

Совершенствование алгоритмов функционирования УСВИ

Мокеев А.В., доктор техн. наук
Северный (Арктический) федеральный университет
ООО "Инженерный центр "Энергосервис"
Россия
a.mokeev@ens.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

устройства синхронизированных векторных измерений, алгоритмы обработки сигналов, цифровые фильтры.

1 ВВЕДЕНИЕ

Наряду с устройствами, применяемыми в системах мониторинга переходных режимов, технологию синхронизированных векторных измерений все активнее начинают применять в устройствах релейной защиты, противоаварийной и режимной автоматики, в устройствах телемеханики, в измерительных устройствах [1-3].

К перечисленным выше интеллектуальным электронным устройствам (ИЭУ) предъявляются различные требования по качеству обработки сигналов. Для одних устройств критичным является быстродействие при относительно невысокой точности обработки сигналов, для других ИЭУ важно обеспечить, прежде всего, высокую точность измерений. Для ряда устройств требуется также обеспечить необходимое качество протекания переходных процессов в самих устройствах, например, предъявляются требования по ограничению перерегулирования. Для многофункциональных устройств и для УСВИ класса Р важно обеспечить сочетание высокого быстродействия при заданной высокой точности обработки сигналов.

Расширение сферы применения устройств с поддержкой технологии синхронизированных векторных измерений во многих случаях требует совершенствования алгоритмов обработки сигналов для улучшения основных показателей качества, например, быстродействия и точности обработки сигналов. Для решения указанной задачи могут применяться различные подходы. Первый из них связан с совершенствованием алгоритма функционирования УСВИ согласно стандарта IEEE C37.118.1 и сводится к синтезу цифрового фильтра, наилучшим образом, обеспечивающим требования по качеству обработки сигналов. Второй подход связан с совершенствованием самого алгоритма УСВИ, например, с расширением количества измеряемых составляющих мгновенного спектра входного сигнала или с использованием адаптивных алгоритмов.

В докладе рассматривается метод синтеза фильтров, основанный на использовании расширенных спектральных представлений сигналов и нелинейной оптимизации с ограничениями. Приводятся примеры синтеза фильтров для различных устройств с поддержкой технологии синхронизированных векторных измерений: УСВИ для класса М и класса Р, для устройств релейной защиты и автоматики, для измерительных устройств.

2 АЛГОРИТМЫ УСВИ

Рассмотрим базовую группу алгоритмов УСВИ согласно стандарта IEEE C37.118.1 [4] для аналоговой системы-прототипа. Оценка синхронизированного вектора напряжения (тока) производится согласно выражения для оконного преобразования Фурье на номинальной частоте энергосистемы ω_0

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

где $g(t)$ – импульсная функция усредняющего КИХ-фильтра или временное окно интегрального преобразования, T – длительность (длина) импульсной функции фильтра, $\omega_0 = 2\pi 50$ рад/с.

Процессы обработки сигнала (1) в УСВИ можно условно отобразить с помощью структурной схемы, представленной на рис.1.

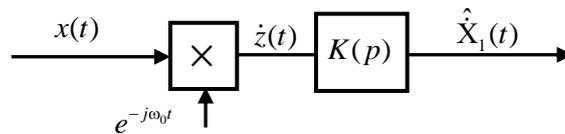


Рис. 1: Структурная схема для первой группы алгоритмов УСВИ

Алгоритм УСВИ можно разбить на две основные операции: перемножение входного сигнала на комплексную экспоненциальную функцию с последующей обработкой сигнала усредняющим КИХ-фильтром с передаточной функцией $K(p)$. Присвоение меток времени векторных измерений должно производиться с учетом группового времени задержки усредняющего КИХ-фильтра. От выбора фильтра зависят статические и динамические характеристики УСВИ [5].

Наиболее простым решением является использование фильтра с импульсной характеристикой прямоугольной формы, что соответствует фильтру с передаточной функцией

$$K(p) = \frac{50}{p} (1 - e^{-pT_0}).$$

Следует отметить, что указанный алгоритм широко используется в РЗА [6], но в отличие от УСВИ до последнего времени не использовалась точная синхронизация времени. Известны недостатки данного алгоритма [7,8] и основное направление совершенствования указанного алгоритма связано с выбором временных окон или совершенствование самого алгоритма [7,9].

Альтернативный алгоритм представлен на рис.2.

