



PS1 – S1-05



Совершенствование алгоритмов оценки параметров переходных процессов для релейной защиты и автоматики с использованием современных методов цифровой обработки сигналов

Т.Г. КЛИМОВА¹, А.И. РАСЩЕПЛЯЕВ²
МЭИ (ТУ)¹, ОАО «СО ЕЭС»²

Россия

air@so-ups.ru

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Переходный процесс электроэнергетических систем, оконное преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, комплексные вейвлеты, волновой спектр, скейлограмма, оценка частоты, фазы и амплитуды синусоидальных колебаний, точность оценки и время обработки.

1 ВВЕДЕНИЕ

В связи со стремительным развитием энергетической отрасли, а именно ростом энергопотребления и соответственно ростом генерирующих мощностей все более актуальное становится задача обеспечения динамической устойчивости системы. Данная задача предполагает повышение быстродействия, чувствительности и надежности работы релейной защиты и автоматики (РЗА). Выполнение предъявляемых требований к устройствам РЗА во многом зависит от параметров входных сигналов, полученных от измерительных преобразователей тока и напряжения. Поэтому большую роль отводится алгоритмам цифровой обработки сигналов.

Предметом исследования являются способы повышения точности оценок параметров нестационарных процессов при ограниченном времени наблюдения.

В настоящее время для оценки параметров переходного процесса используется в основном оконное преобразование Фурье (ОПФ). Данный способ оценки не дает наглядного представления о составе переходного процесса и имеет ограниченную точность определения параметров промышленной частоты при недостаточном времени наблюдения.

В докладе рассматривается современный метод цифровой обработки сигналов (вейвлет-преобразование (ВП)), направленный на анализ нестационарных процессов, показываются возможности ВП для повышения наглядности представления информации о составе переходного процесса (ПП) и повышения точности определения оценок составляющих ПП.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Как известно, переходные процессы в электроэнергетике носят нестационарный характер, т.е. частотный состав сигнала изменяется во времени случайным образом, составляющие спектра появляются и исчезают во времени. Используемые в таких условиях алгоритмы оценки параметров переходных процессов для релейной защиты и автоматики, построенные на традиционном ОПФ, не обеспечивают противоречивые требования быстродействия и точности. Основная проблема оценки параметров заключается в том, что ограничение во времени преобразования приводит к большим погрешностям оценки частотного состава. В соответствии с принципом неопределенности попытка улучшить

разрешение в частотном диапазоне приводит к увеличению времени преобразования и наоборот.

2.1 Наглядность представления информации

Как уже отмечалось в [3] для исследования переходных процессов в электроэнергетике наиболее целесообразно использовать вейвлет – преобразование, имеющее существенные преимущества по сравнению с методами цифровой обработки сигналов, используемыми в современных терминалах микропроцессорной техники. Также в [1,2] показано, что точность оценки параметров в большой степени зависит от подобия исследуемых сигналов и используемых вейвлетов. Расчеты показали, что для оценки параметров переходных процессов наиболее удобным и точным является комплексный хорошо локализованный во времени и пространстве вейвлет Морле (Morlet), который описывается функцией:

$$\psi(t) = \exp(-t^2/\alpha^2) [\exp(ik_0 t) - \exp(-k_0^2 \alpha^2/4)]$$

где параметры α и k_0 определяют длительность и частоту заполнения вейвлета

При использовании комплексного вейвлета формируется матрица комплексных значений волнового спектра, показывающего состав исследуемого сигнала. Для наглядного представления волнового спектра в трехмерном пространстве используются модуль, аргумент, действительная и мнимая части комплексного числа в зависимости от поставленной задачи.

Применение вейвлет - преобразования иллюстрируется на примере анализа реального переходного процесса $u_0(t)$, зафиксированного на одной из подстанций Нижнего Новгорода (рис.1). На иллюстративном рисунке, полученном с помощью Ретомы, показан исследуемый процесс $u_0(t)$ (рис.1,а) и гармонический состав процесса (рис. 1,б) в окне наблюдения, выделенном прямоугольником, ширина окна наблюдения 0.02 сек. ОПФ определяет наличие не менее восьми гармонических составляющих, строго кратных 50 Гц.

