

АЛГОРИТМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СУТОЧНЫХ ГРАФИКОВ НАГРУЗОК ДЛЯ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ГИБРИДНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

В работе представлен алгоритм частотной декомпозиции суточных графиков нагрузок на основе дискретного вейвлет-преобразования. Разработанный алгоритм позволяет выбрать оптимальный тип вейвлет-функции, оптимальный уровень и дерево вейвлет-разложения. Обратное вейвлет-преобразование (восстановление) по одиночной ветви аппроксимирующего коэффициента позволяет получить низкочастотную составляющую графика мощности для выбора оптимального состава и режима батареи гибридного накопителя энергии. Детализирующая ветвь вейвлет-коэффициентов определяет режим работы суперконденсатора. Численный эксперимент построен на основании данных, полученных с применением сертифицированного оборудования.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, обособленные электротехнические комплексы, возобновляемые источники энергии, гибридные накопители энергии, суперконденсатор, электротехнический комплекс генерирования электрической энергии.

Введение. Существенное влияние на развитие энергетики Ханты-Мансийского автономного округа — Югры (ХМАО) оказывают специфика природных условий и неравномерность распределения инфраструктуры [1]. Для электроснабжения северных регионов РФ, работающих изолированно от единой энергетической системы (ЕЭС), одной из перспективных схем является создание единых систем: ветроэлектростанция — дизельэлектростанция (ВЭС-ДЭС) [2, с. 114]. При более общем подходе применяется построение электротехнических комплексов в составе: возобновляемые источники энергии (ВИЭ), дизельэлектростанция, накопитель энергии (НЭ), преобразователи энергии (ПЭ), потребитель электрической энергии (ПЭЭ). Отметим, что ключевой характеристикой, определяющей компоновку указанного электротехнического комплекса, является график потребления электрической энергии, задаваемый технологическим циклом ПЭЭ. Одним из определяющих факторов при проектировании изолированных электротехнических систем, в состав которых входят регионально обособленные электротехнические комплексы (РОЭТК), является оптимизационная задача «снижения общих расходов... при сохранении заданных объемов, качества

и надежности производства электрической энергии» [3, с. 45]. Для сглаживания эффекта нестабильности потока ветра или других источников ВИЭ в современной электроэнергетике все чаще совместно с ВЭС применяются гибридные накопители энергии, состоящие из двух основных элементов — аккумуляторной батареи и суперконденсатора [4]. Один из вариантов возможного построения электротехнического комплекса генерирования электрической энергии (ЭТК ГЭЭ) представлен на (рис. 1). На сегодня одной из самых дорогих компонент ЭТК ГНЭ является ГНЭ. Соответственно, целью настоящей работы становится построение методики оптимального выбора параметров гибридных накопителей энергии, как элементов ЭТК ГЭЭ.

Для оптимального выбора компонент гибридного накопителя электроэнергии необходимо учитывать различие в длительности оптимального цикла работы аккумуляторной батареи и суперконденсатора. Если для аккумулятора данный цикл измеряется несколькими часами, то для суперконденсатора речь идет о минутах. Другой немаловажной особенностью графиков электрических нагрузок РОЭК является значительные изменения потребляемой мощности за достаточно короткие интервалы