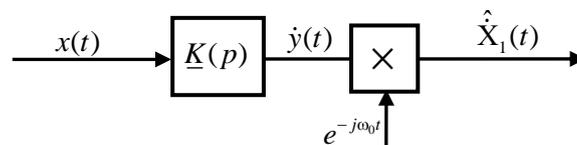


Рис. 2: Структурная схема второй группы алгоритмов УСВИ

При использовании КИХ-фильтра с комплексными коэффициентами передаточной функции $\underline{K}(p) = \frac{100}{p - j\omega_0} (1 - e^{-pT_0})$ получим тот же результат по оценке синхронизированного вектора тока (напряжения), что и для первого алгоритма (рис.1) при прямоугольном временном окне. При этом КИХ-фильтр с комплексными коэффициентами передаточной функции $\underline{K}(p)$ соответствует двум обычным фильтрам.

Несмотря на идентичность полученных результатов рассмотренных выше КИХ-фильтров для рис.1 и рис.2, следует отметить, что в общем случае следует говорить про разные возможности группы алгоритмов.

Группа алгоритмов, представленная на рис. 1, основана на реализации обычного или оконного преобразование Фурье на номинальной частоте энергосистемы и могут рассматриваться как анализаторы мгновенного спектра на частоте ω_0 [7]. Поэтому одним из вариантов совершенствования существующих алгоритмов связан с анализом мгновенного спектра на нескольких частотах, в том числе комплексных частотах, с последующей линейной или нелинейной обработкой результатов [7,8]. Наиболее простой способ связан с дополнительным анализом мгновенного спектра на нулевой частоте, что позволяет снизить погрешности оценки синхронизированного вектора тока (напряжения), вызванные наличием во входных сигналах УСВИ аperiodических составляющих.

Алгоритм, опубликованный более 30 лет назад, приведен на рис.3 и откорректирован исходя из непрерывности обработки сигналов [7,9].

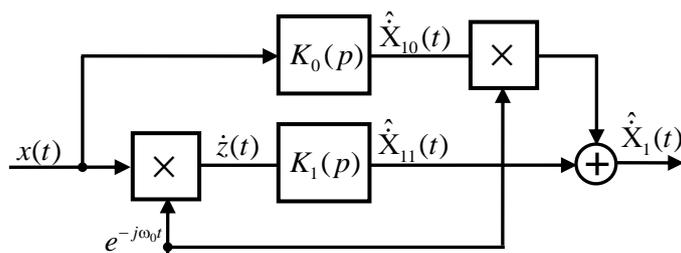


Рис. 3: Схема алгоритма УСВИ с компенсацией аperiodической составляющей

В простейшем случае, в качестве усредняющих КИХ-фильтров с передаточными функциями $K_0(p)$ и $K_1(p)$ используется фильтры прямоугольной импульсной функцией. В этом случае алгоритм УСВИ обеспечивает эффективное подавление аperiodических составляющих в широком значении изменений коэффициентов затухания. Недостаток использования данного временного окна связан с большими погрешностями измерений при отклонении частоты от номинального значения (погрешность оценки модуля синхронизированного вектора составляет около 5% при отклонении частоты на 5 Гц). Поэтому необходимо использовать или другие временные окна или реализовывать в УСВИ адаптивные алгоритмы с предварительной оценкой частоты с последующей корректировкой опорной частоты комплексной экспоненциальной функции и длительности временного окна. Следует при этом отметить, что частота является одним из наименее "удобных" для измерений параметров с точки зрения быстродействия. Это вызвано в первую очередь наличием нелинейных операций в алгоритмах для оценки частоты энергосистемы.

Дальнейшее усовершенствование алгоритма УСВИ связано с декомпозицией входных сигналов и оценкой не только параметров составляющей промышленной частоты, но и параметров высших гармоник, а также параметров свободных составляющих переходных процессов [9].

В настоящем докладе рассматриваются вопросы усовершенствования первой группы алгоритмов УСВИ.

Выбор временного окна может быть связан с исследованиями большого количества существующих временных окон и выбора наиболее подходящих для решаемой УСВИ задачи. В качестве примера можно привести УСВИ 1133A Power Sentinel американской фирмы Arbiter [12]. В данном устройстве пользователям на выбор предлагается одно из следующих временных окон: Raised cosine, Hann, Hamming, Blackman, Bartlett, Rectangular, Flat Top, Kaiser, Nutall 4-term.

Но более предпочтительным вариантом следует признать синтез временных окон в зависимости от требований к УСВИ. Следует отметить преимущества использования синтеза аналоговых КИХ-фильтров прототипов: нет необходимости учитывать при синтезе фильтров ограничения цифровой обработки сигналов, простой переход к цифровым фильтрам и получение быстрых алгоритмов реализации цифровых КИХ-фильтров [9-11].

