

TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL FEATURES OF THE APPLICATION OF RENEWABLE ENERGY FOR DECENTRALIZED POWER SUPPLY ZONES

Dolgikh N.N.¹, Osipov D.S.¹, Osipova N.D.²

¹⁾ Ugra State University, 16, Chehov str., Khanty-Mansiysk 628012, Russia

²⁾ Saint Petersburg Mining University, 2, 21st Line, St Petersburg 199106, Russia

nabal2006@list.ru

Citation: Dolgikh N.N., Osipov D.S., Osipova N.D. 2022. Technical and environmental features of the application of renewable energy for decentralized power supply zones // Environmental dynamics and global climate change. V. 13. N. 4. P. 182-193.

DOI: 10.18822/edgcc134196

Особенностью географического положения Ханты-Мансийского автономного округа – Югры является наличие большого количества зон децентрализованного электроснабжения. Для сравнительной экологической оценки установок ВИЭ необходимо учитывать выбросы всего жизненного цикла. На протяжении всего представленного цикла от добычи до производства конструкций электростанций и затем утилизации объекта присутствует значительная часть выбросов CO₂. Актуальной становится проблема демонтажа и утилизации отработавших конструкций ветровых электростанций.

С технической точки зрения, необходимо учитывать режимные параметры: показатели качества электроэнергии в точке присоединения, уровни напряжения в узлах нагрузки, режимы работы накопителей энергии. Для оценки параметров работы изолированной системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии в данной работе предлагается использовать метод вейвлет-преобразования. Представлена математическая модель, позволяющая получить низкочастотную (трендовую) составляющую и высокочастотную составляющую с помощью вейвлет-преобразования. Модель позволяет осуществить оптимальный выбор гибридного накопителя энергии для возобновляемого источника энергии - аккумулятора и суперконденсатора.

Ключевые слова: эмиссия жизненного цикла, возобновляемые источники энергии, децентрализованные системы электроснабжения, качество электроэнергии, вейвлет преобразование.

Key words: life cycle emissions, renewable energy sources, decentralized power supply systems, power quality, wavelet transform

SUMMARY

A feature of the geographical location of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug - Yugra is the presence of a large number of zones of decentralized power supply. For a comparative environmental assessment of renewable energy installations, it is necessary to take into account the emissions of the entire life cycle. Throughout the presented cycle from mining to the production of power plant structures and then the disposal of the facility, a significant part of CO₂ emissions is present. The problem of dismantling and recycling of spent structures of wind power plants is becoming essential. Wind turbines cause the death of birds, violate the conditions of comfortable living for people and animals

From a technical point of view, it is necessary to take into account the regime parameters: indicators of the quality of electricity at the point of connection, voltage levels at load nodes, operating modes of energy storage devices. To assess the operating parameters of an isolated power supply system with renewable energy sources, this paper proposes to use the wavelet transform method. The Haar wavelet was used as a basic function in the paper. A mathematical model is presented that makes it possible to obtain a low-frequency (trend) component and a high-frequency component using the wavelet transform. The model allows for the optimal choice of a hybrid energy storage device for a renewable energy source - a battery and a supercapacitor.

MATERIALS AND METHODS

The object of this study is the isolated power supply systems of the hard-to-reach northern territories of Russia. Such systems are equipped with combined power plants, which include a diesel generator and one or more types of

renewable energy sources (RES). For the Khanty-Mansi Autonomous Okrug - Yugra, solar panels and wind power plants are the most widely used RES, a significant limitation of which is unstable generation depending on wind speed and the number of sunny days. Accordingly, there is a scientific and technical problem of the optimal distribution of generating elements, taking into account the daily curves of electrical loads. Energy surpluses during hours of minimum consumption can be concentrated in storage devices - rechargeable batteries and supercapacitors. With a sharp increase in demand for electricity, the storage devices will give it to the consumer.

One of the key parameters for the functioning of isolated power supply systems with RES have to be indicators of the quality of electricity. The current standard GOST 32144-2013 (Power quality standards in general-purpose power supply systems) defines, among others, the requirements for the shape of the voltage curve. The two indicators introduced are:

- the value of the voltage harmonic factor up to the 40th order

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (1)$$

- the value of the total voltage harmonic factor

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (2)$$

To solve scientific and practical problems, methods of continuous (3), discrete (4) and packet wavelet transform have been developed and successfully applied [Smolentsev N.K. 2014]:

$$\hat{F}(a, b) = |a|^{-1/2} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-m/2} \int f(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt. \quad (4)$$

where $\psi_{j,k}(t)$ is the mother wavelet function. Formula (4) results from formula (3), given that a and b take only discrete values: $a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$, $a, m, n \in \mathbb{Z}$ [Smolentsev N.K. 2014].

