов основан на использовании робастных фильтров, которые имеют низкую чувствительность к изменению параметров помехи и к отклонению частоты в энергосистеме. Применение адаптивных алгоритмов обработки сигналов позволяет реализовать ИЭУ с максимальным быстродействием.

2 АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ИЭУ

2.1 Алгоритмы ортогональных составляющих комплексных амплитуд

В табл. 1 приведено краткое описание базового алгоритма обработки сигналов на примере аналоговой системы-прототипа. Входной сигнал ИЭУ $\chi(t) = \text{Re}(\dot{\mathbf{X}}^T e^{pt})$ представлен набором комплексных амплитуд $\dot{\mathbf{X}}$ и частот $\mathbf{p}$. Ограничимся моделью сигнала в виде экспоненциальной составляющей, полезной синусоидальной составляющей промышленной частоты ω_1 (номинальное значение $\omega_0 = 2\pi 50$ рад/с) и высших гармоник. Более сложные модели сигналов рассмотрены в работах [3-5]. Усредняющий КИХ-фильтр $K_a(p)$ должен выделять постоянную ($\dot{y}(t) = \dot{X}_1$ при $\omega_1 = \omega_0$) или низкочастотную составляющую ($\dot{y}(t) = \dot{X}_1(t)$ при $\omega_1 \neq \omega_0$) и обладать малой чувствительностью к изменению коэффициента затухания β_0 экспоненциальной помехи, а также частоты энергосистемы $\omega_1 = 2\pi(50 \pm 5)$ рад/с.

№	Наименование	Схема/выражения
1.	Структурная схема алгоритма	
2.	Описание сигнала $\chi(t)$	$\dot{\mathbf{X}} = [X_0 \quad \dot{X}_1 \quad \dot{X}_2 \quad \dots \quad \dot{X}_N]^T, \mathbf{p} = [-\beta_0 \quad j\omega_1 \quad j2\omega_1 \quad \dots \quad jN\omega_1]^T$
3.	Входной сигнал фильтра	$\dot{x}(t) = 2\dot{\mathbf{X}}^T e^{(\mathbf{p}-j\omega_0)t} + 2\bar{\mathbf{X}}^T e^{(\bar{\mathbf{p}}-j\omega_0)t},$ $\bar{\mathbf{X}}, \bar{\mathbf{p}}$ – комплексно-сопряженные вектора
4.	Алгоритм	$\dot{X}_1(t) = k_1 X_T(j\omega_0, t), T_0 = 2\pi / \omega_0,$ $X_T(j\omega_0, t) = \int_{t-T_0}^t \chi(\tau) e^{-j\omega_0 \tau} g(t-\tau) d\tau = \int_{t-T_0}^t \dot{x}(\tau) g(t-\tau) d\tau$

Табл. 1: Базовый алгоритм ИЭУ

В популярном в ИЭУ алгоритме Фурье используется усредняющий КИХ-фильтр с прямоугольным временным окном. Усовершенствование указанного алгоритма связано с использованием фильтров с более сложными временными окнами, анализом мгновенного спектра на большем количестве частот, применением адаптивных алгоритмов [6,7].

На рис.1 приведен адаптивный алгоритм с использованием робастных фильтров [7].

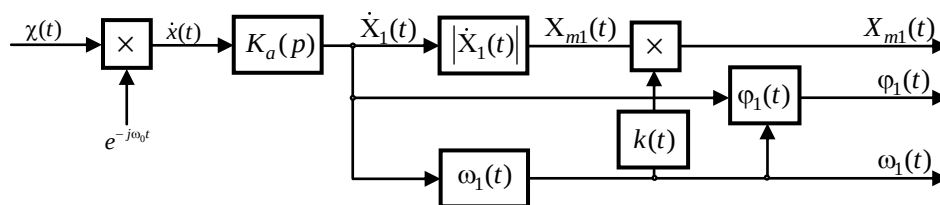


Рис. 1: Адаптивный алгоритм с использованием робастных усредняющих КИХ-фильтров

Для выполнения требований по точности обработки сигналов усредняющие КИХ-фильтры должны обеспечить эффективное подавление высших гармоник и затухающей колебательной составляющей с комплексной частотой $p = -\beta + j\omega_0$. Для АЧХ фильтра в диапазоне частот от 0 до 5 Гц не требуется обеспечение коэффициента усиления, близкого к единице. В этом случае частота энергосистемы определяется согласно следующего алгоритма

$$\omega_1(t) = \omega_0 - \frac{X_c'(t)X_s(t) - X_s'(t)X_c(t)}{|\dot{X}_1(t)|^2},$$

где $\dot{X}_1(t) = X_c(t) + jX_s(t)$.