3 СИНТЕЗ ЧАСТОТНЫХ ФИЛЬТРОВ

3.1 Постановка задачи

В общем случае входные сигналы УСВИ содержат полезный сигнал промышленной частоты и составляющие, подлежащее подавлению: гармоники, интергармоники и свободные составляющие электромагнитных переходных процессов в электрических сетях. Все указанные составляющие могут быть сведены в большинстве практических случаях к набору в виде “полубесконечных” или финитных затухающих колебательных составляющих [9,10]. Следует отметить, что для рассматриваемой группы алгоритмов (рис.1) влиянием шумов во входных сигналах РМУ можно пренебречь.

С учетом модели входных сигналов представляется логичным представить импульсные функции фильтров в виде набора финитных затухающих колебательных составляющих. Назовем указанные составляющие и соответствующим им фильтры элементарными. Возможны последовательное, параллельное и комбинированное соединение элементарных КИХ-фильтров [9,10].

При синтезе фильтра должна быть известны пределы изменения параметров составляющих входных сигналов, должны быть заданы требуемые показатели качества обработки сигналов, например, быстродействие и точности обработки сигналов. На основании этой информации формируются требования к характеристикам фильтра при использовании спектральных представлений преобразования Лапласа [10,11]. Синтез фильтра производится при заданной структуре, т.е. задается количество составляющих весовой функции и синтез производится с использованием методов нелинейной оптимизации с ограничениями. Ограничения выступают требования к частотной характеристике фильтра при использовании спектральных представлений преобразования Лапласа, заданная точность обработки сигнала и быстродействие.

Такой подход позволяет получить фильтры с быстродействием близким к предельному значению при заданных ограничениях по другим показателям качества обработки сигналов, в том числе по точности обработки сигналов в установившемся режиме.

3.2 Синтез фильтров для УСВИ класса М

УСВИ класса М согласно IEEE C37.118.1/C37.118.1a должны обеспечивать не менее чем 10-кратное подавление высших гармоник (вплоть до 50 гармоники) и интергармоник с частотами в диапазоне от $10 \div 25$ Гц и $75 \div 100$ Гц. Кроме того, суммарная погрешность (TVE) при отклонении частоты от номинального значения на ± 5 Гц не должна превышать 1 %.

Дополнительное условие синтеза фильтров связано с необходимостью подавления свободных составляющих электромагнитных переходных процессов, прежде всего аперiodических составляющих (диапазон изменения коэффициента затухания от 2 до 300 с^{-1}).

На устройства синхронизированных векторных измерений часто возлагаются функции измерения параметров режима электрической сети. В этом случае необходимо предъявлять требования не только к суммарной погрешности TVE, но и отдельно к амплитудной и фазовой погрешностям. Примем класс точности измерений 0,2 и 0,5.

Перед синтезом фильтров необходимо учитывать, что спектры составляющие входных сигналов смещаются благодаря умножению входного сигнала на комплексную экспоненту $e^{-j\omega_0 t}$. И полезным сигналом будет уже низкочастотная составляющая сигнала $\dot{z}(t)$ с частотой до 5 Гц, представляющая собой оценку синхронизируемого вектора $\hat{X}_1(t)$ или постоянная составляющая \hat{X}_1 в случае $\omega_1 = \omega_0$. Кроме того, после преобразования входного сигнала появляется еще одна составляющая в наибольшей степени требующая подавления: составляющая с частотой в диапазоне от 95 до 105 Гц.

Произведем синтез фильтров при указанных выше ограничениях и для заданных классов точности при последовательном соединении трех элементарных фильтров. На рис. 4 и рис.5 приведены соответственно импульсные характеристики и амплитудно-частотные характеристики для четырех синтезируемых фильтров.

Все фильтры удовлетворяют с запасом требования стандарта IEEE C37.118.1/C37.118.1a и дополнительным требованиям. Первый фильтр имеет класс точности 0,2, а второй и третий

фильтры – класс точности 0,5. АЧХ первого фильтра практически постоянна в области частот от 0 до 5 и быстродействие фильтра составляет чуть выше 80 мс против 178 мс в рекомендованном фильтре в стандарте IEEE C37.118.1.