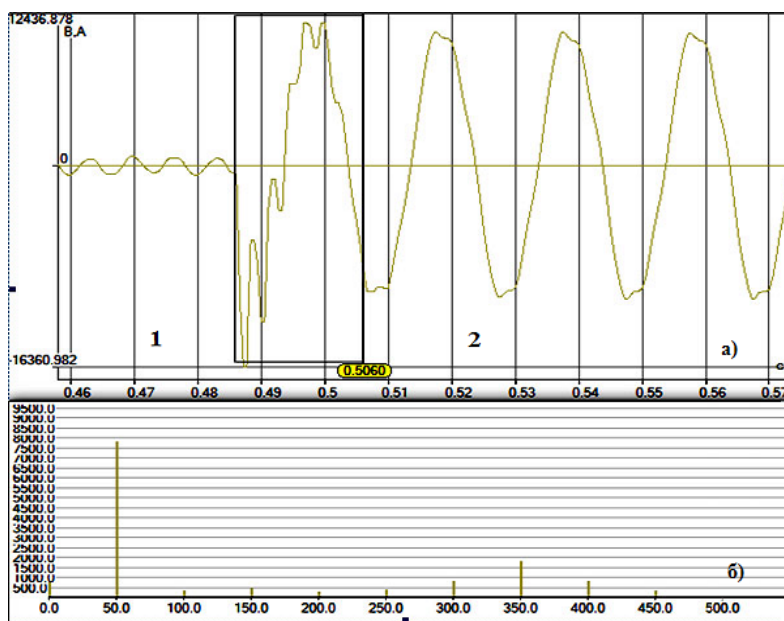


Рис. 1: Исследуемый переходной процесс $u_0(t)$

В данном примере действительная часть комплексного спектра, полученного в результате ВП, дает более наглядное разделение временного сигнала на частотные составляющие спектра по сравнению с модулем. Для определенности исследуемый процесс разделен на два участка «до возмущения» (1) и «после возмущения» (2). Действительная часть волнового спектра $u_0(t)$ показана на рис. 2. Видно, что до возмущения было напряжение небаланса, а после возмущения имеются в отличие от данных ОПФ (рис.1,б) только две составляющие: составляющая промышленной частоты и колебательная затухающая составляющая, по частоте существенно превышающая основную.

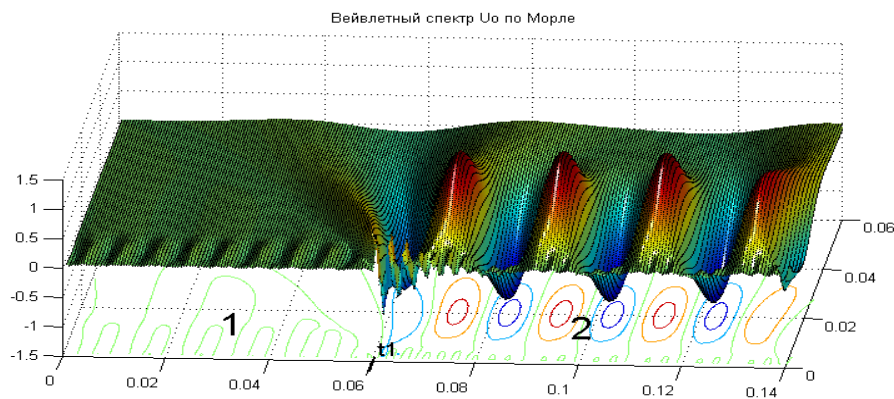


Рис. 2: Действительная часть волнового спектра процесса $u_0(t)$.

Представляет интерес оценка параметров переходного процесса за время накопления данных в течение 0.02 сек. Процесс оценки параметров переходного процесса на временном отрезке, определенном прямоугольным выделением на рис. 1.а), показан на рис. 3.

