

**МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ
УЗЛОВ НАГРУЗКИ МИНИГРИДА ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ЭКСТРАПОЛЯЦИИ ЛИНИИ ТРЕНДА, ПОЛУЧЕННОЙ С ПОМОЩЬЮ
ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГРАФИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК**

Ткаченко Всеволод Андреевич

*преподаватель Политехнической школы,
Югорский государственный университет,
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: v_tkachenko@ugrasu.ru*

Осипов Дмитрий Сергеевич

*доктор технических наук,
профессор Политехнической школы,
Югорский государственный университет
Ханты-Мансийск, Россия
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru*

*Работа выполнена в рамках гранта РФФ
«Разработка принципов управления
и контроля режимов работы электроэнергетических систем
на основе вейвлет преобразования данных о параметрах режима»
(Соглашение № 22-29-20052)*

Предмет исследования: методы прогнозирования графиков электрической нагрузки.

Цель исследования: усовершенствование метода прогнозирования для оценки роста энергопотребления минигрида.

Методы и объекты исследования: в качестве метода исследования приняты элементы теории вейвлет-преобразования временных рядов, методы аппроксимации.

Основные результаты исследования: в результате исследования был модернизирован метод прогнозирования величины мощности нагрузки изолированной электрической системы малой мощности (минигрид), в качестве элемента модернизации предлагается применение вейвлет-преобразований для фильтрации высокочастотной составляющей графика потребляемой мощности. Также в работе рассматриваются основные принципы работы вейвлет-преобразований, их преимущества и возможности применения в задачах прогнозирования, а также приведен пример успешного использования данного метода.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, графики нагрузок, электрическая мощность, прогнозирование, фильтр высокочастотной составляющей.

**MODERNIZATION OF THE METHOD FOR PREDICTING
ENERGY CONSUMPTION OF MINIGRID LOAD NODES BY USING
EXTRAPOLATION OF THE TREND LINE OBTAINED
USING WAVELET TRANSFORMATION OF THE ELECTRICAL LOAD GRAPH**

Vsevolod A. Tkachenko

*Lecturer at the Polytechnic School,
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education,
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: v_tkachenko@ugrasu.ru*

Dmitry S. Osipov

*Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Polytechnic School
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
Yugra State University,
Khanty-Mansiysk, Russia
E-mail: d_osipov@ugrasu.ru*

*The work was carried out
within the framework of the Russian Science Foundation grant
«Development of principles for managing
and monitoring operating modes of electric power systems
based on wavelet transformation of data on mode parameters»
(Agreement No. 22-29-20052)*

Subject of research: methods for predicting electrical load schedules.

Purpose of research: improvement of the forecasting method for assessing the growth of minigrid energy consumption.

Methods and objects of research: elements of the theory of wavelet transform of time series, approximation methods were adopted as a research method.

Main results of research: as a result of the study, the method for predicting the load power of an isolated low-power electrical system (minigrid) was modernized; as an element of modernization, the use of wavelet transforms for filtering the high-frequency component of the power consumption graph is proposed. The paper also discusses the basic principles of operation of wavelet transforms, their advantages and possibilities of application in forecasting problems, and also provides an example of the successful use of this method.

Keywords: wavelet transform, load graphs, electrical power, forecasting, high-frequency component filter.

Введение

В современном мире энергопотребление играет ключевую роль в обеспечении устойчивого развития общества. Особенно важно эффективное управление энергопотреблением в минигридах, где происходит распределение и потребление энергии на местном уровне. Для улучшения способа прогнозирования энергопотребления минигрида, предлагается использовать вейвлет-преобразование для анализа суточных графиков нагрузок. Этот метод позволит получить более точную экстраполяцию линии тренда, учитывающую нестационарность и нелинейность процессов, что, в свою очередь, позволит более точно прогнозировать энерго-

потребление. В данной статье мы рассмотрим возможности использования вейвлет-преобразования для анализа суточных графиков нагрузок и его применение для улучшения способа прогнозирования энергопотребления минигрида [1, 2].

Результаты и обсуждение

Для учета будущих изменений в потреблении электроэнергии в узлах нагрузки удаленных, децентрализованных районов необходимо проводить прогнозирование среднесрочного потребления электроэнергии. В данной работе предлагается использовать теорию вейвлет-преобразования для решения этой задачи. Вейвлет-преобразование широко применяется для анализа сложных нелинейных процессов и обработки больших массивов данных, которыми являются инструментально полученные фактические графики электрических нагрузок. Для иллюстрации этого подхода примем результаты измерений активной мощности в узле нагрузки за 14 дней. Графики нагрузок за неделю представлены на рисунках 1, 2 для удобства сравнения [3].