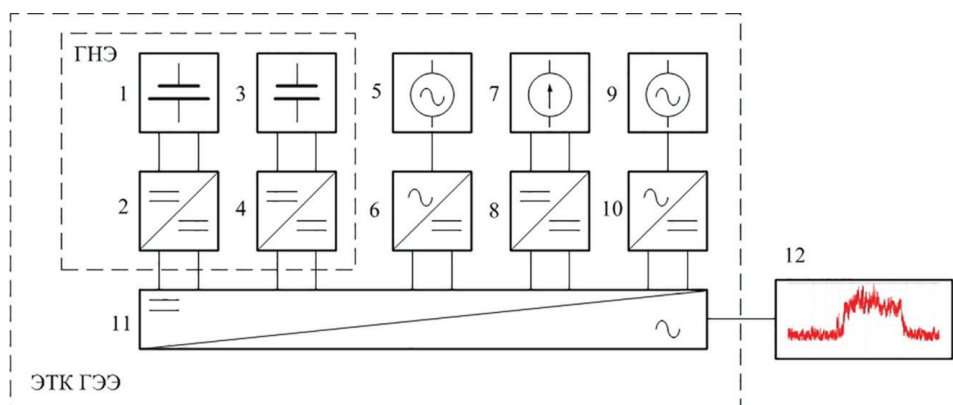


Рис. 1. Структура электротехнического комплекса с гибридным накопителем энергии:
 1 — накопитель энергии на базе аккумуляторной батареи; 3 — накопитель энергии на базе суперконденсатора; 5 — ВИЭ на базе ветрогенератора;
 7 — ВИЭ на базе фотоэлектрической батареи; 9 — дизель-генератор;
 2, 4, 6, 8, 10, 11 — преобразователи энергии;
 12 — потребитель электрической энергии, имеющий характерный график нагрузки (рис. 2);
 ГНЭ — гибридный накопитель электрической энергии;
 ЭТК ГЭЭ — электрический комплекс генерирования электрической энергии

времени. Аналогичные коэффициенты неравномерности графиков нагрузок также имеют административные здания и сооружения, жилой фонд. Для анализа динамики сложных нестационарных процессов в электроэнергетике все чаще применяется математический аппарат вейвлет-преобразования. Вейвлет-преобразование позволяет реализовать частотно-временной анализ графиков мощности при наличии резкопеременной нагрузки [5].

Теоретические основы вейвлет-преобразования. В настоящее время в науке и технике принято различать непрерывное и дискретное вейвлет-преобразование. Вейвлет-преобразование позволяет анализировать динамику процесса в трех измерениях — время, амплитуда, частота. При этом базисная вейвлет-функция подвергается сдвигам (b_0) и масштабированию (a_0):

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

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

В результате вейвлет-преобразования временной ряд может быть представлен набором аппроксимирующих (A) и детализирующих коэффициентов (D), которые будут характеризовать различные частотные диапазоны:

$$i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^A \varphi_{j,k}(t) + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} i_{j,k}^D \psi_{j,k}(t). \quad (2)$$

В настоящее время разработано несколько десятков различных вейвлет-функций, в том числе и для решения актуальных задач электроэнергетики — анализа показателей качества электроэнергии [6, 7], анализа переходных процессов, выбора релейной защиты, настройки системы автоматического регулирования возбуждения [8] и др. Выбор оптимальной вейвлет-функции для решения конкретной задачи может осуществляться исходя из соображений минимального среднеквадратического отклонения восстановленной и исходной функции (временного ряда). Второе условие — максимум энергии спектра, исследуемого частотного диапазона, должен заключаться в принятом узле дерева вейвлет-разложения, что напрямую связано с амплитудно-частотной характеристикой вейвлета.

Критерий выбора оптимальной вейлет-функции, с учетом вышеизложенного, можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (P_k - \hat{P}_k)^2}{\sum_{k=1}^n P_k^2}} \rightarrow \min; \\ \Delta_{En} &= \frac{E_n}{E_\Sigma} \frac{\sum_{k=n}^{\infty} |P_{j,k}^A|^2 + \sum_{k=n}^{\infty} |P_{j,k}^D|^2}{\sum_{k=-\infty}^{\infty} |P_{j,k}^A|^2 + \sum_{j=J}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} |P_{j,k}^D|^2} \rightarrow \max. \end{aligned} \right. \quad (3)$$

В статье [9] авторы для анализа режимов накопителей энергии исследуют 18 типов вейвлет-функций. Достаточно приемлемые по точности результаты показывает известный вейвлет Хаара, который может быть задан следующим неравенством:

$$\psi_{Haar,t} = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 < t < 0,5 \\ -1, & \text{если } 0,5 < t < 1. \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (4)$$

Для вейвлет-преобразования существует аналог равенства Парсеваля:

$$E_p = \int p^2(t) dt = C_\psi^{-1} \iint V^2(a,b) \frac{dad b}{a^2}. \quad (5)$$

Последнее утверждение позволяет применять вейвлет-преобразование для частотной декомпозиции сложных гармонических сигналов, в том числе графиков нагрузок, при этом общая энергия сигнала до и после преобразования не изменяется.

Предлагаемый алгоритм вейвлет-анализа графиков нагрузки. В изолированных электротехнических системах на базе ВИЭ зачастую возникает проблема обеспечения показателей качества электроэнергии. Методы вейвлет-преобразования позволяют анализировать спектральный состав токов и напряжений. Источники бесперебойного питания, в свою очередь, также могут быть причиной искажения качества электроэнергии [10]. Таким образом, применение вейвлет-преобразования позво-

ляет решить целый комплекс актуальных задач для оптимизации ЭТК ГЭЭ с учетом различных режимов и воздействий оказываемых суточным графиком электрической нагрузки ПЭЭ.

