

**РАЗРАБОТКА РЕКУРСИВНОЙ МОДЕЛИ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ**

Долгих Надежда Николаевна

*старший преподаватель Высшей инженеринговой школы
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: n_dolgikh@ugrasu.ru*

Дюба Елена Александровна

*старший преподаватель Высшей инженеринговой школы
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: e_dyuba@ugrasu.ru*

Осипов Дмитрий Сергеевич

*доктор технических наук, профессор,
руководитель Высшей инженеринговой школы
ФГБОУ ВО «Югорский государственный университет»,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru*

Цифровая трансформация электроэнергетики является одной из приоритетных задач развития отрасли. Вейвлет преобразование находит широкое применение в электроэнергетике для анализа динамики сложных нелинейных нестационарных процессов. В статье предложена методика расчета переходных процессов в электрических сетях, основанная на рекурсивном алгоритме. В качестве задающего сигнала напряжения (э.д.с.) применяются аппроксимирующие и детализирующие вейвлет коэффициенты дискретного вейвлет преобразования. Для выбора оптимальной вейвлет функции предложено использовать критерий, учитывающий точность восстановления сигнала в результате обратного вейвлет преобразования. Показан характер изменения результата расчета при увеличении количества итераций. Результаты численного эксперимента для сети 110 кВ при расчете трехфазного короткого замыкания, показали приемлемую точность разработанной методики. Предложенная методика позволяет сжимать объемы передаваемых цифровых данных о нормальных и аварийных режимах электрических сетей.

Ключевые слова: вейвлет преобразование, переходные процессы, короткое замыкание, цифровой сигнал.

**DEVELOPMENT OF A RECURSIVE MODEL FOR THE CALCULATION OF
TRANSIENT PROCESSES IN ELECTRIC NETWORKS USING THE WAVELET
TRANSFORMATION**

Nadezhda N. Dolgikh

*Senior Lecturer of the Higher Engineering School,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: n_dolgikh@ugrasu.ru*

Elena A. Dyuba

*Senior Lecturer of the Higher Engineering School,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: e_dyuba@ugrasu.ru*

Dmitry S. Osipov

*Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Higher Engineering School
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru*

The digital transformation of the electric power industry is one of the priority tasks for the development of the industry. Wavelet transform is widely used in the electric power industry to analyze the dynamics of complex non-linear non-stationary processes. The article proposes a method for calculating transient processes in electrical networks based on a recursive algorithm. The approximating and detailing wavelet coefficients of the discrete wavelet transform are used as the voltage signal. To select the optimal wavelet function, it is proposed to use a criterion that takes into account the accuracy of the signal recovery as a result of the inverse wavelet transform. The nature of the change in the calculation result with an increase in the number of iterations is shown. The results of a numerical experiment for a 110 kV network when calculating a three-phase short circuit showed an acceptable accuracy of the developed technique. The proposed technique makes it possible to compress the volume of transmitted digital data on normal and emergency modes of electrical networks.

Keywords: Wavelet transform, transients, short circuit, digital signal.

Введение

Вейвлет преобразование находит все более широкое применение для решения актуальных задач электросетевого комплекса – для анализа данных нормальных, аварийных и послеаварийных режимов, прогнозирования электрических нагрузок [1], расчета переходных процессов, диагностики электротехнического оборудования [2], анализа показателей качества электроэнергии [4] и др. В результате вейвлет преобразования сигнала производится вычисление вейвлет коэффициентов, характеризующих различные частотные компоненты. При задании порогового уровня энергии спектра вейвлет коэффициента, можно с достаточной степенью точности сжать сигнал путем обнуления малозначимых частотных составляющих. Таким образом, любой сложный несинусоидальный нестационарный сигнал, характеризующий режим работы электрической сети может быть достаточно полно представлен набором вейвлет коэффициентов. В настоящей работе представлен алгоритм расчета переходных процессов на примере симметричного трехфазного короткого замыкания на основе вейвлет коэффициентов вынуждающей силы.

Результаты и обсуждение

В настоящее время уже накоплен определенный опыт применения вейвлет преобразования для анализа коротких замыканий и замыканий на землю [6, 8].

Рассмотрим простейшую сеть, состоящую из трансформатора, линии и нагрузки в однофазном исполнении (рисунок 1), для которой произведем расчет короткого замыкания в конце линии.