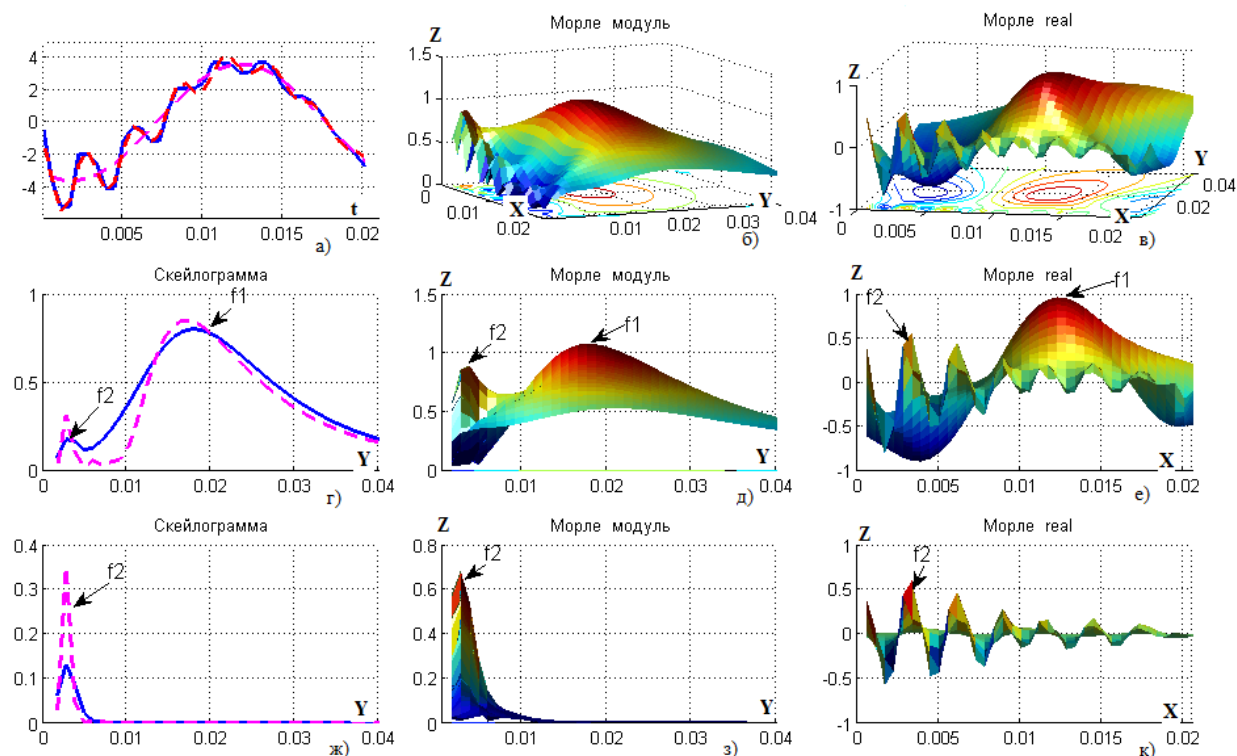


Рис. 3: Оценка параметров переходного процесса

На рис. 3.а) синей сплошной линией показана часть переходного процесса, выбранная для оценки параметров. Красный пунктир – восстановленный переходной процесс по результатам обработки, а фиолетовый пунктир – восстановленная составляющая промышленной частоты. Синяя и красная линии практически совпадают, что говорит о качестве оценок параметров.

На рис. 3.б) показан модуль волнового спектра ВП, а на рис. 3.в) его действительная часть. На обоих рисунках хорошо видно разделение переходного процесса на составляющие. По оси Z откладываются рассчитанные значения волнового спектра, по оси X откладывается сдвиг во времени (б), а по оси Y - временной масштаб (а), обратно пропорциональный частоте.

Для оценки количественного состава, как правило, используется скейлограмма (рис. 3.г,ж), она представляет собой сумму квадратов волнового спектра по параметру сдвига во времени (б). Скейлограмма рис. 3.г), рассчитанная двумя способами, показывает наличие в переходном процессе двух волновых составляющих, по максимуму значений скейлограммы

возможно приблизительно оценить значения частот этих составляющих. Аналогичное представление дает и рассмотрение проекции Z-Y (рис. 3.д). Менее отчетливо количество гармонических составляющих определяется по проекции Z-X (рис. 3.е), но эта проекция показывает фазовые соотношения синусоидальных процессов по отношению к началу отсчета.

