

УДК 621.316

UDC 621.316

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

USING DISCRETE WAVELET TRANSFORM FOR CALCULATION OF TRANSIENT REGIMES OF POWER SUPPLY SYSTEMS

Долгих Надежда Николаевна
аспирантка

Dolgih Nadezhda Nikolaevna
postgraduate student

Еремин Евгений Николаевич
д.т.н., профессор

Eremin Evgenij Nikolaevich
Dr.Sci.Tech., professor

Киселёв Богдан Юрьевич
ассистент

Kisselyov Bogdan Yur'evich
assistant

Осипов Дмитрий Сергеевич
к.т.н., доцент
*ФГБОУ ВПО «Омский Государственный
технический университет», г. Омск, Россия*

Osipov Dmitrij Sergeevich
Candidate of Engineering Sciences, assistant professor
Omsk State Technical University, Omsk, Russia

В статье рассматривается применение относительно нового математического аппарата вейвлет анализа для разработки алгоритма анализа переходных процессов в системах электроснабжения. Используемые в настоящее время методы подразделяются на две категории: методы на основе временной области и методы интегрального преобразования. Оба эти метода могут вызывать трудности при анализе сигналов с широким спектром или при нестационарности исследуемого режима. Одним из преимуществ вейвлет анализа является способность к исследованию нестационарных процессов. Метод, основанный на дискретном вейвлет преобразовании для таких элементов системы электроснабжения, как активное и индуктивное сопротивление, применяется для расчета переходных процессов. Метод применим для любых ортогональных вейвлетов.

This article utilizes wavelet analysis, a relatively new mathematical tool, designed to develop an algorithm of analysis for electrical transients in electric power systems. Techniques, which are currently used, fall into two main categories: time domain or the integral transform domain. Both of the aforementioned categories can be stressed when solving equations with a wide spectrum or when a system of equations is subjected to a nonstationary forcing function. One of the benefits of wavelet analysis, however, is the ability to resolve nonstationary nature signals easily. Based on the discrete time domain approximation, the system components such as resistor and inductor are modeled in discrete wavelet domain for purpose of transient analysis. The method can be implemented by any kind of orthogonal wavelet transform. Computer simulations verified the effectiveness of the proposed method. The proposed algorithm can be implemented to calculate the short-circuits in electric power systems

Эффективность предложенного метода подтверждена результатами компьютерного моделирования. Предложенный алгоритм может быть использован для расчета коротких замыканий в системах электроснабжения

Ключевые слова: ВЕЙВЛЕТ - ПРЕОБРАЗОВАНИЕ, РЕКУРСИВНЫЙ МЕТОД, ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

Keywords: WAVELET TRANSFORM, RECURSIVE METHOD, TRANSIENTS

Дискретное вейвлет преобразование.

Вейвлет - анализ являются удобным инструментом для решения многих практических задач. В настоящее время вейвлет анализ широко

применяется в самых различных областях науки и техники. Так же методы вейвлет - преобразования открывают большие перспективы и находят широкое применение в решение актуальных электроэнергетических задач, как за рубежом [1], так и в России [2,3].

Вейвлет преобразование находит применение для расчета нестационарных несинусоидальных режимов систем электроснабжения, поскольку лишен ряда недостатков, характерных преобразованию Фурье. В том числе, вейвлет преобразование может использоваться для решения задач активной фильтрации высших гармоник [4,5] для обеспечения показателей качества электроэнергии.

Рассмотрим один период синусоидально изменяющегося тока, определяемый функцией:

$$i = I_m \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

Приняв частоту дискретизации

$$f_D = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.00125} = 800 \text{ (Гц)} \quad (2)$$

получаем дискретный сигнал тока, представляющий собой вектор-строку из 16 элементов:

$$i = |i_1 \ i_2 \ i_3 \ \dots \ i_{16}| \quad (3)$$

Непрерывная функция тока и дискретный сигнал тока, с выбранной частотой дискретизации представлены на рисунке 1.