Графики имеют схожий внешний вид, что указывает на постоянный технологический цикл работы оборудования в узле нагрузки. Для выявления особенностей графиков и определения линии тренда для будущего прогнозирования мы будем использовать математический метод дискретного вейвлет-преобразования [4–6]:

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-\frac{m}{2}} \cdot \int f(t) \psi(a_0^{-m}t - nb_0) dt, \quad (1)$$

где $\psi_{j,k}(t)$ – функция материнского вейвлета.

Для проведения дискретного вейвлет-преобразования на всем периоде измерения, мы усредним графики нагрузок, представленные на рисунках 1 и 2, с интервалом $\Delta t = 10 \text{ мин}$ на протяжении $T = 14 \text{ дней} = 336 \text{ часов}$. Это даст нам 2016 точек на графике. Для удобства алгоритма дискретного вейвлет-преобразования, мы продлим график на 32 точки, что позволит нам представить матрицу значений мощности исходного сигнала (рисунок 1) в виде вектор-столбца размером 2048 элементов $P(t) = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_i \ \dots \ P_{2048}]$ [4].

На первом этапе разложения дискретного сигнала активной мощности $P = f(t)$ проходит через вейвлет-фильтры низких (ФНЧ) и высоких частот (ФВЧ), после чего происходит процедура децимации. В результате этого этапа получаем матрицу аппроксимирующих коэффициентов $A1$ из 1024 элементов и матрицу детализирующих коэффициентов $D1$ такой же размерности. Уменьшение размерности матрицы вейвлет-коэффициентов $A1$ и $D1$ относительно матрицы исходного дискретного сигнала мощности в узле нагрузки приводит к увеличению частоты дискретизации вдвое, что соответствует интервалу времени $\Delta t = 20 \text{ мин}$.