После оценки параметров основной частоты ее восстановленное значение вычитается из временного представления анализируемого переходного процесса (рис. 3.а), Скейлограмма оставшегося процесса представлена на рис. 3.ж. Точка 0.02 оси Y соответствует частоте 50 Гц. В окрестности этой частоты получено нулевое значение скейлограммы, что означает отсутствие основной гармоники в оставшемся сигнале, следовательно параметры основной частоты определены с высокой точностью. Аналогичный результат наблюдается в проекции Z-Y волнового спектра (рис. 3.з). Проекция Z-X (рис. 3.к) также показывает подавление первой гармоники. По этой проекции можно оценить визуально синусоидальность оставшегося процесса, в данном примере видно присутствие недетерминированной помехи.

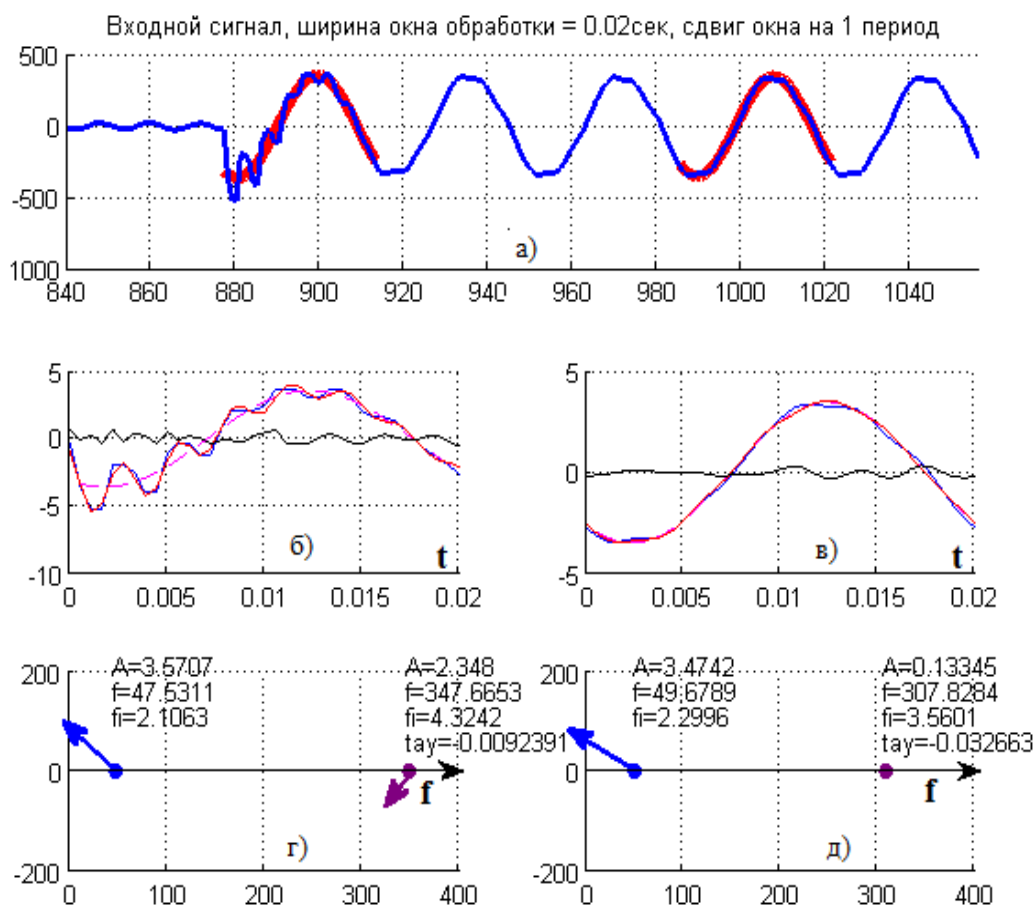


Рис. 4: Визуализация состава переходного процесса

Подробное рассмотрение получения оценок параметров переходного процесса дано для иллюстрации точности получения этих оценок. При текущей оценке параметров переходного процесса достаточно реализовать основной алгоритм оценки параметров всех колебательных составляющих. Использование полученных оценок позволяет наглядно представить состав переходного процесса (рис. 4 г, д). На рис. 4.а) показан длительный отрезок переходного процесса, используемый для анализа, красным показаны два окна, длительностью 0.02 сек, в которых проведена оценка параметров переходного процесса и представлено векторное изображение состава переходного процесса. Первое окно дает оценки параметров в начале возмущения. Второе - через несколько периодов. На рис. 4.б, в) показаны исследуемые участки переходного процесса, его оценка и их разность, имеющая недетерминированный характер.