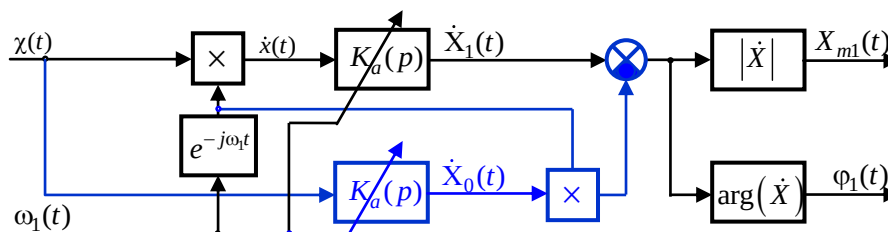


Рис. 2: Адаптивный алгоритм

На рис.2 представлен алгоритм при использовании адаптивных усредняющих КИХ-фильтров, настройка которых определяется за счет предварительно измеренного значения частоты энергосистемы $\omega_1(t)$. Синим цветом выделен дополнительный модуль, обеспечивающий снижение погрешностей обработки сигнала в определенном диапазоне изменения коэффициента затухания экспоненциальной помехи за счет использования значения мгновенного спектра сигнала на нулевой частоте [7].

2.2 Алгоритмы ортогональных составляющих полезного сигнала

На рис.3 представлены структурные схемы алгоритмов, основанных на формировании ортогональных составляющих полезного синусоидального сигнала. При использовании фильтра с передаточной функцией $\underline{K}_1(p) = 100(p + j\omega_0)^{-1}(1 - e^{-pT_0})$ для алгоритма рис.3 а) получим результат, аналогичный алгоритму Фурье. А алгоритм рис.3 б) при $K_a(p) = 50p^{-1}(1 - e^{-pT_0})$ эквивалентен алгоритму рис.2 [7].

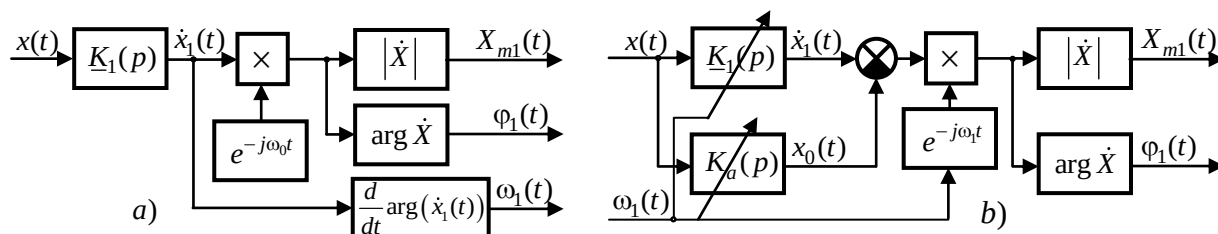


Рис. 3: Алгоритмы ортогональных составляющих полезного сигнала

Как и для алгоритмов табл.1, рис.1 и рис.2 эффективность алгоритмов может быть повышена за счет оптимального синтеза частотных фильтров.

3 СИНТЕЗ ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ

3.1 Синтез сверхбыстродействующих усредняющих КИХ-фильтров

В работе [7] рассмотрены методы синтеза фильтров ИЭУ с максимально возможным быстродействием. На рис.4 приведены АЧХ фильтров, которые в отличие от усредняющего фильтра алгоритма Фурье (кривая 1) при подобной (кривая 2) или более избирательной АЧХ (кривая 3), не вносят задержку в обработку сигналов. Существенный недостаток синтезированных фильтров связан с усилением неучтенных высокочастотных помех и шумов, так как АЧХ фильтров вне рассматриваемого на рис.4 частотного диапазона с ростом частоты будут стремиться к бесконечности. Вместе с тем алгоритмы обработки сигналов ИЭУ энергосистем с использованием быстродействующих фильтров могут рассматриваться как предварительные при использовании двухстадийных методов синтеза [7].