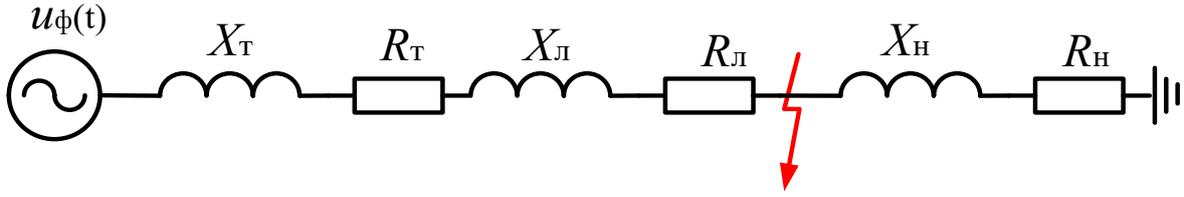


Рисунок 1. Исследуемая схема замещения цепи

Для условия металлического (без дуги) короткого замыкания, при условии, что напряжение источника в момент замыкания проходит через ноль (в этом случае обеспечивается максимальный уровень апериодической составляющей тока замыкания), дифференциальное уравнение переходного процесса может быть представлено в следующем виде:

$$U_{\max\phi} \cdot \sin(\omega t + \alpha) = i_A (R_T + R_L) + \frac{(X_T + X_L)}{\omega} \frac{di_A}{dt}. \quad (1)$$

В результате вейвлет преобразования, напряжение фазы А может быть выражено через аппроксимирующие (А) и детализирующие (D) вейвлет коэффициенты в соответствии с выражением:

$$U_{\max\phi} \sin(\omega t + \alpha) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (2)$$

Вейвлет преобразование позволяет производить сжатие объемов передаваемых данных. Степень сжатия определяется глубиной вейвлет разложения. Алгоритмы вейвлет сжатия параметров нестационарных режимов в электрических сетях и системах электроснабжения представлены в работе [7].

Производная тока фазы А di_A/dt в дискретном времени при конечно-разностной аппроксимации:

$$\frac{X_T + X_L}{\omega} \frac{di_A}{dt} = \frac{X_T + X_L}{\omega} \frac{i_A(t) - i_A(t + \Delta t)}{\Delta t}. \quad (3)$$

Принимая во внимание выражения (2, 3), уравнение (1) может быть переписано в следующем виде:

$$\frac{i_A(t) - i_A(t + \Delta t)}{\Delta t} + \frac{\omega R}{X_T + X_L} i_A(t) = \frac{\omega}{X_T + X_L} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \right). \quad (4)$$

Ток короткого замыкания фазы А, по аналогии с напряжением (2) может быть представлен рядом аппроксимирующих и детализирующих вейвлет коэффициентов. При этом каждый ряд состоит из k элементов для соответствующего уровня (глубины) вейвлет разложения j :

$$i_A(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (5)$$

Если в уравнение (4) ток замыкания фазы А представить вейвлет коэффициентами на основании выражения (5) для малых приращений Δt , то для каждой последовательности вейвлет коэффициентов можно получить следующие выражения, позволяющие рекурсивным методом определить ток короткого замыкания:

$$\begin{aligned} & \frac{\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^A \varphi_{j,k}(t) - \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^A \varphi_{j,k}(t - \Delta t)}{\Delta t} + \frac{\omega(R_T + R_{II})}{X_T + X_{II}} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^A \varphi_{j,k}(t) \right) = \\ & = \frac{\omega}{X_T + X_{II}} \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) \right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^D \psi_{j,k}(t) - \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^D \psi_{j,k}(t - \Delta t)}{\Delta t} + \frac{\omega(R_T + R_{II})}{X_T + X_{II}} \left(\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{Aj,k}^D \psi_{j,k}(t) \right) = \\ & = \frac{\omega}{X_T + X_{II}} \left(\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} u_{j,k}^D \psi_{j,k}(t) \right). \end{aligned} \quad (7)$$