Для анализа суточного графика электрических нагрузок, с целью оптимального выбора параметров гибридного накопителя электроэнергии, состоящего из аккумуляторной батареи и суперконденсатора выберем аппарат дискретного вейвлет-преобразования. Алгоритм анализа суточных графиков нагрузки может быть представлен в следующем виде.

Шаг 1. Ввод исходных данных суточного графика нагрузки с частотой дискретизации, определяемой характеристиками цифровых регистрирующих терминалов. На основании данных о частоте дискретизации сигнала определяются оптимальное дерево и глубина вейвлет-разложения.

Шаг 2. Выбор оптимальной вейвлет-функции в соответствии с условием (3).

Шаг 3. Дискретное вейвлет-преобразование исходного графика электрических нагрузок в соответствии с формулой (6):

$$\begin{pmatrix} h_0 & h_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & g_0 & g_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ P_{j,n/2}^D \\ \dots \\ P_{1439} \\ \dots \\ P_{1440}^D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{j,0}^A \\ P_{j,1}^A \\ \dots \\ P_{j,n/2}^A \\ P_{j,0}^D \\ P_{j,1}^D \\ \dots \\ P_{1439} \\ P_{j,n/2}^D \end{pmatrix} \quad (6)$$

Шаг 4. Выделение низкочастотной (аппроксимирующей) составляющей для моделирования режима работы аккумуляторной батареи. Обратное преобразование — восстановление одиночной ветви (аппроксимирующих коэффициентов) для построения графика работы батареи.

Шаг 5. Выделение высокочастотной составляющей (аппроксимирующие коэффициенты начальных уровней разложения) для анализа режима работы суперконденсатора. Обратное вейвлет-преобразование по одиночной ветви детализирующих коэффициентов.

Процедура восстановления может быть реализована с помощью выражения (7).

$$\begin{pmatrix} H_0 & 0 & \dots & 0 & G_0 & 0 & \dots & 0 \\ H_1 & 0 & \dots & 0 & G_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & H_0 & \dots & 0 & 0 & G_0 & \dots & 0 \\ 0 & H_1 & \dots & 0 & 0 & G_1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & H_0 & 0 & 0 & \dots & G_0 \\ 0 & 0 & \dots & H_1 & 0 & 0 & \dots & G_1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_{Aj,0}^A \\ P_{Aj,1}^A \\ \dots \\ P_{Aj,n/2}^A \\ P_{Aj,0}^D \\ P_{Aj,1}^D \\ \dots \\ P_{1439} \\ P_{Aj,n/2}^D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \dots \\ \dots \\ \dots \\ P_{1439} \\ P_{1440} \end{pmatrix} \quad (7)$$

При этом, если требуется восстановить сигнал по одиночной ветви вейвлет-коэффициентов, то достаточно обнулить вейвлет-коэффициенты других узлов дерева вейвлет-разложения.

Результаты экспериментов. Для проведения численного эксперимента за основу был взят суточный график административного корпуса ПАО «Омский

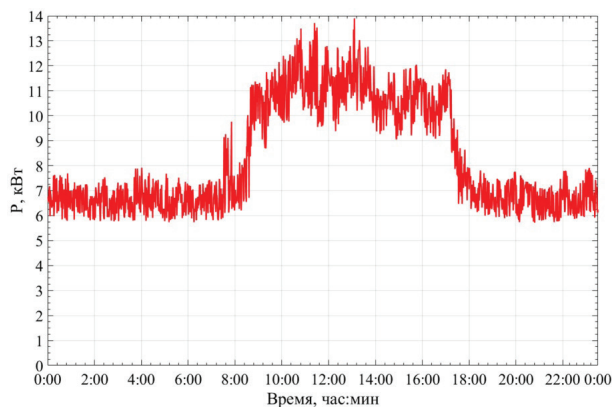


Рис. 2. Исследуемый суточный график активной мощности

каучук» за характерные летние сутки (рис. 2). Измерения производились с применением сертифицированного прибора для измерения показателей качества электроэнергии Metrel MI 2792A (Словакия). График административного корпуса характерен для большинства предприятий, работающих в односменном режиме. Следует отметить, что подобный вид имеют и суточные графики нагрузок РОЭТК. Суточный график представлен значениями мощности, полученными с интервалом в 1 минуту, таким образом, исходная частота дискретизации временного ряда составляет $F_d \approx 16,7 \cdot 10^{-3}$ (Гц).