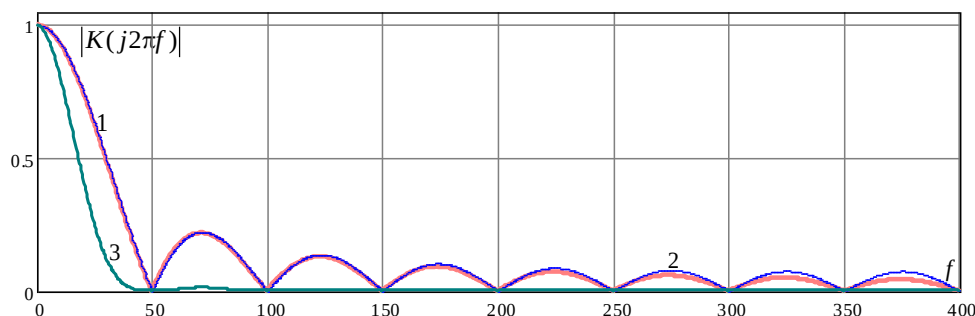


Рис. 4: АЧХ быстродействующих фильтров

3.2 Синтез робастных фильтров

Использование спектральных представлений на основе преобразования Лапласа позволяет эффективно решать задачи анализа и синтеза частотных фильтров при нестационарных входных сигналах, описываемых совокупностью полубесконечных или финитных затухающих колебательных составляющих [4,5,7]. Подобным образом могут быть описаны и импульсные функции аналоговых фильтров-прототипов

$$\dot{g}(t) = \dot{\mathbf{G}}^T e^{\mathbf{q}t} - \dot{\mathbf{G}}^T e^{\mathbf{q}(t-T_1)}, \quad g(t) = \text{Re}(\dot{g}(t)), \quad (1)$$

Для описания КИХ-фильтров достаточно использовать векторы комплексных амплитуд импульсной функции $\dot{\mathbf{G}} = [\dot{G}_m]_M$ и $\dot{\mathbf{G}}' = [\dot{G}_m e^{\rho_m T_1}]_M$, вектор комплексных частот $\mathbf{q} = [\rho_m]_M$ и длину фильтра T_1 .

Такой подход существенно упрощает синтез фильтров - вместо формирования требований к частотной характеристике необходимо составить простые зависимости для передаточной функции фильтра на комплексных частотах составляющих входного сигнала с учетом их изменения. Синтез производится с повышением числа составляющих импульсной функции (1) до достижения заданных показателей качества обработки сигналов [7]. Определение оптимальных параметров импульсных функций фильтра производилось с помощью пакета Optimization Toolbox системы MATLAB при использовании минимизации заданной целевой функции при наличии ограничений или методов нелинейной оптимизации с ограничениями, а также с помощью специально разработанной программы FFIR [7].

3.3 Синтез усредняющих КИХ-фильтров

Для усредняющих КИХ-фильтров импульсная функция (1) эквивалентна временному окну. Рассмотрим синтез усредняющих КИХ-фильтров для алгоритмов согласно табл.1 и рис.1. Выполним синтез для двух задач:

1. длина фильтра около 40 мс, класс точности 0,2, $X_0 = 0$, упрощение временного окна (1) до косинусоидального временного при $M = 5$: $\dot{\mathbf{G}} = \dot{\mathbf{G}}^* = [\mathbf{G}_m]_M$, $\mathbf{q} = [j(m-1)\omega_1]_M$, $T_1 = 2\pi / \omega_1$;
2. длина фильтра около 50 мс, класс точности 0,1, $X_0 = |\dot{X}_1|$, $M = 2$. Дополнительные погрешности: при девиации частоты 45÷55 Гц менее 0,15 %, при максимальном уровне экспоненциальной помехи при $\beta_0 = 20 \div 200 \text{ с}^{-1}$ не должна превышать 3 %.