Состав переходного процесса целесообразно представлять в виде набора векторов (рис. 4, г, д). Начало вектора располагается на оси частот в точке значения оценки частоты, Длина вектора пропорциональна оценке амплитуды, а фаза откладывается в положительном направлении от положительного направления оси частот. При плавном передвижении окна оценки параметров вектора вращаются в положительном направлении, а длины векторов меняются в соответствии с затуханием рассматриваемой составляющей.

2.2 Оценка параметров переходного процесса для систем мониторинга переходных режимов

Векторный регистратор данных должен обеспечивать скорость передачи данных в один, два и пять периодов [4] промышленной частоты, при этом обеспечивать заданную погрешность определения данных, которая оценивается общей ошибкой TVE (Total vector error),

$$TVE = \sqrt{\frac{(X_r(n) - X_r)^2 + (X_i(n) - X_i)^2}{X_r^2 + X_i^2}} \quad (3)$$

где $X_r(n)$ и $X_i(n)$ - измеренные значения, переданные регистратором, а X_r и X_i - теоретические значения входного сигнала в момент при известных условиях X_m , ω и φ .

Рассмотрены возможные алгоритмы регистраторов, основанные на методе наименьших квадратов (МНК), оконном преобразовании Фурье и вейвлет-преобразовании. С помощью МНК осуществляется нелинейная аппроксимация наблюдаемого процесса синусоидальной функцией, т.е. выполняется аппроксимация исследуемого процесса выбранной нелинейной функцией методом минимизации невязки (разности между измерениями и выбранной функцией). Наиболее часто используется алгоритм на основе оконного преобразования Фурье. Впервые разработан алгоритм на основе вейвлет преобразования. Проверка алгоритмов осуществляется в стационарном и динамическом режимах.

Для проверки алгоритмов в стационарном режиме необходимо оценить погрешность оценки параметров TVE при отклонении частоты сигнала от номинального значения ± 0.5 Гц, амплитуде высших гармоник 1% и при наличии белого шума, имеющего среднеквадратическое отклонение 1%, что соответствует максимальному отклонению 3% и дисперсии 0.0001. Допускается общая ошибка до 1%.

Алгоритм на основе ОПФ требует не менее 2-х периодов для получения оценки параметров, а для алгоритмов на основе МНК и ВП используются два временных интервала, 1 и 2 периода, интервал дискретизации равен максимально допустимому, сто выборок в период.

На рис.5 показан результат оценки параметров тремя алгоритмами при частоте входного сигнала 50.5 Гц и вышеперечисленных требованиях. На рис 5.а-д) оценка параметров проводится окном шириной 0.04 с, сдвигающимся на 0.02 с. На оси x порядковый номер произведенной оценки. Представлены реальные значения и оценки амплитуды (рис.5.а) и частоты (рис.5.б), рассчитаны погрешности оценок амплитуды (в процентах, рис.5.в) и частоты (рис.5.г). Оценка фазы не показывается, но ее точность существенно влияет на общую ошибку оценки вектора (TVE). Ошибка TVE рис.5.д) относится к оценкам, полученным с использованием окна шириной 2 периода. На рис.5.е показана общая ошибка для алгоритмов на основе МНК и ВП при использовании окна оценки 0.02 с.

Расчеты показывают, что наиболее точную оценку параметров за меньшее время окна обработки наблюдаемого сигнала дает алгоритм на основе ВП. Недостатки алгоритма на основе МНК состоят в большом времени получения оценки и проблемах сходимости к заданной функции при неопределенных начальных условиях, момент не предсказуемой сходимости показан овалом на рисунке 5.е. Погрешность достигает сотни процентов.

Проверка алгоритмов в динамическом режиме производится при оценке параметров модулированных сигналов

$$X = X_m [1 + k_x \cos(\omega t)] \cdot \cos [\omega_0 t + k_a \cos(\omega t - \pi)] \quad (4)$$

при номинальной частоте и заданных параметрах модуляции: частота модуляции $f_m = \omega/2\pi$ изменяется в пределах от 1 до 3 Гц (для иллюстрации используется $f_m = 1$ Гц), глубина модуляции амплитуды $k_x = 0.1$ и частоты $k_a = 0.1$. Допускается общая ошибка оценки до 3%.