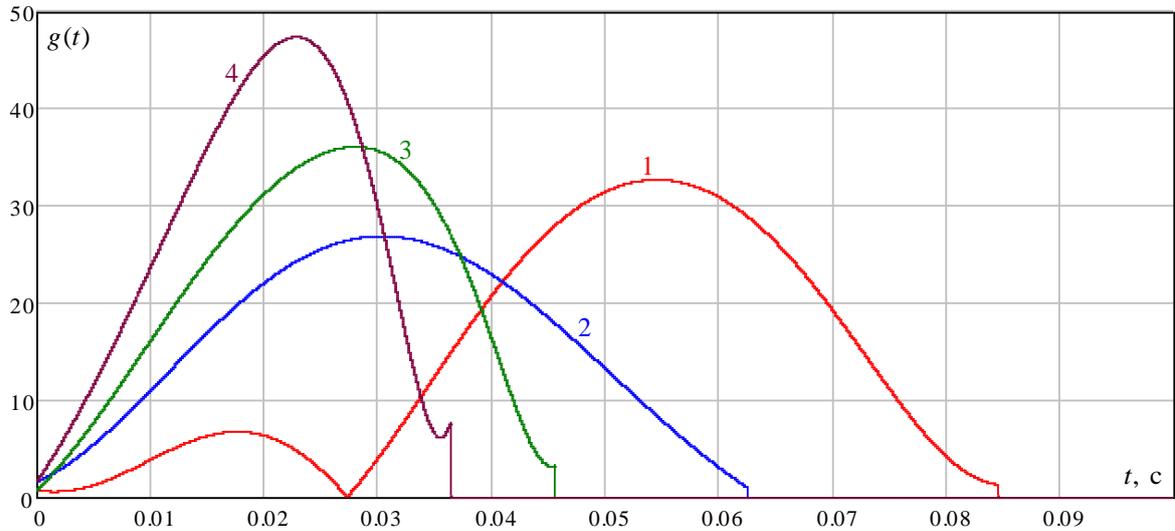


Рис. 4: Временные окна для УСВИ класса М

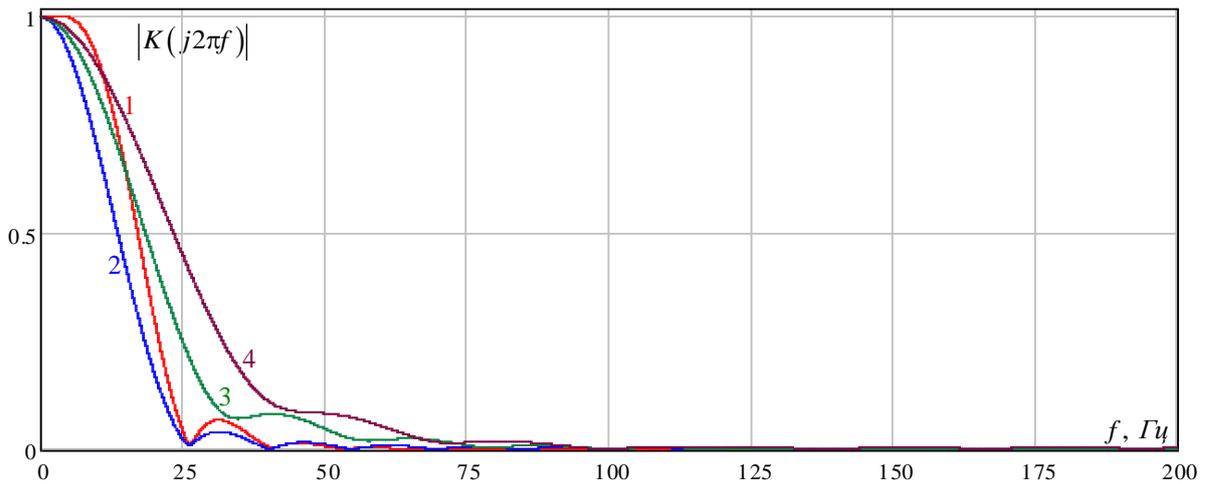


Рис. 5: АЧХ фильтров для УСВИ класса М

Следует отметить, что для полезного сигнала с учетом его преобразования на две составляющие после операции смещения спектра имеет место переменная и постоянная составляющие погрешности измерений синхронизированного вектора. Если подавлена должным образом переменная составляющая, то постоянная может быть легко скомпенсирована, так как в УСВИ производится измерение частоты. Усовершенствованный алгоритм с коррекцией оценки синхронизированного вектора приведен на рис.6, где $k(\omega_1)$ является функцией коррекции амплитуды синхронизированного вектора.

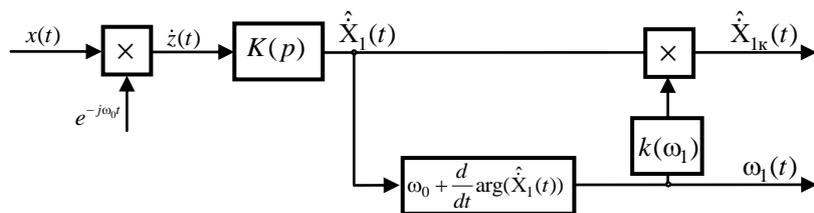


Рис. 6: Модифицированная структурная схема алгоритма УСВИ

За счет коррекции можно существенно можно повысить быстродействие УСВИ класса М. Так второй фильтр (класс точности 0,2) имеет быстродействие порядка 60 мс, а третий фильтр (класс точности 0,5) около 45 мс. Полученные результаты позволяют использовать два последних фильтра для одновременной реализации УСВИ с поддержкой класса М и класса Р.

