

УДК 681.5.09

ПРОГРАММНОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АППАРАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ СНИЖЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИСКАЖЕНИЙ В СЕТЯХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

¹Горева Т.С., ²Портнягин Н.Н.¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, филиал,
Севастополь, e-mail: tatyana-goreva@yandex.ru;²Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва

В статье представлена разработка алгоритмического и программного обеспечения аппаратных комплексов повышения качества питающей электроэнергии в распределительных сетях методами активной цифровой фильтрации. Разработан алгоритм идентификации составляющих сигналов сети с применением ортогонального вейвлет-базиса. Экспериментально доказано, что наиболее опасными являются широкополосные импульсные помехи с аperiodической составляющей. При сравнении алгоритмов активной фильтрации установлено, что применение Фурье базиса требует высокого порядка фильтра, что приводит к значительной фазовой задержке и погрешности. Произведен выбор-вейвлет базисов для более эффективной идентификации структурных составляющих сигналов питающего напряжения. В статье представлено решение комплексных задач, направленных на повышение качества электроэнергии в электроэнергетических системах. В результате проведенных исследований разработано математическое и программное обеспечение активного компенсатора кондуктивных помех в электроэнергетических системах. Разработаны алгоритмы и методика идентификации структурных составляющих несинусоидальных сигналов сети (напряжения и тока) в электроэнергетической системе с применением ортогональных вейвлет-базисов Добеши. Применение разработанного комплекса программ обнаружения нарушений показателей качества электрической энергии во время мониторинга позволяет контролировать качество электрической энергии в режиме реального времени. Отсутствует необходимость сбора статистических данных, разработанные методы позволяют своевременно применять алгоритм улучшения качества электрической энергии.

Ключевые слова: качественные показатели электроэнергии, активная фильтрация, цифровая обработка, ортогональный вейвлет-базис, вейвлет-преобразование, анализатор импульсных помех, идентификация структурных компонент

SOFTWARE AND ALGORITHMIC SUPPORT OF HARDWARE SYSTEMS REDUCING THE IMPACT OF PULSE DISTORTION IN POWER NETWORKS

¹Goreva T.S., ²Portnyagin N.N.¹Lomonosov Moscow State University, branch, Sevastopol, e-mail: tatyana-goreva@yandex.ru;²Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow

The article presents development of algorithms and software and hardware systems improve the quality of supply of electricity in distribution networks through an active digital filter. The algorithm of identification of the network signals components using an orthogonal wavelet basis is developed. It is experimentally proved that the most dangerous are broadband impulse noise with aperiodic component. When comparing the active filtration algorithms, it is established that the application of Fourier basis requires a high filter order, which leads to a significant phase delay and error. The choice of wavelet bases for more efficient identification of the structural components of the supply voltage signals is made. The article presents the solution of a set of tasks aimed at improving the quality of electricity in electric power systems. As a result of the carried out researches the mathematical and software of the active compensator of conductive hindrances in electric power systems is developed. The developed algorithms and methodology for identification of structural components of non-sinusoidal signals of the network (voltage and current) in the electric power system with the application of orthogonal wavelet bases. Application of the developed complex of programs of detection of violations of indicators of quality of electric energy during monitoring allows to control quality of electric energy in real time. There is no need to collect statistical data, the developed methods allow timely application of the algorithm to improve the quality of electrical energy.

Keywords: quality indicators of electric power, active filtering, digital processing, orthogonal wavelet basis, the wavelet transform, the analyzer of impulse noise, the identification of the structural component

Рост установленной мощности нелинейных резкопеременных нагрузок в автономных системах приводит в ряде случаев к ухудшению показателей качества электроэнергии.

Искажения синусоидальности кривых напряжений и токов вызываются работой электроприборов с нелинейной вольтамперной характеристикой и регулируемых пре-

образователей переменного тока в постоянный. Кривые тока и напряжения в этих случаях приобретают вид, отличный от синусоиды.