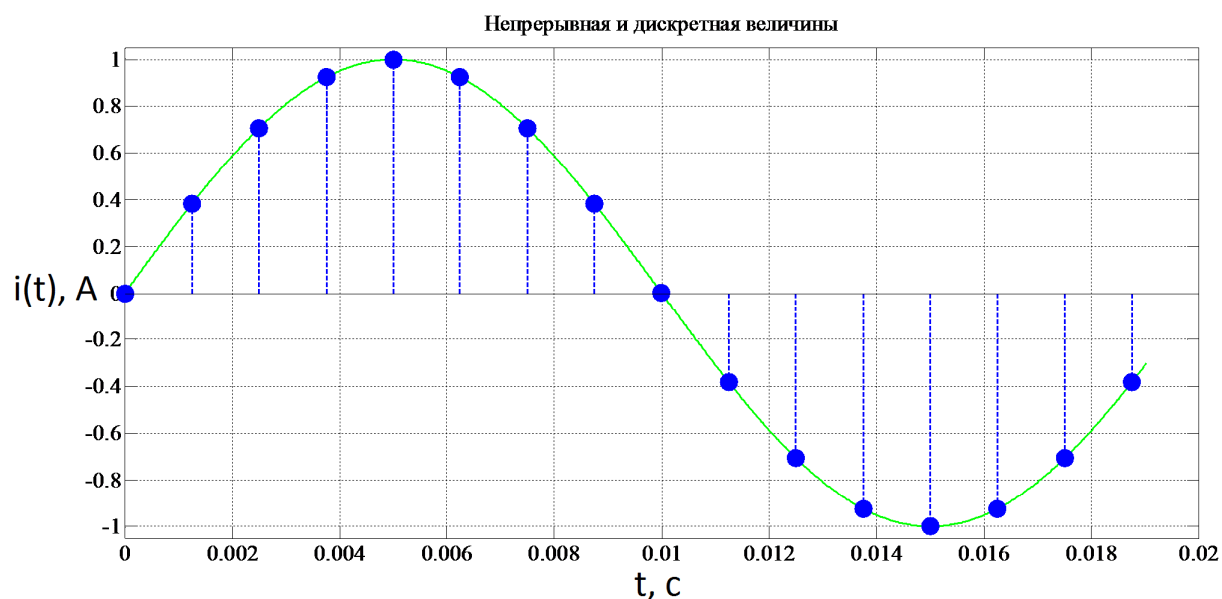


Рис. 1. Исследуемый непрерывный и дискретный сигнал

Для иллюстрации алгоритма быстрого вейвлет преобразования (алгоритма Малла) в базисе вейвлета Хаара, представленного на рисунке 2, приведем значения первых восьми отсчётов дискретного сигнала тока, взятых на первом полупериоде.

$$i_{1-8} = |0 \quad 0,3827 \quad 0,7071 \quad 0,9239 \quad 1 \quad 0,9239 \quad 0,7071 \quad 0,3827| \quad (4)$$

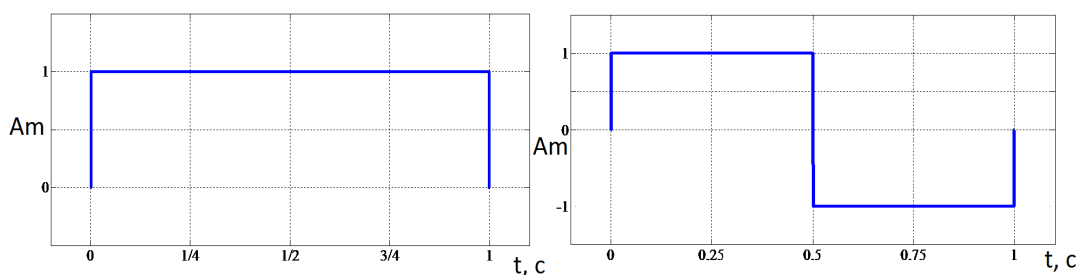


Рис. 2. Масштабирующая функция и вейвлет Хаара

Аппроксимирующие коэффициенты первого уровня разложения могут быть получены по формуле:

$$i_{1,0}^A = \frac{i_1 + i_2}{\sqrt{2}} = \frac{0 + 0,3827}{\sqrt{2}} = 0,2706 \quad (5)$$

$$i_{1,1}^A = \frac{i_3 + i_4}{\sqrt{2}} = \frac{0,7071 + 0,9239}{\sqrt{2}} = 1,1533 \quad (6)$$