В проекте российского стандарта УСВИ для классов напряжений 110 кВ и выше в 5 раз снижены требования к подавлению высших гармонических и интергармонических составляющих. Это позволит еще больше повысить быстродействие УСВИ (кривая 4 на рис. 4 и рис.5).

3.3 Синтез фильтров для УСВИ класса Р

Основные отличия в требованиях к УСВИ класса Р связаны с отсутствием подавления интергармонических составляющих и уменьшением в 10 раз требований по подавлению высших гармонических составляющих. Существенно меньшим принимается допустимый диапазон изменения частоты: ± 2 Гц в соответствии со стандартом IEEE C37.118.1 и в диапазоне от 46 до 52 Гц в проекте стандарта Системного Оператора.

Результаты синтеза фильтров согласно требований Системного оператора для УСВИ класса Р приведен на рис.7 и рис.8. Длина импульсных характеристик синтезированных фильтров равна 13, 15 и 20 мс. Первый и второй фильтры имеют класс точности 1, а третий фильтр 0,5. По сравнению с усредняющим КИХ-фильтром с прямоугольным окном и длиной 20 мс (кривая 4 на рис.8) синтезированные фильтры имеют более чем в 4,6 раза (фильтры 1 и 2) и 14,7 раза (фильтр 3) меньшую погрешность при отклонении частоты в заданных пределах.