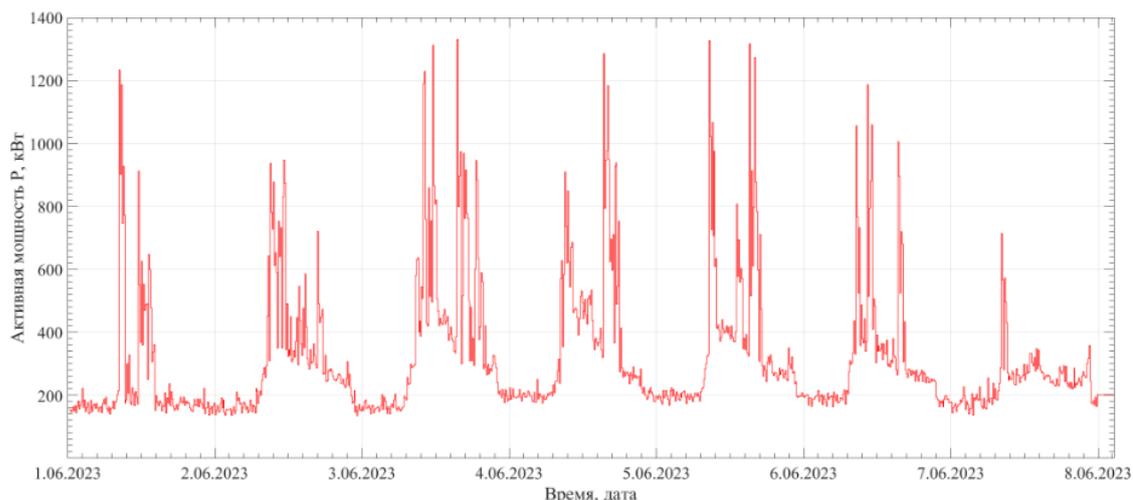


Рисунок 1 – График мощности узла нагрузок за период с 01.06.2023 по 08.06.2023

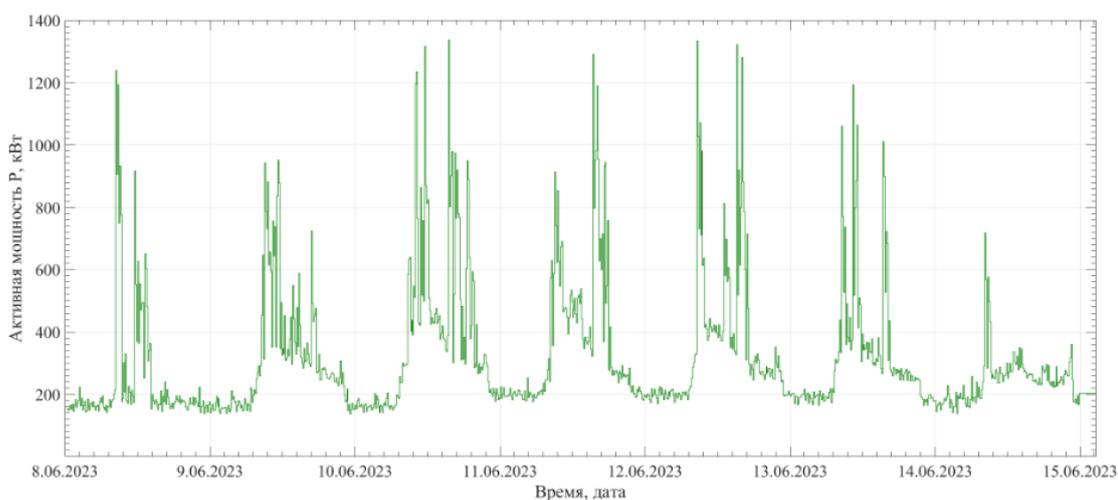


Рисунок 2 – График мощности узла нагрузок за период с 08.06.2023 по 15.06.2023

Суточный график мощности исследуемого электротехнического комплекса может быть дискретно разложен на первом уровне, используя вейвлет-функции с коэффициентами фильтров нижних (h_0, h_1) и верхних частот (g_0, g_1) в матричном виде согласно определенной формуле:

$$\begin{pmatrix} h_0 & h_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & g_0 & g_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ P_{2047} \\ P_{2048} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{j,0}^A \\ P_{j,1}^A \\ \dots \\ P_{j,n/2}^A \\ P_{j,0}^D \\ P_{j,1}^D \\ \dots \\ P_{j,n/2}^D \end{pmatrix}. \tag{2}$$

Для вейвлета Хаара коэффициенты фильтров нижних h_0, h_1 равны [5]:

$$h_0(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, h_1(k) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Повторив процедуру для аппроксимирующих коэффициентов первого уровня разложения $P_{1,0}^A = [P_{1,0(1)}^A \ P_{1,0(2)}^A \ P_{1,0(3)}^A \ \dots \ P_{1,0(1023)}^A \ P_{1,0(1024)}^A]$ в соответствии со схемой на рисунке 3 можно получить аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты второго уровня разложения и т. д. [5].