Детализирующие коэффициенты первого уровня можно получить по следующему алгоритму:

$$i_{1,0}^D = \frac{i_1 - i_2}{\sqrt{2}} = \frac{0 - 0.3827}{\sqrt{2}} = -0.2706 \quad (7)$$

$$i_{1,1}^D = \frac{i_3 - i_4}{\sqrt{2}} = \frac{0.7071 - 0.9239}{\sqrt{2}} = -0.1533 \quad (8)$$

Вычисление оставшихся коэффициентов осуществляется далее по схеме (рисунок 3).

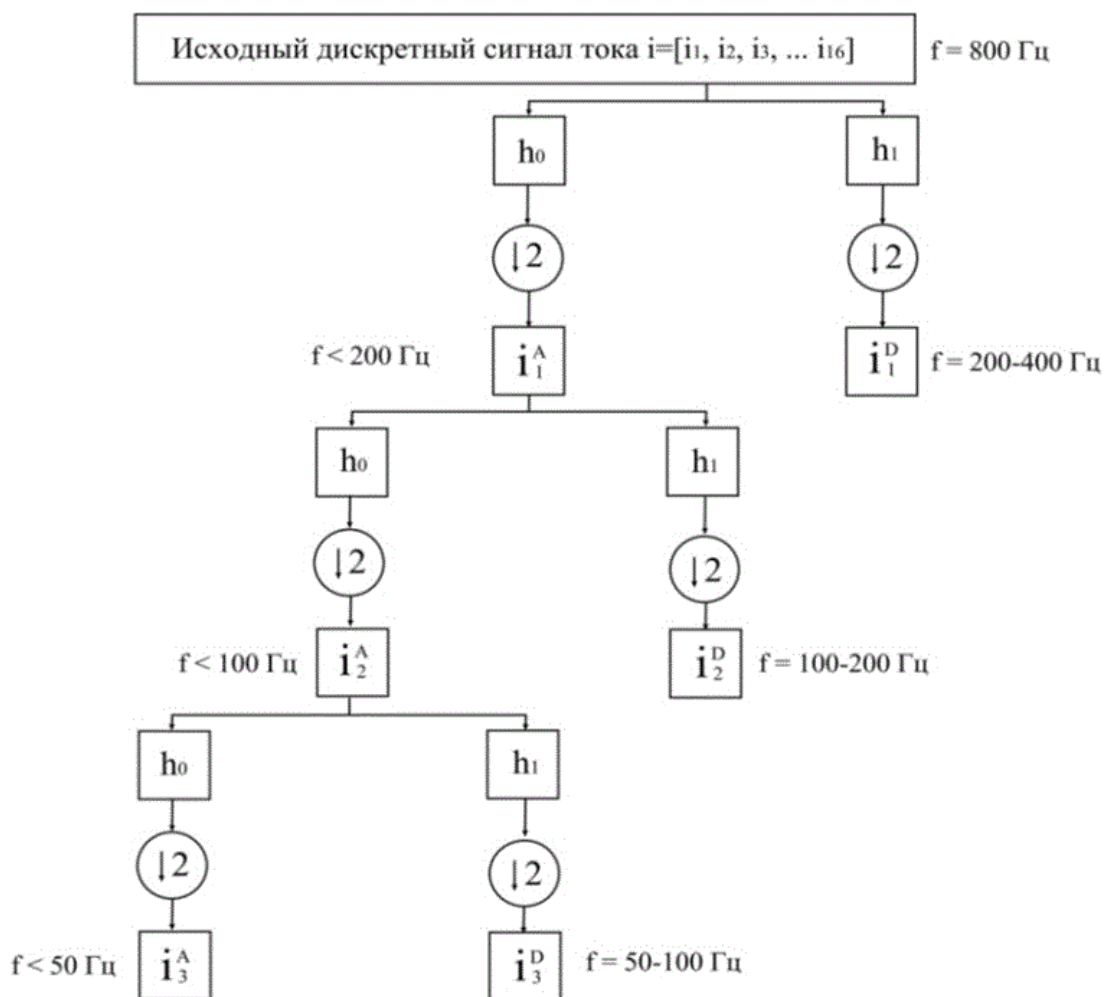


Рис. 3. Схема разложения сигнала.

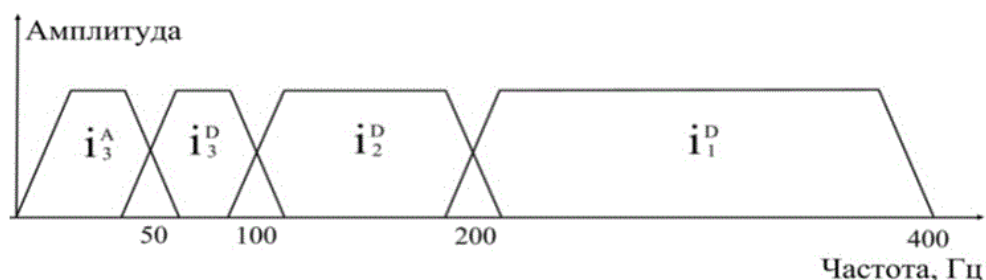


Рис. 4. Частотные диапазоны

Максимально возможный уровень вейвлет разложения J_m определяется количеством отсчётов сигнала N :

$$J_m = \log_2 N \quad (9)$$

Так, для рассматриваемого примера $N = 16$, следовательно $J_m = \log_2 16 = 4$.

Как показано на рисунке 4 каждый аппроксимирующий или детализирующий коэффициент определяет полосу частотного разрешения сигнала. Часто для решения практических задач, необходимо определить вейвлет коэффициенты на уровнях разложения меньших, чем максимальный. Для решения таких задач в данной работе будем обозначать рассматриваемый (текущий) уровень вейвлет разложения как уровень J .

Количество коэффициентов l на каждом J -м уровне разложения определяется по формуле:

$$l = 2^{J_m - j} \quad (10)$$

Для уровня разложения $J = 3$ количество коэффициентов, определяется по формуле (18) $l = 2^{4-3} = 2^1 = 2$. В дальнейших теоретических выкладках нумеровать коэффициенты аппроксимации и детализации будем, начиная с нуля. Следовательно, максимально возможный индекс коэффициента на рассматриваемом уровне J будет определяться:

$$k_m = 2^{J_m - j} - 1 \quad (11)$$

Таким образом, любой дискретный сигнал может быть представлен в виде суммы аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов:

$$i(t) = \sum_{k=0}^{k_m} i_{J,k}^A \varphi_{J,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{k_m} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \quad (12)$$

Например, для рассматриваемого случая максимальный уровень разложения $J_m = 4$, текущий (данный) уровень разложения $J = 3$, Максимальный индекс коэффициента $k_m = 2^{4-3} - 1 = 1$, общее число коэффициентов для уровня $J = 3$ $l = 2^{4-3} = 2^1 = 2$, для уровня разложения $J = 1$ $l = 2^{4-1} = 2^3 = 8$, тогда формула (4) будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} i(t) &= \sum_{k=0}^1 i_{J,k}^A \varphi_{J,k}(t) + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=0}^1 i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) = \\ &= i_{3,0}^A \cdot \varphi_{3,0} + i_{3,1}^A \cdot \varphi_{3,1} + i_{3,0}^D \cdot \psi_{3,0} + i_{3,1}^D \cdot \psi_{3,1} + i_{2,0}^D \cdot \psi_{2,0} + i_{2,1}^D \cdot \psi_{2,1} + i_{2,2}^D \cdot \psi_{2,2} + i_{2,3}^D \cdot \psi_{2,3} + \\ &+ i_{1,0}^D \cdot \psi_{1,0} + i_{1,1}^D \cdot \psi_{1,1} + i_{1,2}^D \cdot \psi_{1,2} + i_{1,3}^D \cdot \psi_{1,3} + i_{1,4}^D \cdot \psi_{1,4} + i_{1,5}^D \cdot \psi_{1,5} + i_{1,6}^D \cdot \psi_{1,6} + i_{1,7}^D \cdot \psi_{1,7} \end{aligned} \quad (13)$$