Результаты синтеза фильтров для первой задачи при различной длине фильтров представлены на рис.4 и рис.5. При этом фильтры 1, 2 используются для алгоритма табл. 1, а фильтры 3÷6 - в алгоритме рис.1. Из сравнительного анализа с усредняющими КИХ-фильтрами (временные окна Raised cosine, Hann, Hamming, Blackman, Bartlett, Rectangular, Flat Top, Kaiser, Nutall 4-term), применяемыми в одном из наиболее совершенных PMU 1133A Power Sentinel американской фирмы Arbiter [8], следует, что синтезируемые фильтры значительно превосходят фильтры PMU 1133A по всем основным показателям качества обработки сигналов.

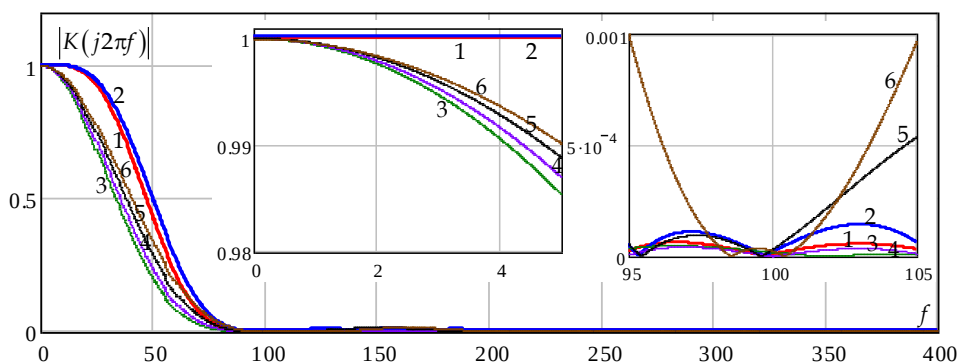


Рис. 4: АЧХ усредняющих КИХ-фильтров

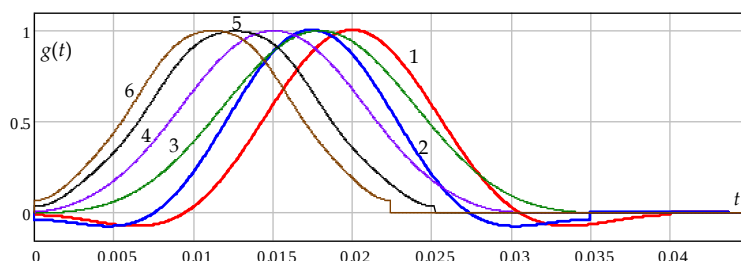


Рис. 5: Импульсные функции (временные окна) усредняющих КИХ-фильтров

Для второй задачи при использовании различных целевых функций получены два усредняющих КИХ-фильтра с практически идентичными АЧХ в сечении $p = j2\pi f$:

$$\dot{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} 80,48e^{j4,232} & 37,93e^{j0,5887} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{q} = [-22,99 + j62,30 \quad -23,26 + j186,9]^T, \quad T_1 = 0,051 \text{ с};$$

$$\dot{\mathbf{G}} = \begin{bmatrix} 42,26e^{j6,024} & 38,36e^{j2,938} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{q} = [-4,668 + j42,69 \quad -23,28 + j178,7]^T, \quad T_1 = 0,050 \text{ с}. \quad (2)$$

На рис.6 и рис.7 а) представлены АЧХ фильтров в сечении $p = j2\pi f$ и $p = -\gamma + j\omega_0$ (кривые 1 и 2). Импульсные характеристики фильтров (рис.7 б) в отличие от рассмотренных ранее (рис.5) являются асимметричными. Следовательно, точно такие же АЧХ в сечении $p = j2\pi f$ будут иметь фильтры с зеркально противоположными импульсными характеристиками (кривые 3 и 4). Но в сечении $p = -\gamma + j\omega_0$ АЧХ фильтров под номером 3 и 4 существенно отличаются от аналогичных АЧХ фильтров родителей (фильтров 1 и 2). Отсюда следует принципиально важный вывод о неэффективности использования традиционных АЧХ фильтров (сечение $p = j2\pi f$) для анализа фильтров при непериодических входных сигналах.