При выборе глубины вейвлет разложения следует принимать во внимание, что вейвлет функция $\varphi_{j,k}(t)$ и масштабирующая функция $\psi_{j,k}(t)$ должны полностью «перекрыть» исследуемый интервал времени Δt :

$$\begin{aligned} \varphi_{j,k}(t) &= a_0^{-j/2} \varphi[a_0^{-j}t - kb_0] & \varphi_{j,k}(t) &= a_0^{-j/2} \varphi[a_0^{-j}(t - \Delta t) - kb_0], \\ \psi_{j,k}(t) &= a_0^{-j/2} \psi[a_0^{-j}t - kb_0] & \psi_{j,k}(t) &= a_0^{-j/2} \psi[a_0^{-j}(t - \Delta t) - kb_0]. \end{aligned} \quad (8)$$

Для решения конкретных практических задач необходимо предварительно выбрать оптимальную вейвлет функцию и глубину разложения сигнала. Для этого может быть использован критерий (8), сформулированный в работе [3].

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (i_k - \hat{i}_k)^2}{\sum_{k=1}^n i_k^2}} \rightarrow \min; \\ \Delta_{En} &= \frac{E_n}{E_{\Sigma}} \frac{\sum_{k=n} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{k=n} |i_{j,k}^D|^2}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^A|^2 + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |i_{j,k}^D|^2} \rightarrow \max. \end{aligned} \right. \quad (8)$$

Выбор вейвлета будет оптимальным, если (8) среднеквадратическое отклонение восстановленного (полученного в результате обратного вейвлет преобразования) сигнала будет иметь минимальное среднеквадратическое отклонение, а энергия спектра локальной гармонической группы будет иметь максимум в выбранном частотном диапазоне. Дополнительно вейвлет преобразование позволит производить фильтрацию полезного сигнала от искажений, которые могут вносить средства измерений [5].

Разработанный в настоящей работе рекурсивный алгоритм расчета переходных процессов в электрических сетях на основе вейвлет коэффициентов представлен на рисунке 2.