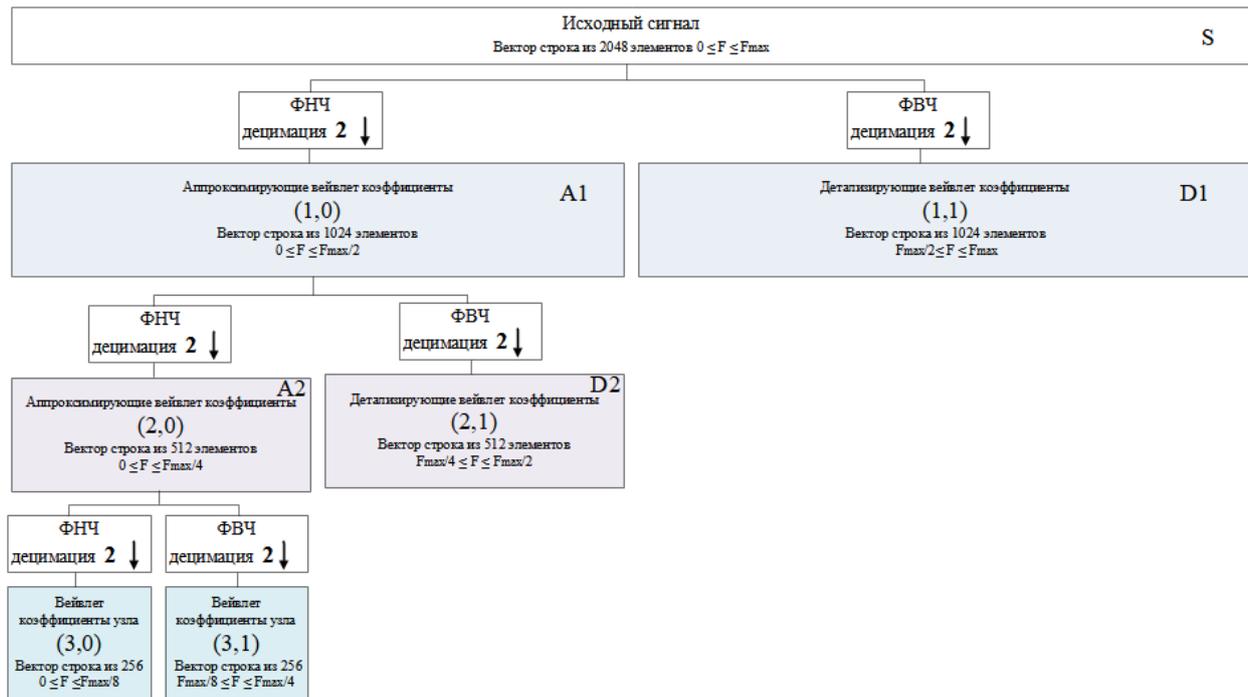


Рисунок 3 – Схема дискретного вейвлет-разложения исследуемого сигнала мощности узла нагрузок до 3 уровня

В данной работе используется 10-й уровень разложения в качестве основы для построения линии тренда, так как это соответствует интервалу времени в 7 суток. Размерность матрицы аппроксимирующих вейвлет-коэффициентов 10 уровня составит 1×2 , что означает по одной ступени на каждую неделю измерений ($\Delta t = 10240 \text{ мин}$). Исходя из взаимного расположения полученных ступеней (размерностей вейвлет-коэффициентов), можно сделать однозначное заключение о характере изменения нагрузки.

В качестве дополнительной промежуточной иллюстрации работы предлагаемой методики представим вейвлет-коэффициенты 6 уровня разложения (рисунок 4).

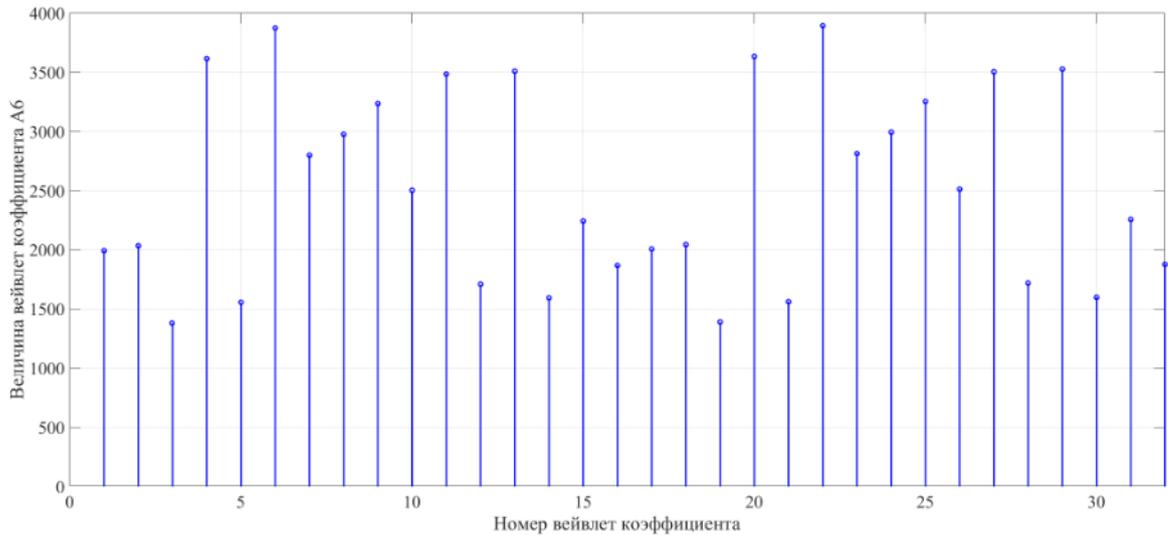


Рисунок 4 – Аппроксимирующие вейвлет-коэффициенты 6 уровня разложения

Как видно, количество вейвлет-коэффициентов 6 уровня составляет 32 элемента, что позволяет говорить о интервале усреднения в 640 минут. Аппроксимирующий вейвлет-коэффициент 10 уровня разложения будет состоять из 2 элементов:

$$A_{10} = \begin{bmatrix} 10086 \\ 10137 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Обратное вейвлет-преобразование (реконструкция) сигнала мощности может быть выполнена по формуле:

$$\begin{pmatrix} H_0 & 0 & \dots & 0 & G_0 & 0 & \dots & 0 \\ H_1 & 0 & \dots & 0 & G_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_0 & \dots & 0 & 0 & G_0 & \dots & 0 \\ 0 & H_1 & \dots & 0 & 0 & G_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & H_0 & 0 & 0 & \dots & G_0 \\ 0 & 0 & \dots & H_1 & 0 & 0 & \dots & G_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_{Aj,0}^A \\ P_{Aj,1}^A \\ \dots \\ P_{Aj,n/2}^A \\ P_{Aj,0}^D \\ P_{Aj,1}^D \\ \dots \\ P_{Aj,n/2}^D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ P_{2047} \\ P_{2048} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Для выделения трендовой составляющей необходимо использовать одиночную ветвь вейвлет-коэффициентов для восстановления сигнала мощности. При этом все остальные элементы дерева вейвлет-разложения будут обнулены. Результатом обратного вейвлет-преобразования для одиночной ветви аппроксимирующих вейвлет-коэффициентов является двухступенчатый график (рисунок 5), где каждая ступень соответствует одной неделе измерений времени.

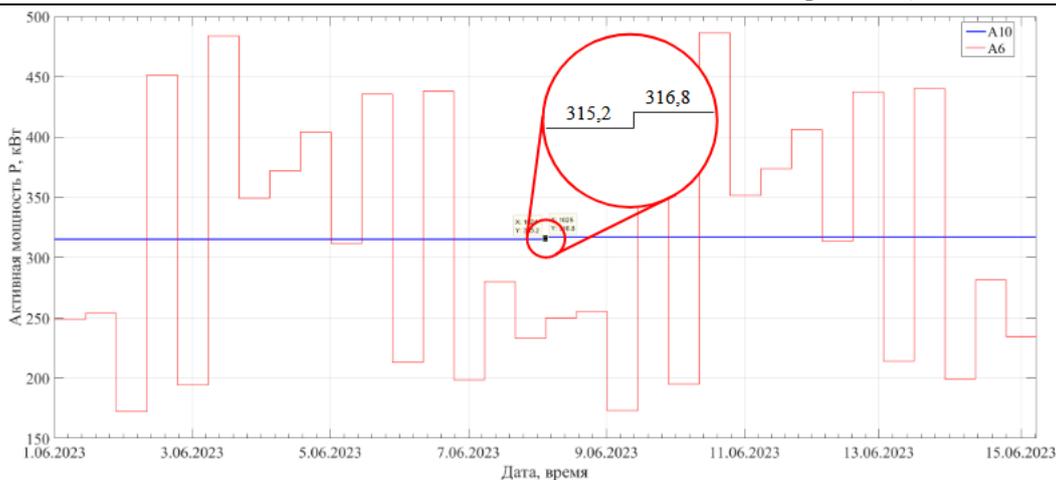


Рисунок 5 – Восстановление (обратное вейвлет-преобразование) по одиночным ветвям А6, А10

Первая ступень имеет мощность 315,2 кВт, вторая ступень – 316,8 кВт, что показывает увеличение потребляемой мощности на 0,5 % еженедельно. Полученные аппроксимирующие вейвлет-коэффициенты могут быть экстраполированы с использованием различных методов, таких как квадратичная экстраполяция, для прогнозирования на будущий период времени.

Заключение и выводы

Предложенный вариант модернизации прогнозирования среднесрочного потребления электрической энергии предполагает использование трендовой линии, полученной с помощью вейвлет-преобразования, вместо фактического графика потребления мощности. Таким образом, прогнозирование будет основано на более стабильных данных, исключая случайные колебания потребляемой мощности.

Литература

1. Разработка моделей прогнозирования электропотребления на основе временных рядов в изолированных энергосистемах / Д. Х. Худжасаидов, А. Г. Русина, П. В. Матренин [и др.]. – Текст : непосредственный // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 3(48). – С. 23–27.
2. Ерошенко, С. А. Краткосрочное прогнозирование и планирование режимов фотоэлектрических электростанций: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 / Ерошенко Станислав Андреевич. – Новосибирск: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Новосибирский государственный технический университет, 2020. – 201 с. – Текст : непосредственный.
3. Ковалев, В. З. Анализ методов прогнозирования потребления электрической энергии и мощности / В. З. Ковалев, С. Ю. Швецов, О. В. Архипова. – Текст : непосредственный // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 4(100). – С. 127–141.
4. 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.
5. Надтока, И. И. Модель прогнозирования электропотребления энергорайонов и региона с учетом влияния метеофакторов / И. И. Надтока, В. А. Бугаец, М. В. Юрушкин. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2014. – № 3. – С. 40–44.
6. Сидоров, С. Г. Анализ временных рядов как метод построения прогноза потребления электроэнергии / С. Г. Сидоров, А. В. Никологорская. – Текст: непосредственный // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2010. – № 3. – С. 81–83.