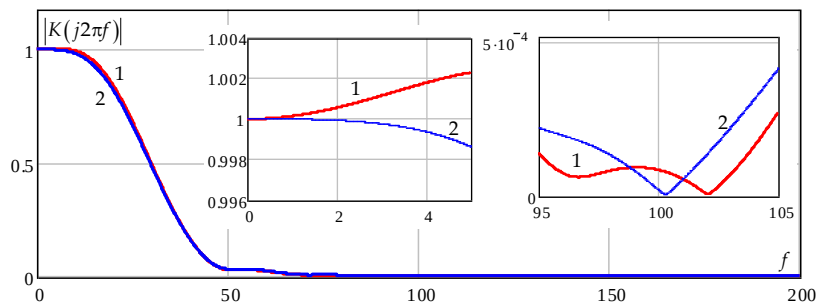


Рис. 6: АЧХ фильтра в сечении $p = j2\pi f$

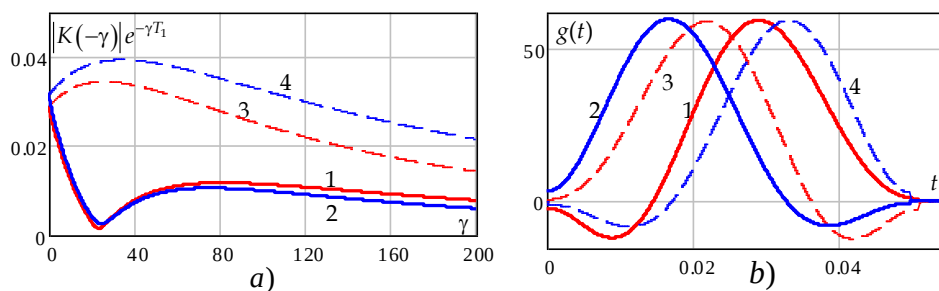


Рис. 7: АЧХ в сечении $p = -\gamma + j\omega_0$ и импульсные характеристики фильтров

Совместное использование фильтров 1 и 2 позволит повысить достоверность контроля ИЭУ за счет выявления наличия переходных процессов в фильтрах [4]. Фильтры обеспечивают сочетание высокого быстродействия и высокой точности обработки сигналов. Быстродействие второго фильтра составляет около 20 мс (класс точности 10) для релейной защиты и около 40 мс (класс точности 0,2) для целей измерения параметров режима энергосистемы.

Из рассмотренных примеров синтеза фильтров следуют следующие важные закономерности временных окон для усредняющих КИХ-фильтров [4]:

1. при использовании косинуидальных временных окон или временных окон (1) при гармонических входных сигналах форма синтезируемых окон близка к симметричной “колоколообразной” или к форме в виде “шляпы” (рис.5);
2. при использовании временных окон (1) при необходимости подавления аperiodической составляющей получены окна с явно выраженной асимметричной формой (рис.7).

3.4 Синтез КИХ-фильтров

Синтез КИХ-фильтров для алгоритма рис. 3 а) может быть произведен на основе полученных решений для усредняющих КИХ-фильтров алгоритма табл.1: $\dot{g}_1(t) = 2e^{j\omega_0 t} g_a(t)$. Получим два фильтра с импульсными функциями $g_1(t)$ и $g_2(t)$, при этом $\dot{g}(t) = g_1(t) + jg_2(t)$.

Рассмотрим переход от усредняющего КИХ-фильтра рис. 7 б (кривая 2) к двум КИХ-фильтрам алгоритма рис. 3 а). На рис. 8 приведены АЧХ синтезируемых фильтров (кривые 1 и

2) и АЧХ усредняющего фильтра-прототипа (кривая 3), а на рис. 9 а) представлены ФЧХ фильтров. На рис. 9 б) приведены импульсные характеристики фильтров и усредняющего фильтра-прототипа (кривые 3 и 4).