Первым проявлением низкого качества электроэнергии являются искажения формы синусоидального напряжения в цепях питания, отклонения напряжения за пределы установленных допусков или полные

прерывания подачи электроэнергии. Эти возмущения могут быть вызваны гармониками сетевой частоты или неполадками в системе электроснабжения. Они могут длиться от миллисекунд до секунд. Внешние возмущения обычно проявляются как неправильная работа оборудования или его полная остановка [1, 2].

В последнее время возник большой интерес в области разработки активных фильтров сетевой частоты, позволяющих компенсировать влияния высших гармоник, для улучшения качества электроэнергии.

При активной фильтрации основной задачей является разработка эффективного метода идентификации (выделение) кондуктивных помех в электрической сети. Устройство управления обеспечивает формирование соответствующих управляющих сигналов, под воздействием которых широтно-импульсный модулятор активного компенсатора генерирует компенсирующий сигнал.

Отклонения напряжения от номинальных значений, колебания напряжения и частоты, искажения симметрии и синусоидальности напряжений приводят к ряду нежелательных явлений. Увеличиваются потери электроэнергии в сетях и в электрооборудовании. Увеличение потерь электроэнергии в оборудовании вызывает дополнительный его нагрев, что приводит к сокращению сроков службы оборудования или необходимости увеличения его мощности.

Разработан активный компенсатор кондуктивных помех для электроэнергетической системы с идентификацией структурных составляющих в ортогональном вейвлет-базисе.

Научная новизна работы заключается в разработке методики выделения опорной частоты кривой тока (напряжения), а также компенсирующего сигнала помехи сети электропитания с применением вейвлет-преобразования.

Материалы и методы исследования

Сигналы сети электропитания (напряжение) содержат разномасштабные локальные возмущения. Временная протяженность и величина особенностей зависит от природы возмущений.

Для представления сигналов с локальными особенностями удобным и информативным является способ построения нелинейных аппроксимирующих схем с применением адаптивных фильтров. Наиболее эффективным методом реализации данной процедуры является вейвлет-анализ.

Экспериментальные исследования показали эффективность применения вейвлет-анализа для создания активного компенсатора кондуктивных помех в системах электроснабжения.

Применение разработанного активного компенсатора помех питающего напряжения дает возможность в режиме реального времени компенсировать помехи, вызванные применением электрооборудования с нелинейными вольт-амперными характеристиками, тем самым улучшить качество электроэнергии в системах электроснабжения [3].

Наличие высших гармонических составляющих в токах нелинейных электропотребителей приводит к разрушительным последствиям.

1. Импульсный характер нагрузки приводит к деформации синусоиды напряжения, действующей на зажимах нагрузки.

2. Нелинейные нагрузки генерируют высокочастотные гармоники тока, что вызывает дополнительные потери в обмотках трансформатора. Так, для линейных нагрузок потери на вихревые токи составляют в общих потерях приблизительно 5%, а с нелинейной нагрузкой они возрастают до 75% [4].

3. Высшие гармоники напряжения уменьшают емкостное сопротивление компенсирующих конденсаторов. Напряжения высших гармоник вызывают значительные токи гармоник, что приводит к скорому старению изоляции и возникновению перегрузки по току.

4. Высшие гармоники ухудшают механические характеристики и КПД синхронных и асинхронных машин. Ускоряют старение изоляции электрических машин, кабелей и трансформаторов [4].

5. Под воздействием высших гармоник нарушается работа устройств электронной автоматики [5].

Электроэнергетическая система является системой со сложной электромагнитной обстановкой, в которой существуют различного вида помехи, воздействующие на цепи питания.

Для анализа структуры сигнала сети разной длительности необходимы частотно-временные составляющие с различными временными характеристиками.

Ортонормированные вейвлеты являются носителями подробностей, необходимых для повышения разрешения аппроксимации сигнала.

Свойство частотной и временной локализации вейвлет-функций может быть охарактеризовано концентрацией их энергии в частотной и временной областях, или посредством частотно-временных окон [6].

На базе процедур вейвлет-анализа разработана методика фильтрации сигнала питающего напряжения, для обеспечения качественного подавления интергармонических составляющих и импульсных помех [7].