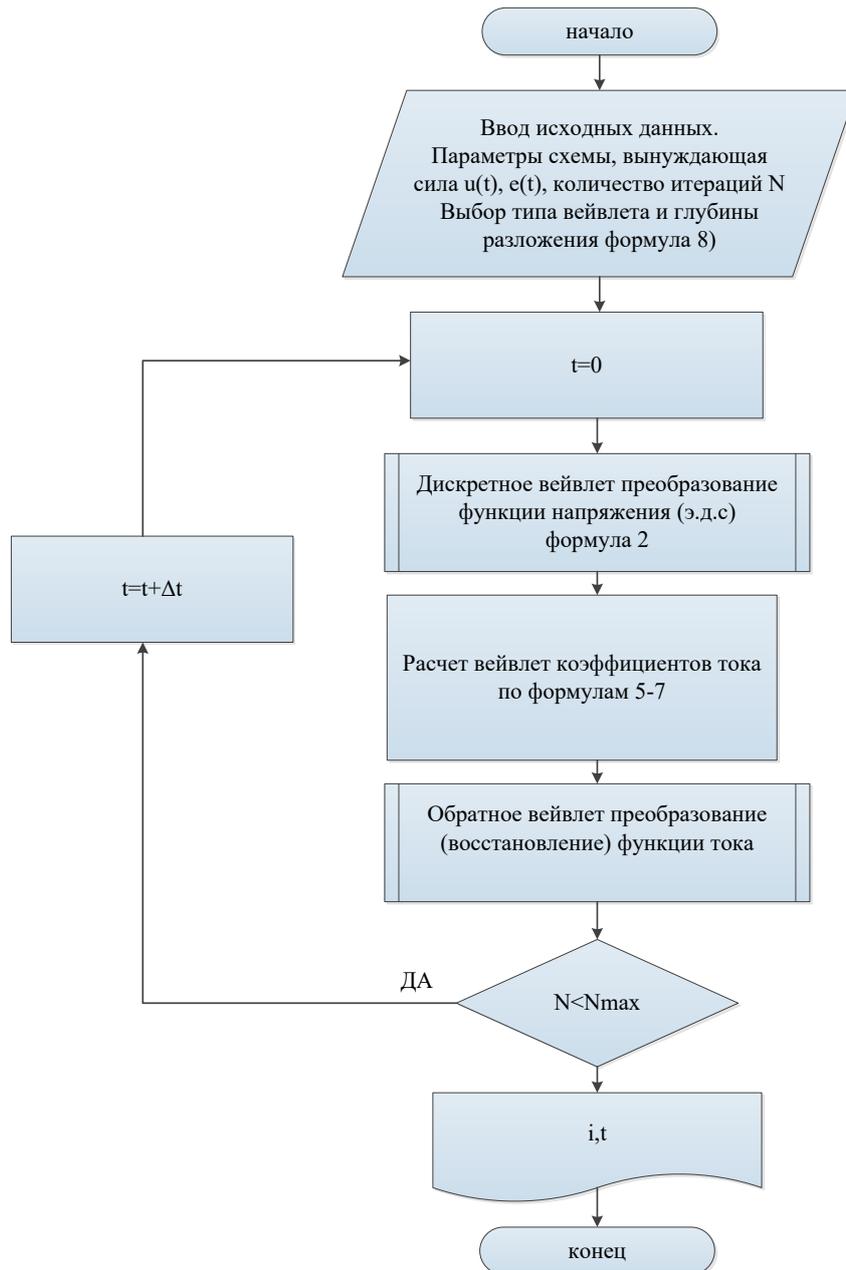


Рисунок 2. Разработанный алгоритм

Численный эксперимент проведем для схемы замещения (рис. 1), заданной следующими параметрами: $U_{\phi}=115/1,73$ кВ; $R_T=4,4$ Ом; $X_T=87$ Ом; $R_L=13$ Ом; $X_L=21$ Ом; $R_H=1102$ Ом; $X_H=827$ Ом. Для численного эксперимента был выбран интервал времени $\Delta t=0,02$ мс= $0,0002$ с.

На первом шаге работы алгоритма (рисунок 3) расчетный ток короткого замыкания полностью повторяет вынуждающую силу (функцию напряжения).

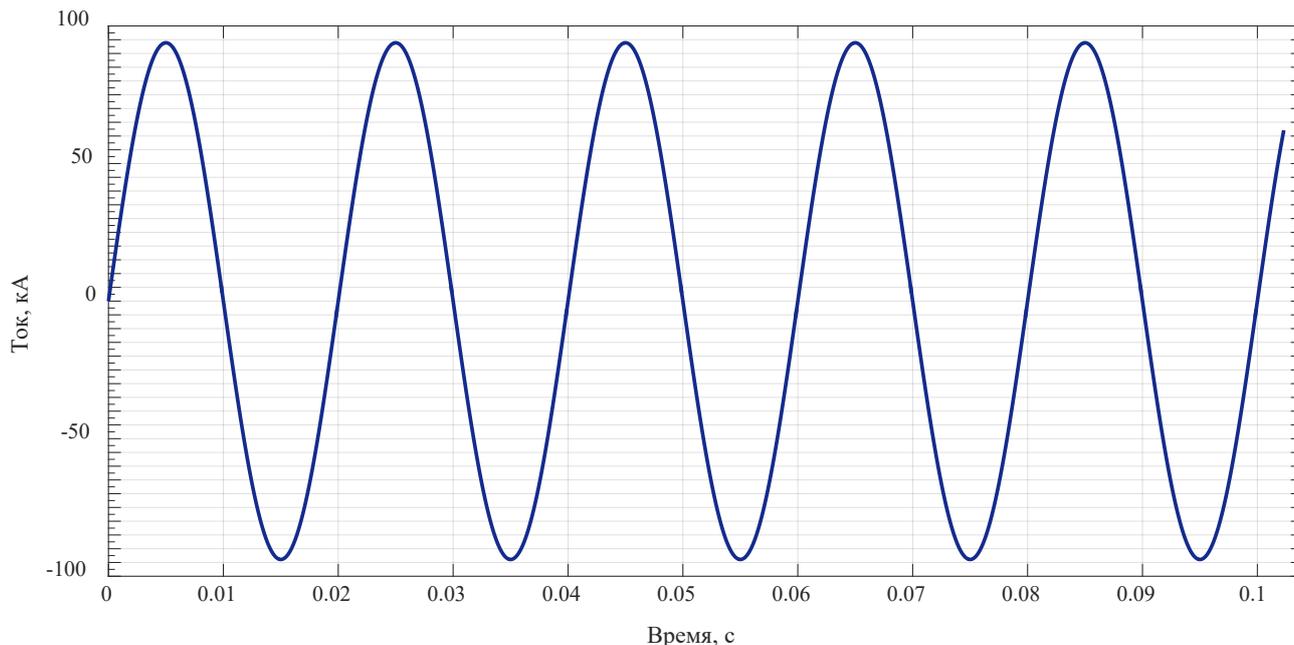


Рисунок 3. Ток после первой итерации

Для последующих итераций производится последовательное приближение расчетной функции тока. Так, на рисунке 4, представлена осциллограмма тока замыкания после 400 итераций.