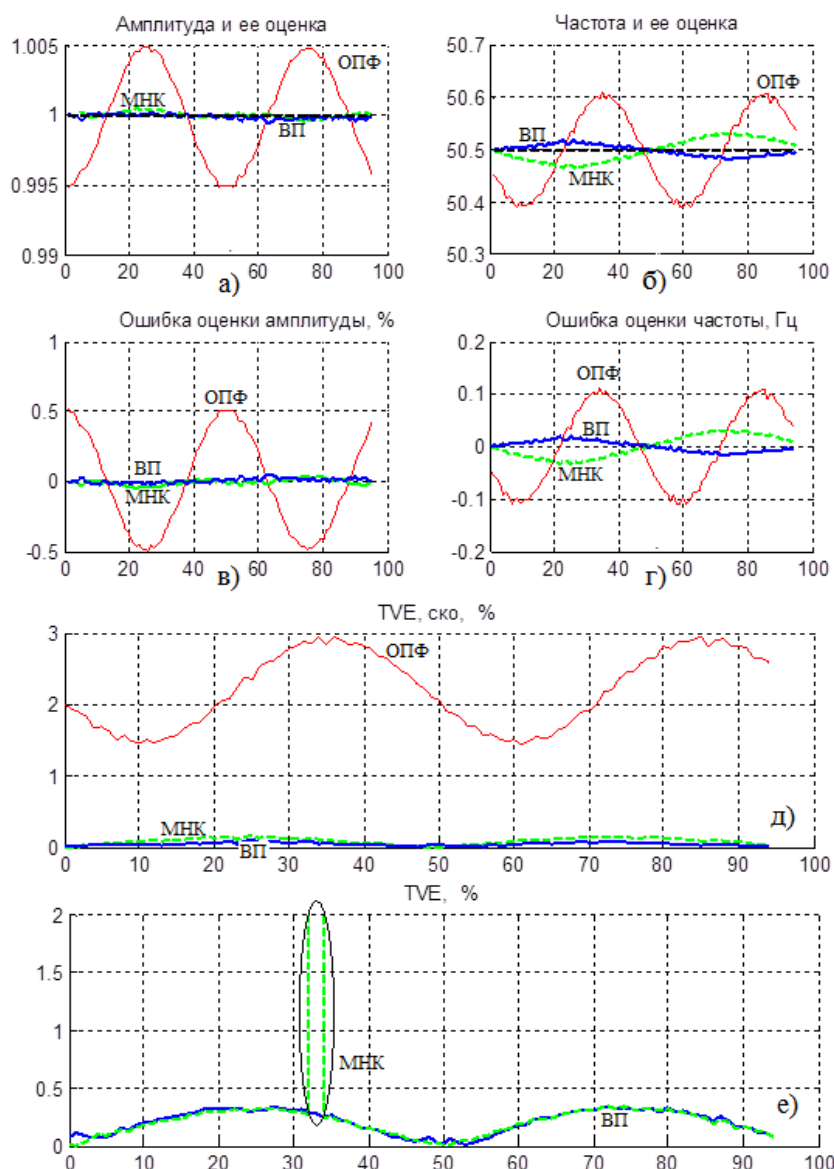


Рис. 5: Проверка алгоритмов регистраторов в стационарном режиме

Рассмотрены алгоритмы на основе МНК, Фурье и вейвлетов. Для МНК и вейвлетов используется 1 и 2 периода промышленной частоты для оценки параметров, для Фурье только 2 периода. На рис.6 показан результат оценки параметров модулированного сигнала тремя алгоритмами. На рис. 6.а-д) оценка параметров проводится окном шириной 0.04 с, сдвигающимся на 0.02 с. На оси x порядковый номер произведенной оценки. Рис.6.а-г иллюстрируют соответственно изменения амплитуды и частоты, их оценок и погрешностей оценок. Общая ошибка оценок TVE при использовании интервала обработки сигналов 0.04 с. представлена на рис.6.д, а на рис.6.е показана общая ошибка для алгоритмов на основе МНК и ВП при использовании окна оценки 0.02 с.