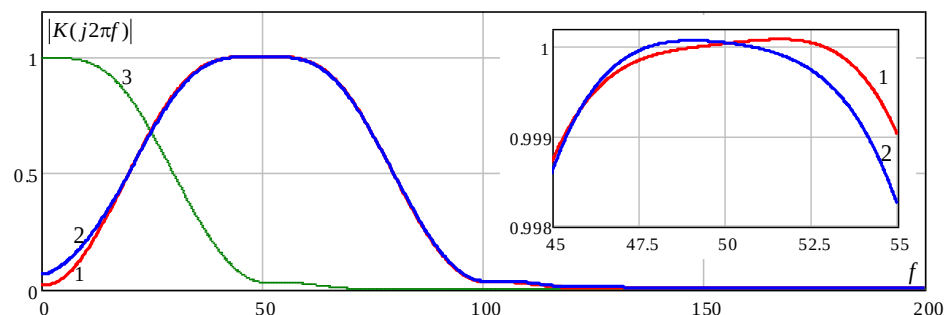


Рис. 8: Амплитудно-частотные характеристики КИХ-фильтров

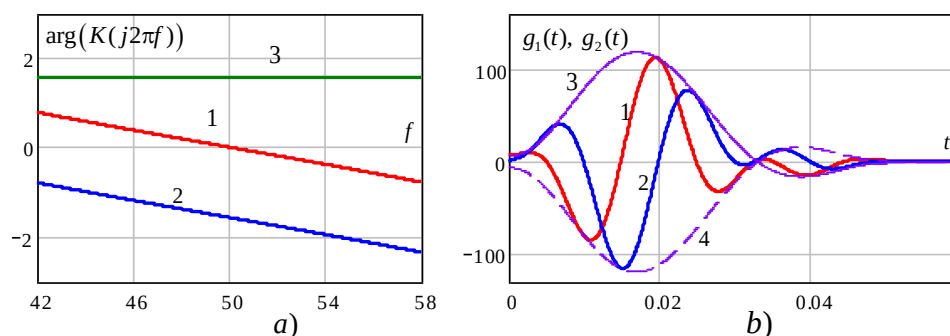


Рис. 9: ФЧХ и импульсные характеристики КИХ-фильтров

Как следует из рис.8, АЧХ фильтров очень близки к друг к другу, а разность значений ФЧХ фильтров в диапазоне частот 45÷55 Гц практически неизменна и близка к $\pi/2$ (кривая 3 рис. 9 а). Таким образом, синтезируемые фильтры обеспечивают высокое качество обработки сигнала при заданном диапазоне изменения частоты энергосистемы, при наличии высших гармоник и аperiodических помех. Синтезированные фильтры пригодны для использования в устройствах РЗА, так как обеспечивают быстродействие меньше 30 мс (класс точности 10). Этот показатель значительно лучше, чем у большинства устройств РЗА 6-35 кВ российских и зарубежных производителей. Использование синтезируемых фильтров целесообразно и для формирования симметричных составляющих токов (напряжений).

При снижении требований к точности обработки сигналов могут быть синтезированы фильтры, обеспечивающие более высокое быстродействие. Так, для алгоритма рис.3 а) произведен синтез трех КИХ-фильтров [7].

На рис. 10 а) приведены амплитудно-частотные характеристики синтезируемых фильтров (кривые 1, 2 и 3), а на рис. 10 б) соответствующие им импульсные характеристики.

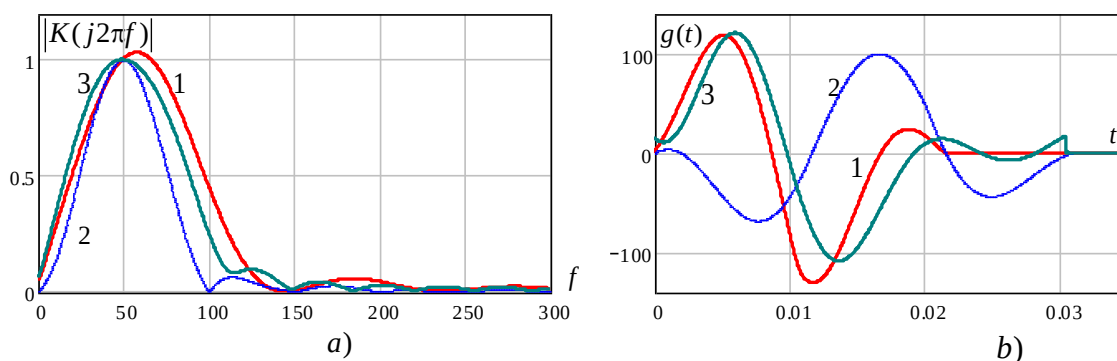


Рис. 10: АЧХ и импульсные характеристики КИХ-фильтров

Первый фильтр обеспечивает более высокое быстродействие около 10 мс при 10%

допустимой погрешности. Второй фильтр имеет меньшие погрешности при изменении частоты энергосистемы (около 2 %) и его быстродействие составляет около 20 мс при 10 % и около 31 мс при 1% погрешности обработки сигналов.