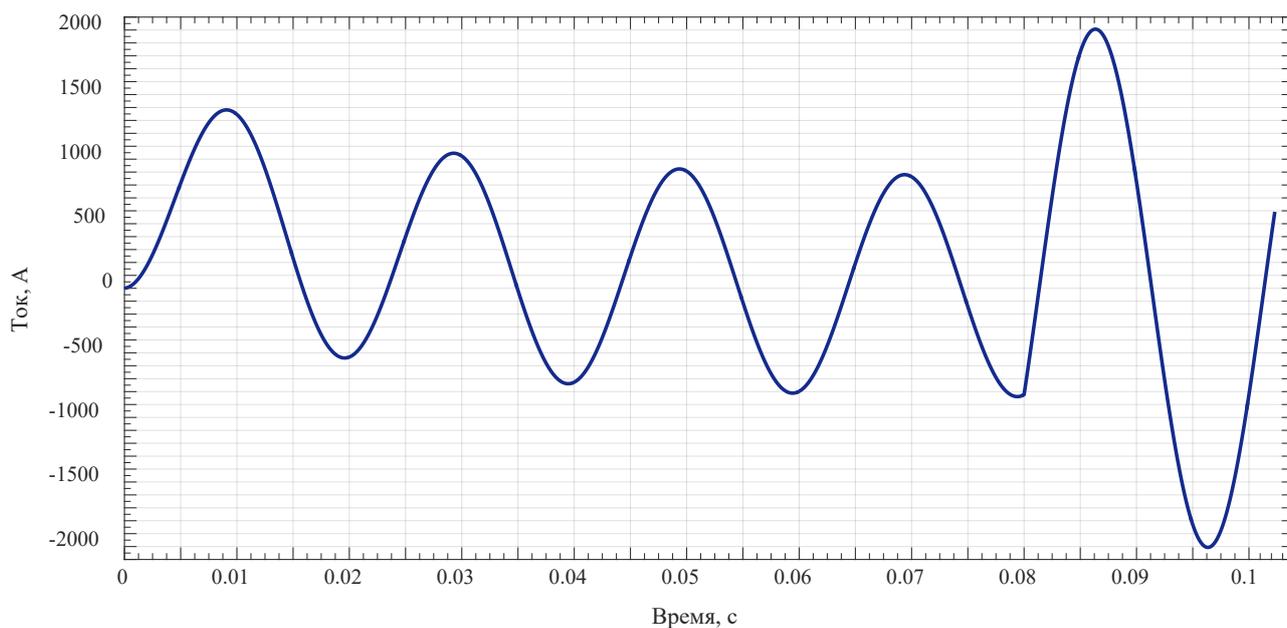


Рисунок 4. Ток после 400 итераций

На рисунке 4 уже отчетливо можно наблюдать возникающий в первые полпериода промышленной частоты подъем ударного тока короткого замыкания. Осциллограмма тока короткого замыкания фазы А после окончания работы алгоритма (600 циклов) представлена на рисунке 5.