Вейвлет-функция может описывать сложный сигнал во временном и частотном представлении с большой точностью.

Определим требования к вейвлет-базису:

- максимально точное выделение основной гармоники 50 Гц, а также высших гармонических составляющих;
- оптимальное количество уровней детализации вейвлет-дерева;
- минимальная длина вейвлет-разложения.

Важной задачей является выбор вейвлет-фильтра, позволяющего максимально точно восстанавливать сигнал сети после прямого и обратного вейвлет-разложения.

В теории вейвлет-анализа существует большое число различных семейств базисных вейвлет-функций.

Важным свойством базисных функций является свойство ортогональности. Оно обеспечивает представление функции f в виде суммы ортогональных компонент:

$$\forall f \in L^2(R) \exists! f(t) = \dots + v_{-1}(t) + v_0(t) + v_1(t) + \dots, v_i \in W_i, i \in Z.$$

Основной принцип работы алгоритма вейвлет-преобразования сетевых сигналов состоит в разложении приближения сиг-

нала на две компоненты: аппроксимирующую и детализирующую, а также их дальнейшее дробление для увеличения уровня декомпозиции сигнала. Этот алгоритм работает как во временной, так и в частотной областях.

Вейвлет Добеши является ортогональным и имеет минимальный компактный носитель при заданном числе нулевых моментов. С возрастанием числа нулевых моментов возрастает гладкость вейвлета, что способствует более четкому представлению детализирующих компонентов сигнала.

Вейвлеты Добеши вычисляются с помощью сопряженных зеркальных фильтров для конечных импульсных откликов h , где h есть тригонометрический многочлен [6]:

$$h(w) = \sum_{n=0}^{N-1} h[n] e^{-inw}.$$

Численные методы построения аппроксимирующей схемы построим на основе алгоритма:

1) очистка от шума с помощью пороговой функции и с применением вейвлет-пакета;

2) определение критериев выбора вейвлет-базиса, выделение информативных ветвей дерева, формирование структуры лучшего дерева аппроксимации (рис. 1);

3) идентификация локальных особенностей сигнала тока на основе лучшего дерева вейвлет-разложения по базису [3].