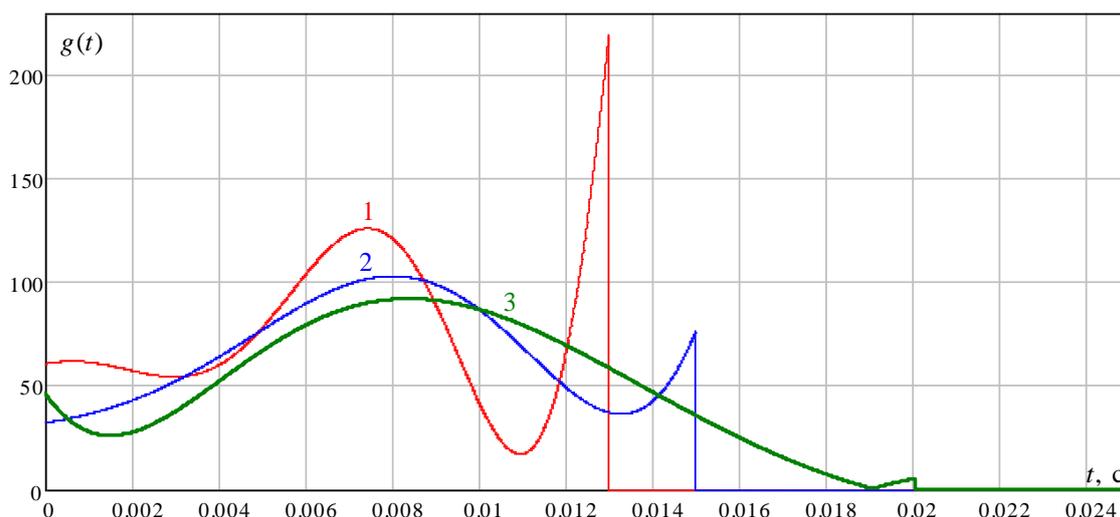


Рис. 7: Временные окна для УСВИ класса Р

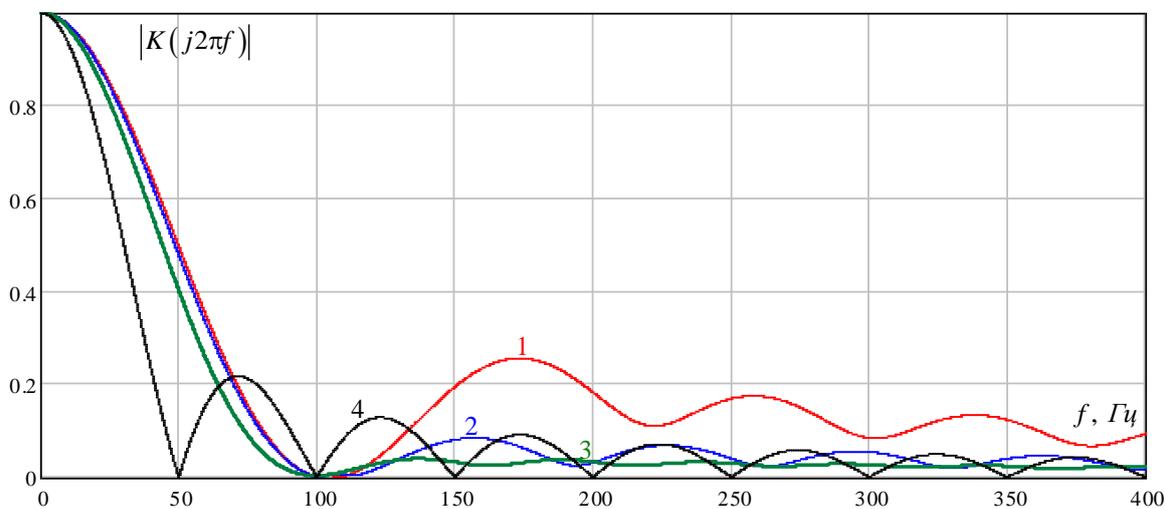


Рис. 8: АЧХ фильтров для УСВИ класса Р

Синтезированные фильтры могут применяться только для измерения синхронизированных векторов напряжения в однородной электрической сети, когда в напряжении практически отсутствуют апериодические составляющие. В качестве универсальных решений для измерения векторов напряжения и тока они использованы быть не могут.

Усложним задачу. Произведем синтез фильтров произведен практически при тех же условиях, что и для УСВИ класса М, за исключением подавления интергармоник. При синтезе фильтров допускаем отклонения частоты энергосистемы от номинального значения на ± 5 Гц, более чем 10-кратное подавление высших гармоник. Дополнительные условия связаны с подавлением свободных составляющих электромагнитных переходных процессов в виде апериодических составляющих. Примем класс точности измерений 0,2 и 0,5.