Вейвлет Хаара (4) примем в качестве основного, тогда коэффициенты вейвлет-фильтра могут быть определены по следующим формулам:

$$h_0(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$h_1(k) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

В соответствии со схемой дискретного вейвлет-разложения (рис. 3) определяем оптимальную глубину разложения — 6-й уровень. В этом случае после восстановления сигнала по одиночной ветви аппроксимирующих коэффициентов (А6) каждая ступень графика будет примерно соответствовать интервалу времени в один час (64 минуты). При заданной частоте дискретизации за сутки получен ряд данных мощности, состоящий из 1440 элементов. Вейвлет-коэффициент А6, таким образом, состоит из $1440/2^6 = 22,5 \approx 23$ элементов (рис. 4). Проводя процедуру обратного вейвлет-преобразования по одиночной ветви аппроксимирующих коэффициентов А6 по выражению (7), получаем восстановленный график мощности (рис. 5) с учетом только низкочастотной составляющей. Низкочастотная компонента, полученная по коэффициентам А6, для наглядности (рис. 5) совмещена с исходным суточным графиком. Полученный таким образом график нагрузок может быть принят за основу при выборе режима работы ДЭС или аккумуляторной батареи, входящей в состав гибридного накопителя энергии, в том числе и при формировании краткосрочных (до 6 часов) прогнозов по электропотреблению [11, 12].

Восстановление графика нагрузки по одиночной ветви D1 (детализирующий вейвлет-коэффициент первого уровня разложения) дает представление