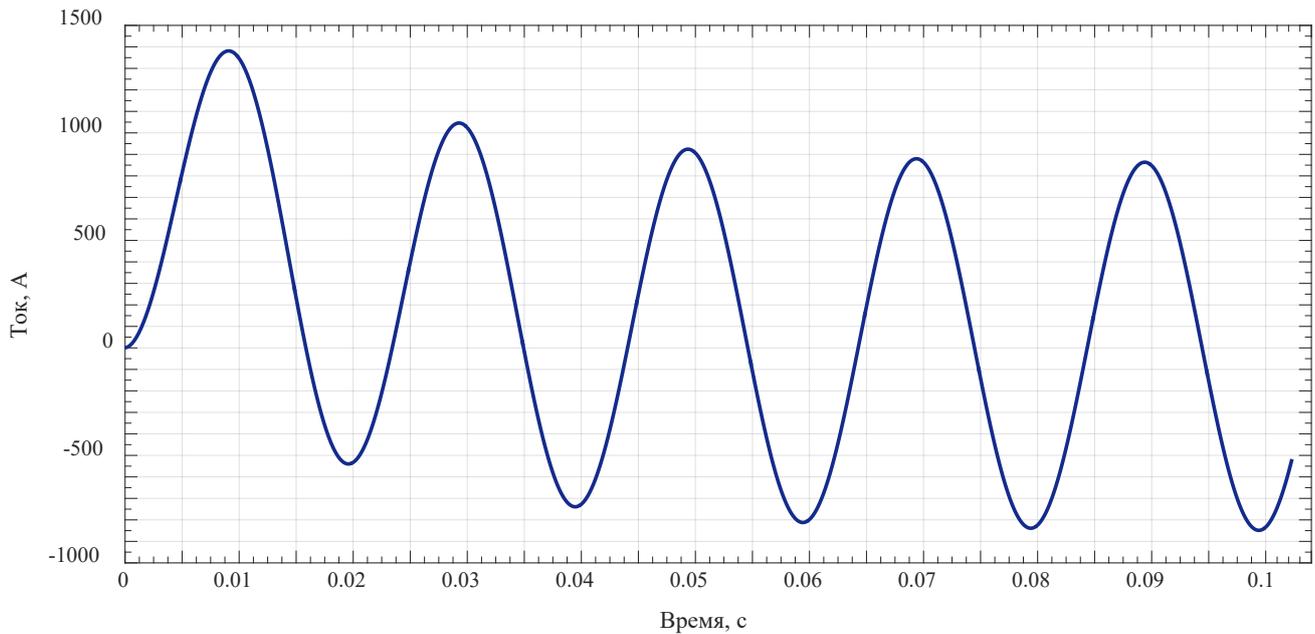


Рисунок 5. Окончание цикла

Сравнение результатов расчета тока короткого замыкания по предложенному алгоритму с аналитическим решением показало (рисунок 6), что абсолютная погрешность не превысила 42 А, относительная погрешность менее 3%.