Действующее значение тока (напряжения, Э.Д.С.), представленного дискретным сигналом может быть определено по формуле

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \left[\sum_{k=0}^{k_m} i_{J,k}^A \varphi_{J,k}(t) + \sum_{j=1}^J \sum_{k=0}^{k_m} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \right]^2} \quad (14)$$

Таким образом, можно заключить, что действующее значение дискретно электрической величины (тока, Э.Д.С, напряжения) может быть определено через аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты вейвлет преобразования. Что в конечном итоге позволяет говорить о частотной декомпозиции исследуемого сигнала, а также о возможности исследовать нестационарные режимы.

Применение дискретного вейвлет преобразования для расчета переходных процессов.

Ток в катушке индуктивности сразу же после замыкания ключа (выключателя), должен остаться таким же, каким он был непосредственно до замыкания ключа.

$$i_L(0_-) = i_L(0_+) \quad (15)$$

В работе [6] предлагается решение обыкновенных дифференциальных уравнений с помощью вейвлетов – метод вейвлет рекурсии.

Пусть функции $u(t)$ и $i_L(t)$ представляются векторами, обозначим время как $t = n\Delta t$, где Δt -интервал (время) дискретизации.

Дискретное вейвлет преобразование этих векторов будет иметь вид:

$$u(t) = \sum_j \sum_k u_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (16)$$

$$i(t) = \sum_j \sum_k i_{j,k} \cdot \psi_{j,k}(t) \quad (17)$$

Уравнение обратной конечно-разностной аппроксимации производной в дискретном времени [6]:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{i_L(t) - i_L(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (18)$$

Для расчета переходного процесса и производного приближения(при малых значениях Δt получим:

$$\frac{1}{\Delta t} \left[k \sum_j \sum_k i_{Ljk} \psi_{jk}(t) - k \sum_j \sum_k i_{Ljk} \psi_{jk}(t - \Delta t) \right] + \frac{R}{L} \left[k \sum_j \sum_k i_{Ljk} \psi_{jk}(t) \right] = \frac{1}{L} \left[k \sum_j \sum_k u_{jk} \psi_{jk}(t) \right] \quad (19)$$

Где

$$\psi_{jk}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0}} \psi \cdot \left(\frac{t}{a} - b_0 k \right) \quad (20)$$

$$\psi_{jk}(t - \Delta t) = \frac{1}{\sqrt{a_0}} \psi \cdot \left(\frac{t - \Delta t}{a} - b_0 k \right) \quad (21)$$

БВП имеет быструю рекурсивную форму, что наиболее легко реализовать с использованием теории группы фильтров [7].

Вейвлет разложение функции (в данном случаи функции тока на катушке индуктивности и напряжения источника) будут иметь вид:

$$i_L(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Lj,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Lj,k}^D \psi_{j,k}(t) \quad (22)$$

$$u(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} v_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \quad (23)$$

В уравнениях (22-23) индексы D и A представляют собой детализирующие и аппроксимирующие коэффициенты.

Ниже будут представлены численные результаты эксперимента. Простое дифференциальное уравнение переходного процесса будет решено при помощи предложенного в [6] метода формулы правой обратной разности (конечно – разностные аппроксимации производных).

Этапы процедуры анализа переходного процесса при помощи метода вейвлет рекурсии:

Шаг 1. Производим БДП используя коэффициентов фильтра, выбранного типа вейвлета. Тем самым находим коэффициенты вейвлет преобразования.