Изменение частоты за время обработки равно $-ka \cdot f_m \cdot \sin(2\pi \cdot f_m \cdot t - \pi)$, в расчетном примере при $f_m = 1\text{Гц}$ и времени обработки 0.02 мс частота меняется на $0.1 \cdot 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 1 \cdot 0.02) = 0.0125\text{ Гц}$, а при времени получения оценок 0.04 мс частота меняется на $0.1 \cdot 1 \cdot \sin(2\pi \cdot 1 \cdot 0.02) = 0.0249\text{ Гц}$. Вейвлет-преобразование и МНК дают оценку частоты, соответствующую среднему за время расчета значению частоты, сравнение оценки частоты и амплитуды с истинным значением также происходит в середине диапазона оценки. Основная причина погрешности оценок параметров изменение значений параметров в течение времени оценки, оценки получаются усредненными.

Расчеты показывают, что наиболее точную оценку параметров за меньшее время окна обработки наблюдаемого сигнала дает алгоритм на основе ВП.

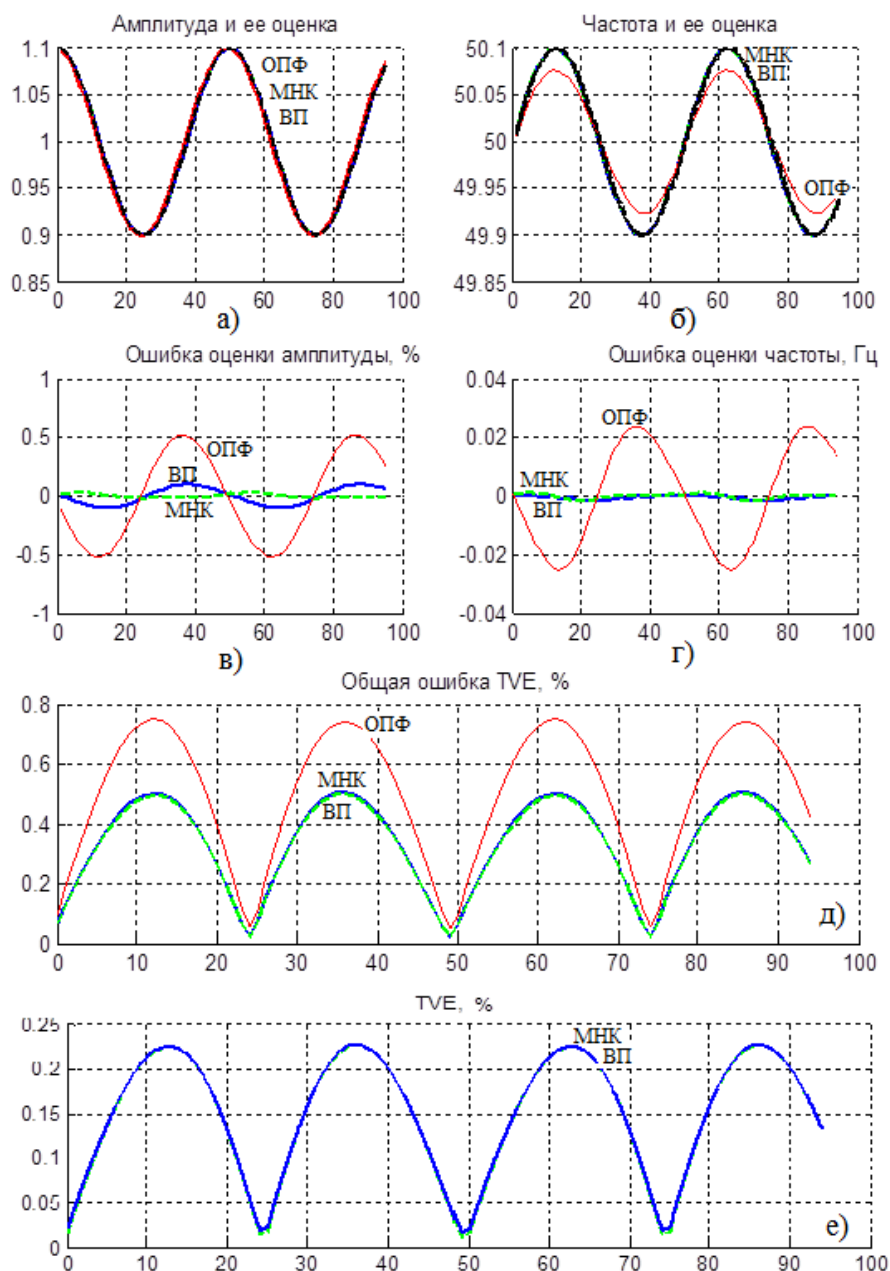


Рис. 6: Проверка алгоритмов регистраторов в динамическом режиме

2.3 Оценка параметров промышленной частоты за время, меньшее периода.