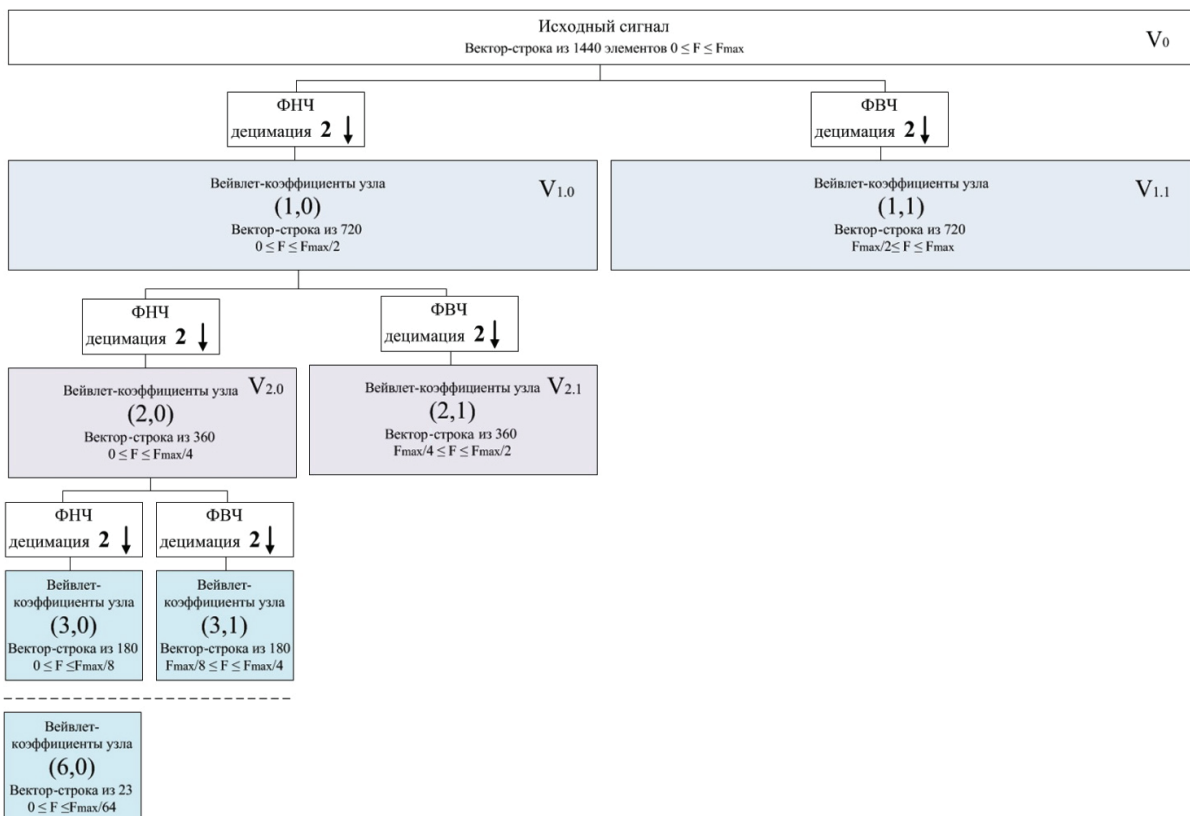


Рис. 3. Схема дискретного вейвлет-разложения графика мощности

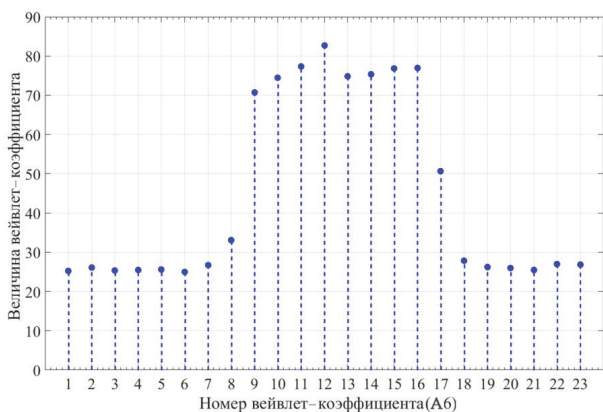


Рис. 4. Значения аппроксимирующего вейвлет-коэффициента A6

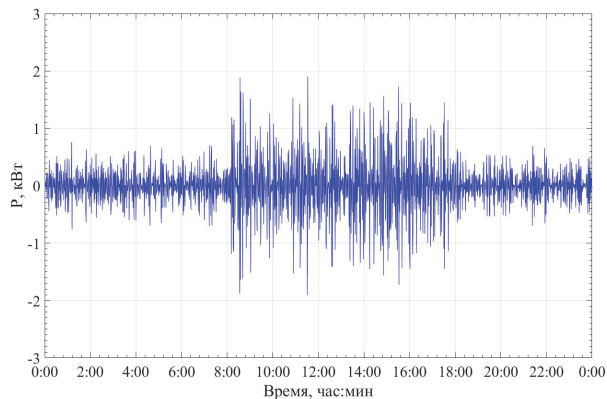


Рис. 6. Высоочастотная составляющая графика мощности по вейвлет-коэффициенту D1

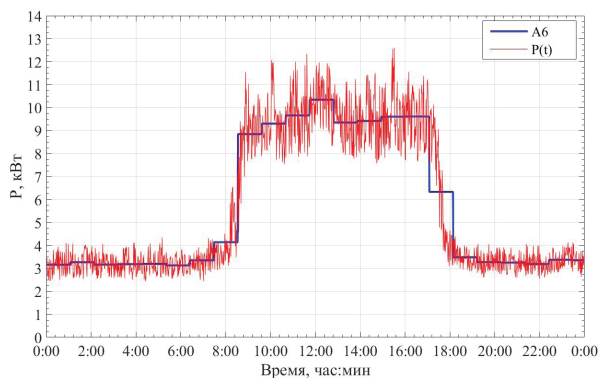


Рис. 5. Восстановленный по аппроксимирующему вейвлет-коэффициенту суточный график мощности

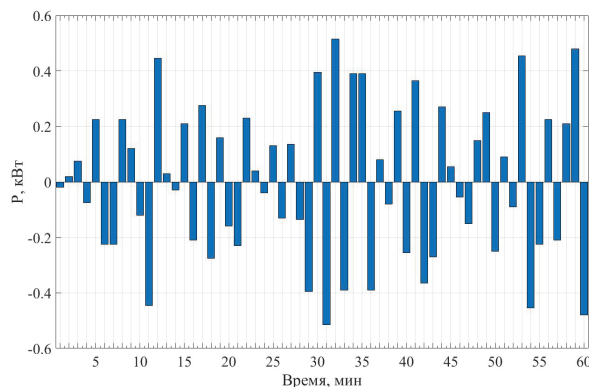


Рис. 7. График зарядки-разрядки суперконденсатора за час

Энергия спектра вейвлет-коэффициентов

Энергия спектра отдельных вейвлет-коэффициентов, %						
A5	D1	D2	D3	D4	D5	D6
98,1317	0,5379	0,3377	0,1842	0,1590	0,1742	0,4753