Шаг 2. Решаем систему уравнений, составленную в вейвлет области.

$$\frac{1}{a_0^j \Delta t} i_{Ljk}^A - \frac{1}{a_0^j \Delta t} \cdot i_{Ljk-1}^A + \frac{R}{L} i_{Ljk}^A = \frac{1}{L} u_{jk}^A \quad (24)$$

$$\frac{1}{a_0^j \Delta t} i_{Ljk}^D - \frac{1}{a_0^j \Delta t} \cdot i_{Ljk-1}^D + \frac{R}{L} i_{Ljk}^D = \frac{1}{L} u_{jk}^D \quad (25)$$

В этом численном эксперименте $j=1$, $a_0^j = 2^1 = 2$, временной шаг $\Delta t = 10^{-4} (с) = 100 мс$.

Выразив из уравнений i_{Ljk}^A и i_{Ljk}^D получим:

$$i_{Ljk}^A = \frac{\left(\frac{u_{jk}^A}{L} \right) + 5 \cdot 10^3 \cdot i_{Ljk-1}^A}{5 \cdot 10^3 + \left(\frac{R}{L} \right)} \quad (26)$$

$$i_{Ljk}^D = \frac{\left(u_{jk}^D / L \right) + 5 \cdot 10^3 \cdot i_{Ljk-1}^D}{5 \cdot 10^3 + (R/L)} \quad (27)$$

Шаг 3. Выполняем обратное вейвлет преобразование (реконструкцию сигнала), последовательности коэффициентов i_{Ljk}^A и i_{Ljk}^D преобразуются в единый дискретный сигнал.

Рисунок 5. иллюстрирует результаты рекурсивного решения системы уравнений (результаты после 600 итераций).

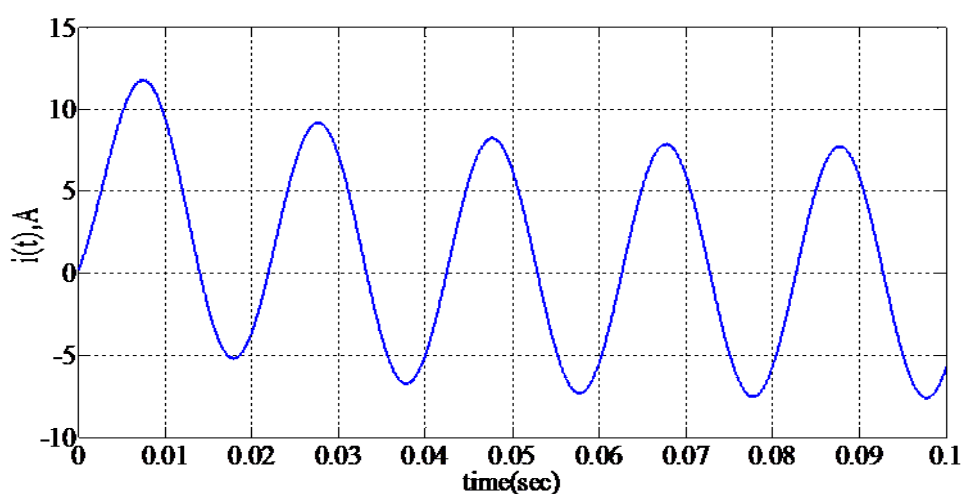


Рис. 5. Результаты рекурсии после 600 итераций.

Рассмотренный метод, называемый методом вейвлет рекурсии, использует относительно новый математический аппарат, вейвлет-преобразование, которое имеет определенные преимущества по сравнению с методами, такими, как анализ Фурье при анализе переходных и нестационарных сигналов. Преимущества и недостатки метода вейвлет рекурсии: БВП производит разрежение представленных сигналов, таким образом, к данному методу могут быть применены редкие матричные приёмы, позволяющие увеличить скорость решения. Во многих случаях, метод вейвлет рекурсия сходится относительно быстро Программное обеспечение вейвлет-анализа легко доступны и адаптированы к различным приложениям, в том числе к энергетике.