4 СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗАТОРОВ СПЕКТРА

В работе [7] рассмотрены алгоритмы обработки сигналов ИЭУ энергосистем, обеспечивающие анализ мгновенного спектра на нескольких частотах. Для реализации векторных измерений разработан адаптивный алгоритм согласно рис.11.

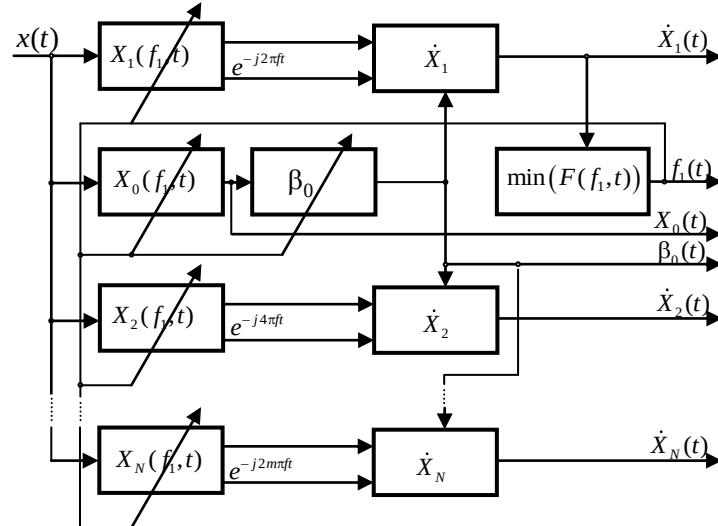


Рис. 11: Алгоритм ИЭУ на основе технологии векторных измерений

На структурной схеме рис.11 используются следующие обозначения: $n=1...N$ – количество учитываемых гармоник, $\dot{X}_n(t) = \dot{X}_n'(f_1, t)$ – оценка комплексной амплитуды n -й гармоники по скорректированному значению мгновенному спектру по частоте $2\pi f_1$ при времени наблюдения, равном $1/f_1$. Результатом измерений является совокупность оценок комплексных амплитуд гармоник $\dot{\mathbf{X}}(t) = [\dot{X}_1(t) \ \dot{X}_2(t) \ \dots \ \dot{X}_N(t)]^T$.

При этом комплексная амплитуда n -ой гармоники вычисляется на основе скорректированного значения мгновенного спектра на частоте заданной гармоники

$$\dot{X}_n(t) = 2nf_1 X_n(f_1, t) - \frac{2nf_1 \beta_0}{\beta_0 + j2\pi n f_1} X_0(f_1, t) e^{-j2\pi n f_1 t},$$

Измерение коэффициента затухания экспоненциальной помехи $\beta_0 \rightarrow \beta_0(t)$ и частоты энергосистемы $f_1 \rightarrow f_1(t)$ производится по специально разработанным алгоритмам [7]. Быстродействие алгоритма составляет около 20 мс для точных измерений.

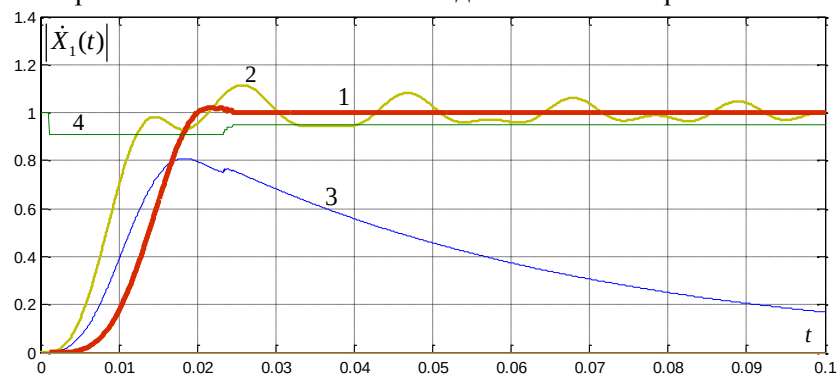


Рис. 12: График выходного сигнала

На рис. 12 приведены графики модулей выходных сигналов $|\dot{X}_1(t)|$ (кривая 1), $2f_1|X_1(f_1, t)|$ (кривая 2), $X_0(t)$, а также график $f_1(t)/50$ (кривая 4) при входном сигнале в виде аддитивной смеси полезного сигнала и экспоненциальной помехи при $\omega_1 = 2\pi 47,5$ рад/с, $X_2 = X_{m1} = 1$, $\beta_2 = 20$ с⁻¹.