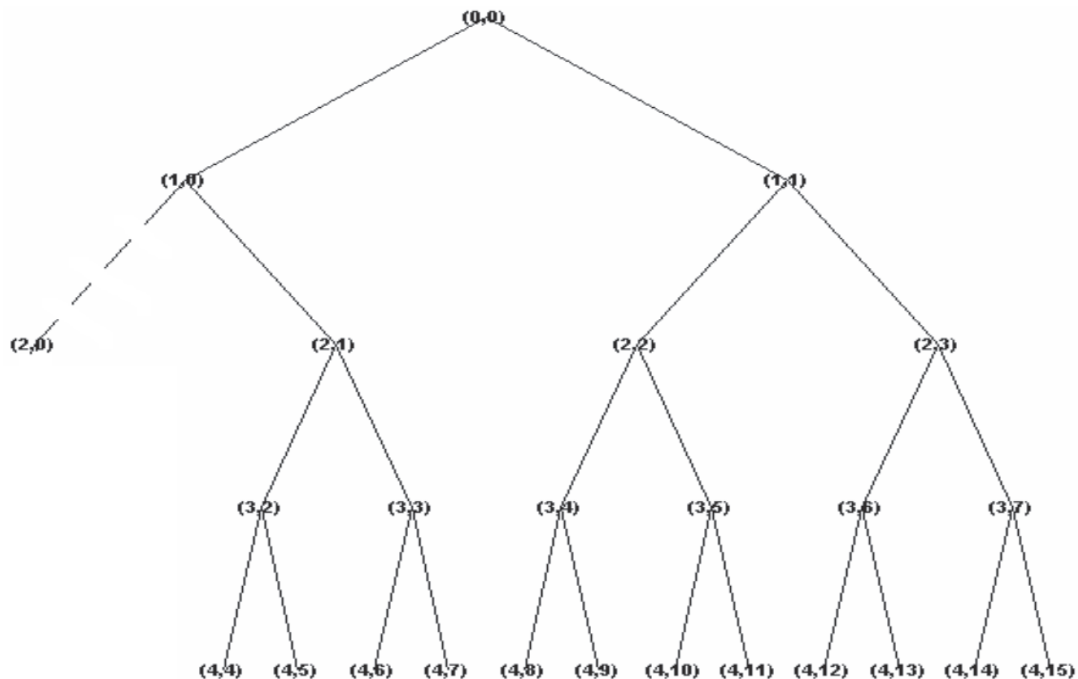


Рис. 1. Выделение информативных ветвей дерева вейвлет-разложения по базису db4

Процедура определения структуры дерева разложения для конкретного сигнала может быть выполнена путем реализации следующего рекурсивного алгоритма:

1) разложение сигнала сети в базисе вейвлет-дерева: $W_j^0 : W_j^0 = \bigoplus_{i=1}^I W_{j_i}^{p_i}$, $\{\Psi_{j_i}^{p_i}(2^{j_i}t - n)\}_{n \in \mathbb{Z}}$ есть базис пространства $W_{j_i}^{p_i}$;

2) выбор информативных ветвей дерева, определяющих структурные компоненты сигнала сети, где наилучший базис O_j^p пространства W_j^p есть базис

$$O_j^p = \begin{cases} \{\Psi_j^p(2^j t - n)\}_{n \in \mathbb{Z}}, & \text{если } \sum_{n \in I_M^p} |\langle y, \Psi_{j,n}^p \rangle|^2 \geq \sum_{n \in I_M^{2p}} |\langle y, \Psi_{j+1,n}^{2p} \rangle|^2 + \sum_{n \in I_M^{2p+1}} |\langle y, \Psi_{j+1,n}^{2p+1} \rangle|^2 \\ \{\Psi_{j+1}^{2p}\}_{n \in \mathbb{Z}} \cup \{\Psi_{j+1}^{2p+1}\}_{n \in \mathbb{Z}}, & \text{если } \sum_{n \in I_M^p} |\langle y, \Psi_{j,n}^p \rangle|^2 < \sum_{n \in I_M^{2p}} |\langle y, \Psi_{j+1,n}^{2p} \rangle|^2 + \sum_{n \in I_M^{2p+1}} |\langle y, \Psi_{j+1,n}^{2p+1} \rangle|^2 \end{cases}$$

где множества индексов $I_M^l, l = P, 2P, 2P+1$ определяются как

$$\text{индекс } n \in I_M^l, \text{ если } |\langle y, \Psi_{j,n}^l \rangle| \geq T, \text{ где порог } T = \frac{\text{Med}(\langle y, \Psi_{j,n}^l \rangle)}{0,7645}.$$

Назовем этот алгоритм алгоритмом идентификации структурных компонентов сигнала [7].

Результаты исследования и их обсуждение

С целью проверки выдвинутых положений проведем компьютерный модельный эксперимент с применением Matlab Wavelet Toolbox и графической среды имитационного моделирования Simulink [8].

В качестве эталонного сигнала для фильтрации определим модельный сигнал с импульсными помехами 100 В, моделирование производится в течение 3 с, с частотой дискретизации 2 кГц, фрагмент сигнала представлен на рис. 2. При обработке сигналов в среде Matlab применялись вейвлеты Добеши 4 (db4) [9].

Рассмотрим подробнее разложение модельного сигнала по вейвлет-дереву (рис. 1). На первом уровне разложения аппроксимация сигнала (1,0) отображает сигнал сети, здесь присутствуют основ-

ная частота и помеха, детализирующая ветка (1,1) состоит из высокочастотных колебаний, амплитуда помехи на два порядка меньше, чем амплитуда аппроксимации. На втором уровне разложения вейвлет-дерева осуществляется разделение крупномасштабной (2,0) и мелкомасштабной (2,1), (2,2), (2,3) составляющей сигнала сети.