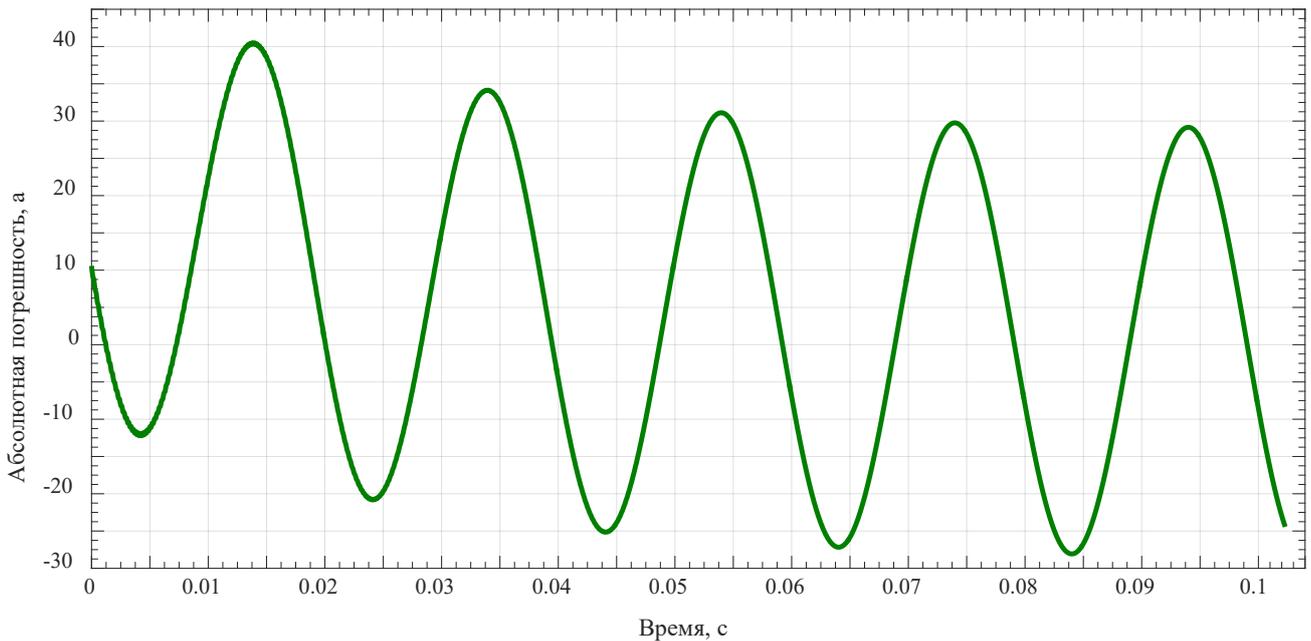


Рисунок 6. Абсолютная погрешность вычисления тока КЗ по предложенному алгоритму

Среднеквадратическое отклонение σ составило 0,031 А. В целом, при проведении численных экспериментов по условию (8) были исследованы вейвлеты Хаара, вейвлеты семейства Добеши, вейвлет Майера, Койфлет, Симлет и др. Следует отметить, что минимальное среднеквадратичное отклонение исходного и восстановленного сигнала было достигнуто при использовании вейвлетов Добеши 4 и 10 порядков db4, db10. Коэффициент сжатия при этом достигал величины 16.

При этом в качестве информации о вынуждающей силе (напряжения на шинах подстанции) в разработанном алгоритме применяются вейвлет коэффициенты.

Выводы

1. Критерий оптимального выбора вейвлет функции базируется на условии максимума локального спектра энергии, сосредоточенного в исследуемом частотном диапазоне. Оптимальный результат по величине среднеквадратичного отклонения сигнала в результате обратного вейвлет преобразования показали вейвлеты Добеши 4 и 10 порядков.

2. Разработанный алгоритм является итерационным. Для цепей синусоидального тока промышленной частоты $f=50$ Гц при интервале времени 0,02 мс, итерационный процесс сходится после 600 циклов.

3. Относительная погрешность определения ударного тока трехфазного короткого замыкания в соответствии с разработанным алгоритмом, не превысила значение 3%.

Таким образом, проведенные исследования показали, что расчет переходных процессов в электрических сетях может быть осуществлен по рекурсивному алгоритму, при этом вынуждающая сила (напряжение) задается посредством детализирующих и аппроксимирующих вейвлет коэффициентов. Разработанная методика может быть применена для цифровой обработки данных о параметрах режимов электрических сетей и систем электроснабжения в рамках развития технологии «цифровая подстанция».

Список литературы

1. Манусов, В. З. Применение теории вейвлетов для анализа данных при решении задачи прогнозирования электрической нагрузки / В. З. Манусов, К. Н. Бойко. – Текст : непосредственный // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2015. – № 4. – С. 212–215.

2. Мисриханов, А. М. Применение методов вейвлет преобразования в электроэнергетике / А.М. Мисриханов. – Текст : непосредственный // Автоматика и телемеханика. – 2006. – № 5. – С. 5–23.

3. Czarnecki, L. S. Power properties of four-wire systems at nonsinusoidal supply voltage / L. S. Czarnecki, P. M. Haley. – DOI: 10.1109/tpwrd.2015.2463253 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2016. – Vol. 31, Iss. 2. – P. 513–521.

4. Осипов, Д. С. Разработка критерия выбора оптимального типа материнского вейвлета в задаче расчета активной и реактивной мощности систем электроснабжения / Д. С. Осипов. – Текст : непосредственный // Омский научный вестник. – 2018. – № 6 (162). – С. 71–75.

5. Hamid, E. Y. Wavelet-based data compression of power system disturbances using the minimum description length criterion / E. Y. Hamid, Z.-I. Kawasaki. – DOI: 10.1109/61.997918 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2002. – Vol. 17, Iss. 2. – P. 460–466.

6. Guo, M.-F. Wavelet-transform based early detection method for short-circuit faults in power distribution networks / M.-F. Guo, N.-C. Yang, L.-X. You. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2018.01.013 // International journal of electric power and energy systems. – 2018. – Vol. 99. – P. 706–721.

7. High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network / S. Silva, M. Gouvera, A. Lacerda [et al.]. – DOI: 10.1016/j.epsr.2017.08.039 // Electric power systems research. – 2018. – Vol. 154. – P. 474–483.

8. Dwivedi, U. D. A Wavelet-based denoising technique for improved monitoring and characterization of power quality disturbances / U. D. Dwivedi, S. N. Singh. – DOI: 10.1080/15325000902762281 // Electric Power Components and Systems. – 2009. – Vol.37, №.7. – P. 753–769.