о режиме работы суперконденсатора гибридного накопителя электроэнергии (рис. 5). Поскольку вейвлет-коэффициент $D1$ имеет частоту дискретизации ровно в 2 раза меньше, чем исходный сигнал, то можно говорить, что после обратного вейвлет-преобразования график (рис. 6) построен с интервалом времени в 2 минуты. Для наглядности (рис. 7) представлен график восстановленного сигнала за первый час (с 0:00 до 1:00). Непременно следует отметить, что в результате вейвлет-преобразования общая энергия сигнала мощности со знаком «плюс» (разрядка суперконденсатора) равна энергии сигнала со знаком «минус» (зарядка суперконденсатора).

В результате с помощью вейвлет-преобразования была произведена частотная декомпозиция временного ряда мощности (суточного графика нагрузки), которая позволяет выделить низкочастотную составляющую (режим работы ДЭС, аккумуляторной батареи) и высокочастотную компоненту (режим работы суперконденсатора). Представленный в работе алгоритм позволит оптимизировать выбор мощности и режима работы гибридных накопителей энергии [13] для реализации в изолированных электротехнических системах. В системах с возобновляемыми источниками электроэнергии (ВЭС), алгоритм вейвлет-анализа позволяет минимизировать эффект нестабильного потока энергии ВИЭ за счет правильного выбора накопителей энергии [14, 15].

Поскольку восстановление сигнала мощности было реализовано по двум одиночным ветвям вейвлет-коэффициентов ($A6$, $D1$), то необходимо оценить энергию спектра отдельных вейвлет-коэффициентов. Как видно из расчета энергии спектра (табл. 1) на долю вейвлет-коэффициентов, которые были обнулены (не участвовали в процессе восстановления сигнала), приходится не более 1,4 % общей энергии сигнала.

Заключение. В настоящей работе предлагается методика оптимального выбора параметров гибридных накопителей энергии как элементов ЭТК ГЭЭ, представляющая собой: алгоритм разложения суточного графика нагрузки с помощью вейвлет-преобразования. Выделенная с помощью дискретного вейвлет-преобразования высокочастотная составляющая позволяет оптимизировать параметры и режим работы суперконденсатора, входящего в состав гибридного накопителя электроэнергии. Правильный выбор параметров накопителя позволит минимизировать негативные последствия от нестабильности потока энергии ВИЭ и согласовать их с характером нагрузки ПЭЭ. Дальнейшее развитие предложенного алгоритма может быть использовано

но для прогнозирования электрических нагрузок регионально обособленных электротехнических комплексов, поскольку вейвлет-преобразование находит широкое применение для анализа динамики сложных нелинейных процессов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства ХМАО — Югры в рамках научного проекта № 18-47-860017.

Библиографический список

1. Большаник П. В., Евланов Е. А., Исламутдинов В. Ф. [и др.] Исследование эволюции, институциональных условий и факторов развития отраслей экономики Северного ресурсодобывающего региона (на примере Ханты-Мансийского автономного округа — Югры): моногр. Ханты-Мансийск: Изд-во Югорского гос. ун-та, 2017. 445 с. ISBN 978-5-6040448-8-9.
2. Ковалев В. З., Архипова О.В. Методика оптимизации структуры парка ветро-дизельных электростанций // Нефтегазовое дело. 2014. Т. 12, № 4. С. 112–125.
3. Архипова О. В. Принципы и средства исследования регионально обособленного электротехнического комплекса с позиций системного анализа // Омский научный вестник. 2020. № 3 (171). С. 42–46.
4. Guo T., Liu Y., Zhao J. [et al.]. A dynamic wavelet-based robust wind power smoothing approach using hybrid energy storage system // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 116. DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.105579.
5. Зацепина В. И., Зацепин Е. П., Шачнев О. Я., Шачнева Ю. П. Wavelet-разложение высокочастотных сигналов для детализации негативных возмущений // Вести высших учебных заведений Черноземья. 2017. № 2 (48). С. 26–33.
6. Белицын И. В. Алгоритм анализа временных рядов на основе вейвлет-технологий для мониторинга показателей качества электрической энергии // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2017. № 3-4. С. 184–187.
7. Горовой С. А., Симаков А. В., Скороходов В. И. Анализ несинусоидального режима работы системы электроснабжения на основе вейвлет-преобразования цифрового потока мгновенных значений тока // Известия Транссиба. 2019. № 4 (40). С. 96–105.
8. Булатов Ю. Н., Крюков А. В. Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. № 2 (63). С. 7–22.
9. Cheng L., Zhang F., Liu S. [et al.]. Configuration method of hybrid energy storage system for high power density in more electric aircraft // Journal of Power Sources. 2020. Vol. 445. 5 p. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227322.