Анализ сигнала (рис. 3, 4) показывает наличие широкого спектра гармонических составляющих. На рис. 4 отчетливо виден ряд максимумов сигнала сети. На рис. 3, 4 представлено трехмерное пространственное изображение спектра сигнала сети после вейвлет-преобразования, которое наглядно показывает изменение таких параметров, как, амплитуда, частота и время.

На рис. 5 представлены результаты компенсации импульсных помех с помощью представленных алгоритмов [10].

Принцип работы системы управления вейвлет-фильтрацией и прогнозом искажений представлен на рис. 6.

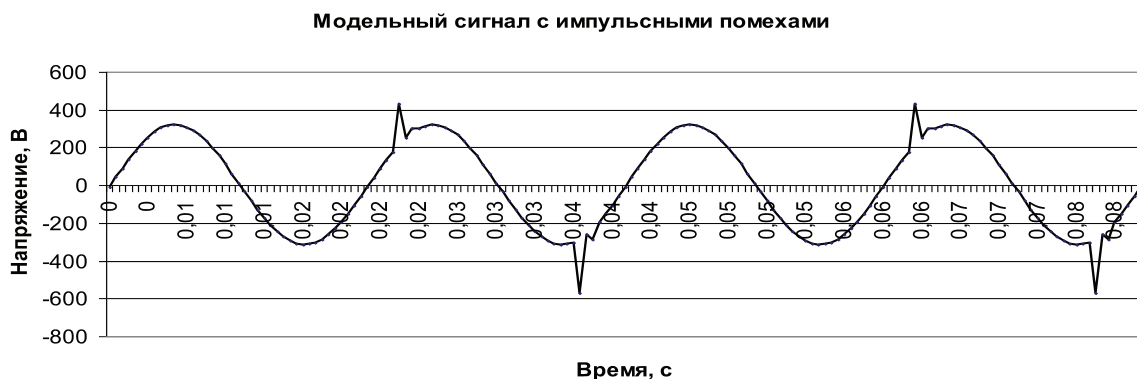


Рис. 2. Модельный сигнал с импульсными помехами

Применение разработанного комплекса программ обнаружения нарушений показателей качества электрической энергии во время мониторинга позволяет контролировать качество электрической энергии

в режиме реального времени. Отсутствует необходимость сбора статистических данных, разработанные методы позволяют своевременно применять алгоритм улучшения качества электрической энергии.