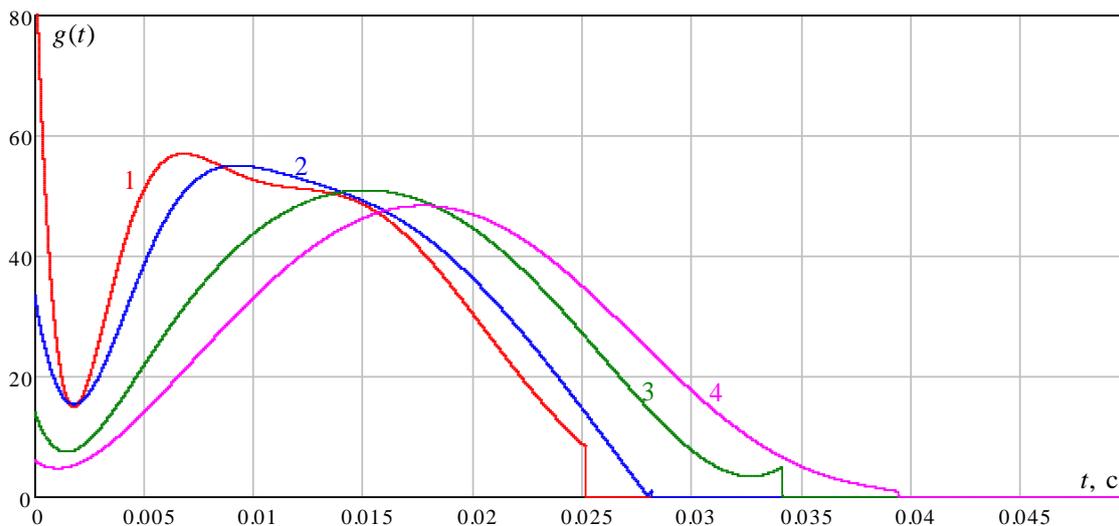


Рис. 9: Импульсные фхарактеристики КИХ-фильтров для УСВИ класса Р

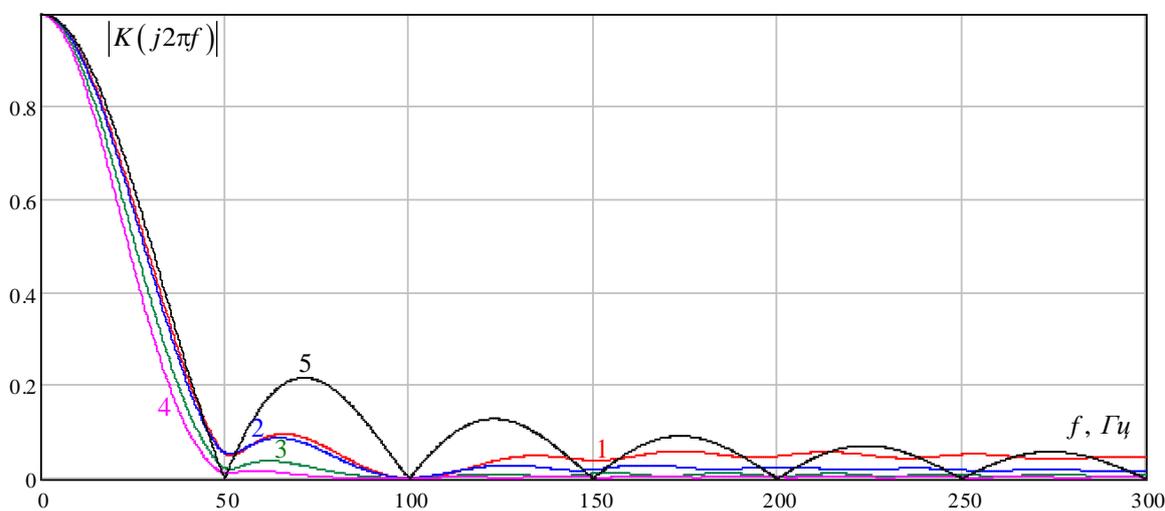


Рис. 10: АЧХ КИХ-фильтров для УСВИ класса Р

Результаты синтеза фильтров представлены на рис.9 и рис.10. Первый и второй фильтры (кривые 1 и 2) соответствуют классу точности 0,5, а третий и четвертый фильтры (кривые 3 и 4) классу точности 0,2. Для наглядности на рис.8 приведена амплитудно-частотная характеристика усредняющего КИХ-фильтра с прямоугольной импульсной характеристикой (кривая 5).

Два первых фильтра имеют чуть большую по сравнению с фильтром с прямоугольной импульсной характеристикой длину импульсной характеристики, но обладают значительно

меньшими погрешностями при отклонении частоты (более чем в 10 раз) и обладают значительно лучшими характеристиками по подавлению аperiodических составляющих.

Следует отметить, что быстродействие фильтра может быть меньше или равно длине импульсной характеристики фильтра при выполнении условия подавления аperiodических составляющих к моменту завершения собственных переходных процессов в фильтре. В фильтрах 1÷4 это условие выполняется, а в фильтре 5 нет. Поэтому в последнем случае быстродействие фильтра будет определяться временем затухания ослабленных аperiodических составляющих до заданного уровня.

Проиллюстрируем сказанное графиками переходных процессов фильтров 1 (кривая 1) и 5 (кривая 2), связанных с оценкой модуля синхронизированного вектора тока, при наличии во входном сигнале синусоидальной полезной составляющей с частотой $\omega_1 = 2\pi 55$ рад/с и такого же уровня аperiodической составляющей с коэффициентом затухания 60 с^{-1} (рис.11). Данный пример связан с использованием фильтра для реализации токовой отсечки. Уровень тока, подаваемый на защиту, соответствует 110% от тока уставки защиты.

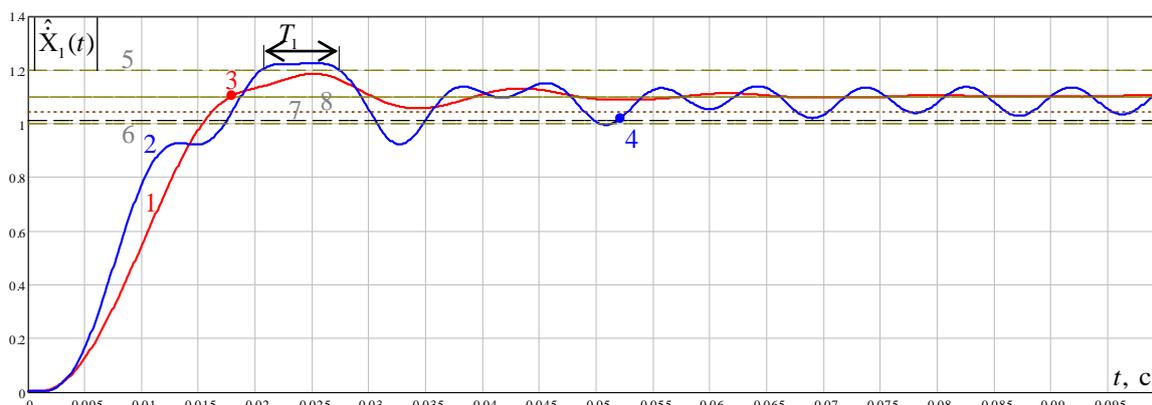


Рис. 11: График переходного процесса

На графиках показаны зона допустимых погрешностей для защиты 10%, ограниченная прямыми 5 и 6. Линиями 7 и 8 показаны уровни возврата защиты при коэффициентах возврата соответственно 0,92 и 0,95.