10. Добуш В. С., Бельский А. А. Анализ влияния источников бесперебойного питания на качество электроэнергии в точке общего подключения потребителей // Промышленная энергетика. 2018. № 6. С. 29–34.

11. Yan K., Li W., Ji Z. [et al.]. A hybrid LSTM neural network for energy consumption forecasting of individual households // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 157633–157642. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2949065.

12. Aprillia H., Yang H.-T, Huang C.-M. Optimal decomposition and reconstruction of discrete wavelet transformation for short-term load forecasting // Energies. 2019. Vol. 12, no. 24. DOI: 10.3390/en12244654.

13. Zhang L., Hu X., Wang Z. [et al.]. Multiobjective optimal sizing of hybrid energy storage system for electric vehicles // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2018. Vol. 67, Issue 2. P. 1027–1035. DOI: 10.1109/tvt.2017.2762368.

14. Ding M., Wu J. A novel control strategy of hybrid energy storage system for wind power smoothing // Electric Power Components and Systems. 2017. Vol. 45, Issue 12. P. 1265–1274. DOI: 10.1080/15325008.2017.1346004.

15. Shi J., Wang L., Lee W.-J. [et al.]. Hybrid energy storage system (HESS) optimization enabling very short-term wind power generation scheduling based on output feature extraction // Applied Energy. 2019. Vol. 256. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113915.

АРХИПОВА Ольга Владимировна, старший преподаватель института нефти и газа.

SPIN-код: 1764-6163

AuthorID (РИНЦ): 637176

ORCID: 0000-0002-8773-8846

AuthorID (SCOPUS): 57211266487

ResearcherID: G-5205-2012

Адрес для переписки: arkh82@mail.ru

ДОЛГИХ Надежда Николаевна, старший преподаватель института нефти и газа.

SPIN-код: 3679-4944

AuthorID (РИНЦ): 828105

ORCID: 0000-0002-7404-0596

AuthorID (SCOPUS): 57193404041

ResearcherID: O-8241-2016

Адрес для переписки: N_Dolgikh@ugrasu.ru

ДОЛИНГЕР Станислав Юрьевич, кандидат технических наук, доцент института нефти и газа.

SPIN-код: 1922-1321

AuthorID (РИНЦ): 642639

ORCID: 0000-0001-6897-4440

AuthorID (SCOPUS): 57190176871, 56826081700

ResearcherID: A-5526-2014

Адрес для переписки: dolingersy@gmail.com

КОВАЛЕВ Владимир Захарович, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор института нефти и газа.

SPIN-код: 4571-7212

AuthorID (РИНЦ): 345037

ORCID: 0000-0002-4512-6868

AuthorID (SCOPUS): 57206660845

ResearcherID: K-6022-2012

Адрес для переписки: vz_kovalev@mail.ru

ОСИПОВ Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор института нефти и газа.

SPIN-код: 2220-3520

AuthorID (РИНЦ): 175832

ORCID: 0000-0002-0830-408X

AuthorID (SCOPUS): 57188873609

ResearcherID: B-1019-2016

Адрес для переписки: d_osipov@ugrasu.ru

Для цитирования

Архипова О. В., Долгих Н. Н., Долингер С. Ю., Ковалев В. З., Осипов Д. С. Алгоритм вейвлет-преобразования суточных графиков нагрузок для выбора параметров гибридных накопителей энергии // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 57–62. DOI: 10.25206/1813-8225-2020-174-57-62.

Статья поступила в редакцию 09.11.2020 г.

© О. В. Архипова, Н. Н. Долгих, С. Ю. Долингер,
В. З. Ковалев, Д. С. Осипов