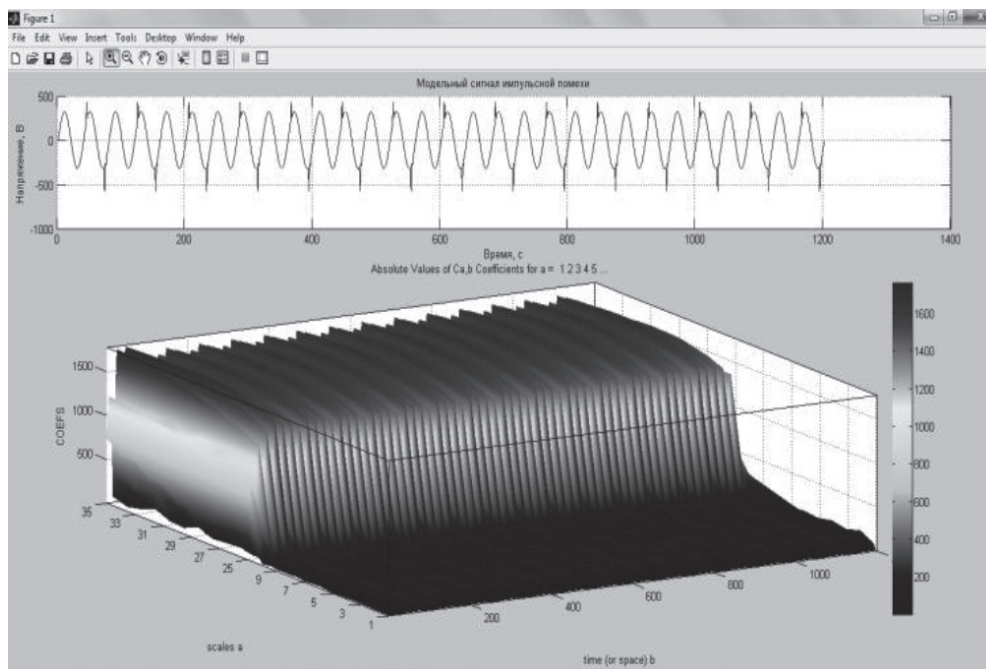


Рис. 3. Вейвлет-спектр модельного сигнала с импульсными помехами

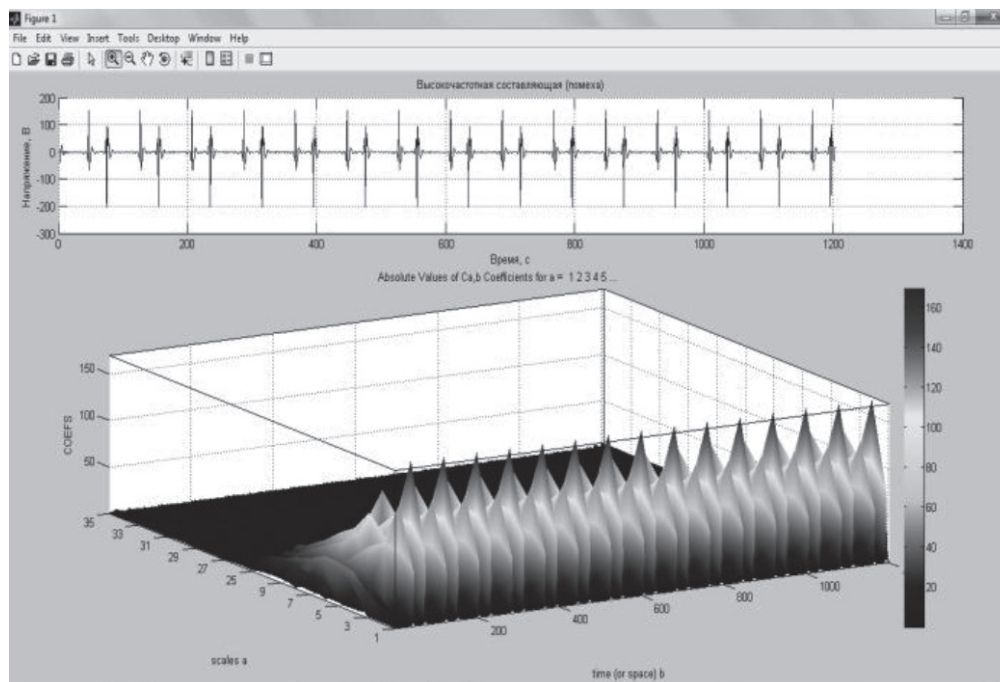


Рис. 4. Вейвлет-спектр с импульсными помехами
(выделенная высокочастотная составляющая сигнала)