Библиографический список

1. Мисриханов, А.М. Применение методов вейвлет-преобразования в электроэнергетике / А.М. Мисриханов // Автоматика и телемеханика. – 2006. № 5. С. 5-23.
2. Карпенко, С.В. Математическое моделирование нестационарных электрических процессов в электротехнических системах на основе численных методов вейвлет-анализа: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ / Карпенко Степан Викторович ; рук.работы С.П. Мочалов. – Новокузнецк, 2006. – 164 с.
3. Аббакумов, А.А. Разработка методики и алгоритмов идентификации отклонений от нормативов параметров качества электроэнергии в системах электроснабжения: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ / Аббакумов Андрей Александрович ; рук.работы С.А. Федосин. – Саранск: Мордовский гос. ун-т им. Н.П. Огарева, 2005. – 180 с.
4. Долингер, С.Ю. Схематические решения активной фильтрации кривой тока в четырёхпроводной трехфазной сети для обеспечения качества электрической энергии / С.Ю. Долингер, В.Н. Горюнов, А.А.Планков, О.А. Сидоров // Омский научный вестник. – 2013. – №3(103). – С. 214-217.
5. Горюнов, В.Н. Определение управляющего воздействия активного фильтра гармоник / В.Н. Горюнов, Д.С. Осипов, А.Г. Лютаревич // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2009. – №6 – С. 20-24
6. Calli A. W. "Analysis of Electrical Transients In Power System Via A Novel Wavelet Recursion Method", Ph.D. Dissertation, Purdue University 1997. – 143 p.
7. Strang G. and Nguyen T. Wavelets and Filter Banks. Wellesly-Cambridge Press. Wellesly. MA. 1996. – 527 p.

Referenses

1. Misrihanov, A.M. Primenenie metodov vejvlet-preobrazovanija v jelektrojenergetike / A.M. Misrihanov // Avtomatika i telemehaniika. – 2006. no 5. pp. 5-23.
2. Karpenko, S.V. Matematicheskoe modelirovanie nestacionarnyh jelektricheskikh processov v jelektrotehnicheskikh sistemah na osnove chislennyh metodov vejvlet-analiza: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.13.18 – matematicheskoe modelirovanie, chislennye metody i komplekсы programm / Karpenko Stepan Viktorovich ; ruk.raboty S.P. Mochalov. – Novokuzneck, 2006. – 164 p.
3. Abbakumov, A.A. Razrabotka metodiki i algoritmov identifikacii otklonenij ot normativov parametrov kachestva jelektrojenergii v sistemah jelektrosnabzhenija: dis. ... kand. tehn. nauk: 05.13.18 – matematicheskoe modelirovanie, chislennye metody i komplekсы programm / Abbakumov Andrej Aleksandrovich ; ruk.raboty S.A. Fedosin. – Saransk: Mordovskij gos. un-t im. N.P. Ogareva, 2005. – 180 p.
4. Dolinger, S.Ju. Shematicheskie reshenija aktivnoj fil'tracii krivoj toka v chetyrjohprovodnoj trehfaznoj seti dlja obespechenija kachestva jelektricheskoy jenerгии / S.Ju. Dolinger, V.N. Gorjunov, A.A.Plankov, O.A. Sidorov // Omskij nauchnyj vestnik. – 2013. – №3(103). – S. 214-217.
5. Gorjunov, V.N. Opredelenie upravljajushhego vozdejstvija aktivnogo fil'tra garmonik / V.N. Gorjunov, D.S. Osipov, A.G. Ljutarevich // Jelektro. Jelektrotehnika, jelektrojenergetika, jelektrotehnicheskaja promyshlennost'. – 2009. – №6 – S. 20-24

6. Calli A. W. "Analysis of Electrical Transients In Power System Via A Novel Wavelet Recursion Method", Ph.D. Dissertation, Purdue University 1997. – 143 p.

7. Strang G. and Nguyen T. Wavelets and Filter Banks. Wellesly-Cambridge Press. Wellesly. MA. 1996. – 527 p.