Использование анализаторов спектра в координатах комплексной частоты обеспечивает еще большие возможности по синтезу алгоритмов обработки сигналов ИЭУ энергосистем [7].

5 СИНТЕЗ БЫСТРЫХ АЛГОРИТМОВ ИЭУ

Преимущество использования аналоговых фильтров-прототипов с конечной импульсной характеристикой (1) связано с синтезом быстрых алгоритмов КИХ-фильтров. Переход от описания аналогового фильтра-прототипа к цифровому фильтру производится с помощью известных методов с учетом специфики аналогового КИХ-фильтра [7].

При использовании метода инвариантных импульсных характеристик для сигнального процессора с поддержкой операций над комплексными числами с фиксированной запятой (4 разряда) на основе аналогового фильтра-прототипа (2) при шаге дискретизации $T = 500$ мкс получен следующий быстрый алгоритм фильтра [4]

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1(k) \\ \dot{y}_2(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0,0171 - j0,0364 \\ 0,0158 + j0,0105 \end{bmatrix} x(k) - \begin{bmatrix} 0,0049 + j0,0115 \\ -0,0045 - j0,0037 \end{bmatrix} x(k-102) + \begin{bmatrix} (0,9881 + j0,0308)\dot{y}_1(k-1) \\ (0,9841 + j0,0922)\dot{y}_2(k-1) \end{bmatrix}.$$

Вопросы синтеза быстрых алгоритмов для цифровых фильтров с целочисленными коэффициентами, быстрых алгоритмов адаптивных фильтров, быстрых алгоритмов анализаторов спектра и вейвлет-преобразований рассмотрены в работах [3,4,7].

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование предложенных методов синтеза фильтров позволяют получить эффективные алгоритмы ИЭУ на основе технологии векторных измерений. Разработанные алгоритмы обработки сигналов реализованы в ИЭУ семейства ЭНИП, производимые ЗАО "Инженерный центр "Энергосервис". ЭНИП-2 содержит до 5 цифровых интерфейсов, в т.ч. до 2 портов Ethernet, с независимой и гибкой настройкой каждого порта и возможностью удаленного считывания и изменения конфигурации ЭНИП-2. Обеспечена поддержка протоколов МЭК 60870-5-104 и МЭК 61850. Ведутся работы по поддержке технологии OPC UA. Созданы опытные образцы интеллектуальных устройств ЭНИП-3 с поддержкой технологии векторных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems / Ed. by Héctor J. Altuve Ferrer and Edmund O. Schweitzer, III. SEL, 2010.
- [2] Л. Кондрагунта, Э. Моор. Использование данных векторных измерений для улучшения оценки состояния энергосистем // Мониторинг параметров электроэнергетической системы: Материалы II междунар. науч.-техн. конф. СПб, 2008.
- [3] Mokeev A.V. Spectral expansion in coordinates of complex frequency application to analysis and synthesis filters // TICSP Report 37 (SMMSP 2007). Tampere, 2007. P. 159-167.
- [4] Digital Filters / A.V. Mokeev, H.K. Kwan, J.P. Hessling and etc., Ed. F.P.G. Márquez. Vienna, InTech, 2011.
- [5] Mokeev A.V. Intellectual electronic devices design for electric power systems based on phasor measurement technology // in Proc. Int. Relay Protection and Substation Automation of Modern Power Systems, CIGRE-2009, Moscow, 2009. P. 523-530.
- [6] Ванин В.К., Мокеев А.В. Современные методы обработки сигналов в технике релейной защиты // Тр. ЛПИ, вып.421. Ленинград, 1986. С.111-123.
- [7] Мокеев А.В. Обработка сигналов в интеллектуальных электронных устройствах энергосистем. Том 2-5. Архангельск: Изд-во Арханг. гос. техн. ун-та, 2008.
- [8] Model 1133A Power Sentinel. Power Quality. Revenue Standard. Operation manual. Arbiter Systems, Inc., Paso Robles, CA 93446. U.S.A.