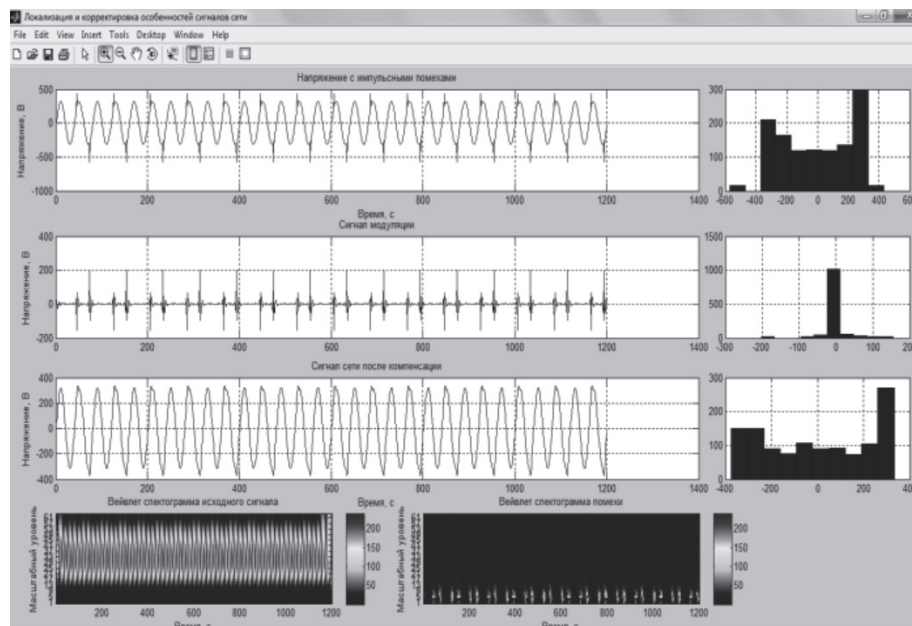


Рис. 5. Компенсация импульсных помех с применением вейвлет-анализа

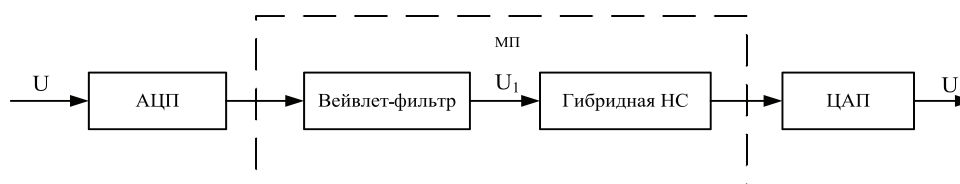


Рис. 6. Принцип работы системы управления вейвлет-фильтрацией и прогнозом искажений [11]

Заключение

В статье представлено решение комплекса задач, направленных на повышение качества электроэнергии в электроэнергетических системах. В результате проведенных исследований разработано математическое и программное обеспечение активного компенсатора кондуктивных помех в ЭЭС.

Полученные результаты:

1. Экспериментально доказано, что наиболее опасными являются широкополосные импульсные помехи с аperiodической составляющей.

2. При сравнении алгоритмов активной фильтрации установлено, что применение Фурье базиса требует высокого порядка фильтра, что приводит к значительной фазовой задержке и погрешности. Произведен выбор вейвлет-базисов для более эффективной идентификации структурных составляющих сигналов питающего напряжения.

3. Разработаны алгоритмы и методика идентификации структурных составляющих несинусоидальных сигналов сети (напряжения и тока) в электроэнергетической системе с применением ортогональных вейвлет-базисов Добеши.

Список литературы

1. Карташев И.И., Тульский В.Н. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев. – М.: МЭИ, 2008. – 320 с.
2. Куско А. Качество энергии в электрических сетях / А. Куско, Марк Томпсон. – М.: Додэка, 2008. – 333 с.
3. Горева Т.С. Программное и алгоритмическое обеспечения аппаратных комплексов повышения качества питающей электроэнергии в распределительных сетях: монография / Т.С. Горева, Н.Н. Портнягин. – М.: Издательский дом Академии Естествознания, 2015. – 118 с.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 6-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 375 с.
5. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.
6. Stephane Mallat. A Wavelet tour of signal processing. Пер. с английского. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
7. Горева Т.С. Методы построения активных фильтров подавления импульсных помех в сетях электропитания промышленных судов: монография / Т.С. Горева, Н.Н. Портнягин. – 2010. – 102 с.
8. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. 1-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 288 с.
9. Смоленцев Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в Matlab. – М.: ДМК Пресс, 2014. – 628 с.
10. Горева Т.С. Свидетельство об отраслевой регистрации комплекса программ для ЭВМ № 16389: «Программный комплекс управления качественными показателями электроэнергии в распределительных сетях». – М.: ИНИМ РАО, 2010.
11. Дорогов А.Ю. Теория и проектирование быстрых перестраиваемых преобразований и слабосвязанных нейронных сетей. – СПб.: Политех, 2014. – 344 с.