Из представленных графиков следует, что для рассматриваемого случая быстродействие синтезированного фильтра составляет 18 мс (точка 3), а для фильтра с прямоугольной импульсной характеристикой длиной 20 мс быстродействие составляет 52 мс (точка 4). Кроме того, необходимо отстроится от ложного срабатывания защиты вследствие высокого перерегулирования переходного процесса при наличии аperiodической составляющей. Как следует из приведенного графика, это время составляет $T_1 = 7$ мс. С учетом задержки время срабатывания составит 59 мс при коэффициенте возврата защиты 0,92, т.е. почти в 3 раза больше длительности импульсной характеристики фильтра. При коэффициенте возврата 0,95 и выше необходимо ввести замедление на возврат защиты, что связана с большими погрешностями фильтра при отклонении частоты от номинального значения.

Следует отметить, что все синтезированные фильтры для класса Р и фильтры 2 и 3 для класса М обладают лучшими динамическими характеристиками, чем фильтр с прямоугольной импульсной функцией. Безусловно, что для идеального случая ($\omega_1 = \omega_0$, отсутствие аperiodических составляющих и других помех), фильтр с прямоугольной характеристикой имеет незначительное преимущество по быстродействию порядка 3 мс по сравнению с фильтром 1. Но, как известно, быстродействие фильтров для РЗА должно оцениваться по наихудшему случаю [8].

В результате синтеза получили фильтры, обеспечивающие универсальные алгоритмы, пригодные как для УСВИ класса Р, так и для устройств РЗА, так и для измерения параметров режима электрической сети с высоким классом точности. При этом быстродействие синтезированных фильтров при наличии помех в виде высших гармоник и свободных

составляющих электромагнитных переходных процессов значительно превышает быстродействие наиболее популярного фильтра, применяемого в устройствах РЗА.

Следует отметить важность получения предельных характеристик по быстродействию для традиционной группы алгоритмов УСВИ. Это позволит правильно подойти к синтезу сложных адаптивных и нестационарных алгоритмов обработки сигналов УСВИ и исключить алгоритмы, требующие значительных вычислительных мощностей микропроцессоров УСВИ, но обладающих значительно худшими динамическими и статическими характеристиками и обладающие высокой чувствительностью даже к сверхмалым шумам входных сигналов УСВИ.

4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование методов нелинейной оптимизации с ограничениями на значения частотных характеристик фильтра в координатах комплексной частоты позволяет получить решения, близкие к предельным по быстродействию при заданной точности обработки сигналов.

В определенной степени полученные результаты синтеза фильтров для УСВИ класса М и УСВИ класса Р следует расценивать как субоптимальные, так как они зависят от количества компонент КИХ-фильтра заданной структуры, способа их соединения, выбора метода оптимизации и т.д. Требуется проведения большого количества расчетов с последующим анализом результатов.

Но такой подход существенно лучше простого перебора имеющихся временных окон и позволяет получить решения, которые значительно превосходят известные по быстродействию. Кроме того, использование полученных результатов позволяет создавать многофункциональные устройства с поддержкой технологии векторных измерений.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kezunovic M., Meliopoulos S., Venkatasubramanian V., Vittal V. Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks. NY, Springer, 2014.
- [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] Phadke A.G., Thorp J.S. Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. NY, Springer Science & Business Media, 2008.
- [4] IEEE C37.118.1-2011/C37.118.1a. Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems.
- [5] 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.
- [6] Understanding microprocessor-based technology applied to relaying // Report of Working Group I16 of the Relaying Practices Subcommittee IEEE, 2004.
- [7] Ванин В.К., Мокеев А.В. Современные методы обработки сигналов в технике релейной защиты // Тр. ЛПИ, вып.421. Ленинград, 1986. С.111-123.
- [8] Ванин В. К., Павлов Г.М. Релейная защита на элементах вычислительной техники. 2-е изд. Л, Энергоатомиздат, 1990.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Mokeev A.V. Optimal filter synthesis // in Proc. IEEE International Siberian Conference on Control and Communications. Krasnoyarsk, 2013. P.1-4.
- [12] Model 1133A Power Sentinel. Power Quality. Revenue Standard. Operation manual. Arbiter Systems, Inc., Paso Robles, CA 93446. U.S.A.