При оценке параметров на ограниченном времени существенную погрешность в оценивание параметров вносит краевой эффект [3]. Авторская методика коррекции краевого эффекта позволяет подавить его влияние и получить высокую точность оценки на коротких временах оценки. На рис.7. показано получение ортогональных составляющих с применением ОПФ, для этого требуется время обработки более одного периода, и с применением вейвлета Морле на интервале наблюдения, равном 0.01 с. Результаты расчетов в моменты 1 и 2 формируют необходимые ортогональные составляющие. Сравнение одноименных ортогональных составляющих показывает идентичность результатов.

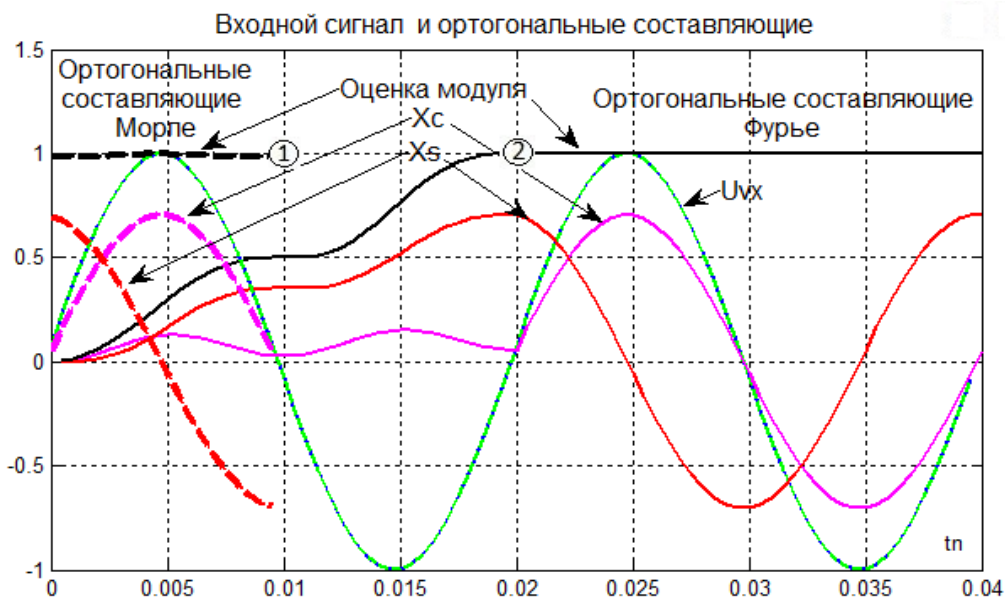


Рис. 7: Формирование ортогональных составляющих ОПФ и ВП

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные алгоритмы позволяют определить количественный состав переходных процессов и оценить параметры его составляющих (частоту, фазу и амплитуду всех колебаний, а также затухание аperiodической и высших квазигармонических составляющих), наглядно представить переходной процесс. В зависимости от требований данные алгоритмы предполагают работу в режимах «он-лайн» (для релейной защиты и пусковых органов противоаварийной автоматики) и «офф-лайн» (анализ переходных процессов). Рассмотрено влияние различных длительностей окон обработки сигналов на точность получаемых оценок, показана возможность оценки параметров основной частоты за время, меньшее периода.

4 ВЫВОДЫ

1. Вейвлет-преобразование является наглядным способом исследования переходных процессов;
2. Правильный выбор вейвлета и его параметров позволяет получить оценки параметров переходных процессов, точность которых на порядок выше аналогичных оценок, вычисленных с помощью ОПФ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Короновский А. А., Храмов А. Е. Непрерывный вейвлет - анализ и его приложения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 176 с.
- [2] Витязев В.В. Вейвлет анализ временных рядов: Учебное пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. – 58с.
- [3] Климова Т.Г., Расщепляев А.И. Применение вейвлет- преобразования для исследования переходных процессов // Релейщик, №3, октябрь 2010 г.