The properties of the wavelet transformation can also be used to analyze load curves for consumers of a decentralized power supply system in order to optimally select the operating mode in the presence of a combined generation system: solar panels and wind turbines. Discrete decomposition of the daily power curve of a group of consumers of an isolated power supply system at the first level, taking into account the fact that each wavelet function can be characterized by the filter coefficients of the lower h_0 , h_1 and high g_0 , g_1 frequencies in matrix form, is implemented by the formula:

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_1 & 0 & 0 & K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & K & K & 0 & 0 \\ K & K & K & K & K & K & K & K \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K & K & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & 0 & 0 & K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K & K & g_0 & g_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ K \\ K \\ K \\ P_{n-1} \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{j,0}^A \\ P_{j,1}^A \\ K \\ P_{j,n/2}^A \\ P_{j,0}^D \\ P_{j,1}^D \\ K \\ P_{j,n/2}^D \end{bmatrix} \quad (5)$$

For the Haar wavelet, the coefficients of the lower h_0 , h_1 filters are equal:

$$h_0(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad h_1(k) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

By repeating the procedure for the approximating coefficients of the first level of decomposition

$P_{1,0}^A = [P_{1,0(1)}^A \ P_{1,0(2)}^A \ P_{1,0(3)}^A \ \dots \ P_{1,0((n-1)/2)}^A \ P_{1,0(n/2)}^A]$ in accordance with the scheme (Fig. 3), one can obtain

approximating and detailing coefficients of the second level of decomposition, etc.

The inverse wavelet transformation (reconstruction) of the signal can be performed by the formula:

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

The inverse wavelet transformation makes it possible to switch to the original format of the signal under study, in this case, to the dimension of active power (kW).

RESULTS & DISCUSSION

As initial data for carrying out a numerical experiment, we will take the daily curve of electrical loads of an isolated power supply system, obtained with a time interval of 1 minute using the automatic commercial electricity metering system installed at the facility (Fig. 4). A similar set of data can be obtained by the substation staff on duty, in the manual mode of fixing the power value according to the readings of wattmeters.

To identify the trend component of the electrical load curves when developing a hybrid energy storage device based on a battery and a supercapacitor, it is necessary to keep the low-frequency component unchanged. In this paper, only the wavelet coefficient A5 (Fig. 5) obtained as a result of discrete wavelet transformation of the daily curve (Fig. 4) is responsible for the low-frequency component (averaging over 32 minutes). To select the low-frequency component during restoration, it will be necessary to nullify all wavelet coefficients, except for A5 (Fig. 6).

As a result of such an operation, we obtain a daily power plot of an isolated power supply system with renewable energy sources, restored from a single branch of the wavelet coefficients of the fifth level of decomposition (Fig. 7). The reconstructed plot has an averaging period of 32 minutes and consists of 45 steps. It should be noted that such a "stepped" form of the reconstructed plot is characteristic only when the Haar wavelet is used as the basis function. The plot will have a smoother look in case of choosing another wavelet function.

For a comprehensive assessment of the effectiveness of the introduction of renewable energy sources in the power supply systems of isolated areas, an integrated accounting of environmental and technical factors is proposed. The emission of the RES life cycle must be taken as a key factor in relation to the environment protection. This issue should include the calculation of the carbon footprint in the production, operation and disposal of spent RES elements (in particular, solar panels and wind turbine blades). To assess the technical feasibility of using RES, the operating modes of both individual RES systems and combined elements should be taken into account. To calculate the power quality indicators and the optimal choice of storage devices (supercapacitors and storage batteries), the authors of this paper suggest to use discrete wavelet transformation methods. Based on the discrete wavelet decomposition using the Haar wavelet, the trend component of the electrical load plot (for choosing a battery) and the high-frequency fluctuation component for calculating and choosing a supercapacitor were identified.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в качестве дополнительных к широко применяемым типам электрических станций (атомные, тепловые, гидроэлектростанции) вводятся новые мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Как следует из определения ВИЭ – «это энергетические ресурсы постоянно существующих природных процессов на планете, а также энергоресурсы продуктов жизнедеятельности биоцентров растительного и животного происхождения» [Лукутин. 2008. С. 5]. Целесообразность использования ВИЭ на отдельных территориях определяется, прежде всего, их экономической эффективностью. При наличии крупных центров питания (АЭС, ТЭС, ТЭЦ, ГРЭС) возобновляемые источники, зачастую, оказываются менее эффективными и могут рассматриваться лишь как дополнительные. Особенностью географического положения Ханты-Мансийского автономного округа – Югры является наличие более 30 зон так называемого децентрализованного электроснабжения, т.е. городов и поселков, не имеющих связи с единой энергетической системой. Проблема децентрализованного электроснабжения характерна не только для Югры, так, «децентрализованные территории с инфраструктурной изоляцией автономных систем электроснабжения характерны для 70% территории России» [Киушкина. 2019. С. 6]. Для таких территорий (городов и поселков) особую актуальность приобретают именно ВИЭ, в частности для

Югры речь, прежде всего идет о солнечных электрических станциях и электростанциях, использующих энергию ветра.

При оценке экологической эффективности ветровых и солнечных электростанций следует учитывать то обстоятельство, что при своей работе эти типы ВИЭ не производят CO₂, однако при производстве комплектующих данных типов электростанций эмиссия CO₂ происходит. Исследования в этой области получили название «изучение эмиссии жизненного цикла» (life cycle emissions) [Безруких 2015. С. 10]. Для сравнительной экологической оценки установок возобновляемой энергетики в работе [Соснина и др. 2015] приведена схема жизненного цикла ветровой энергоустановки (рис. 1). На всем протяжении представленного цикла от добычи полезных ископаемых (руды, нефти), производства материалов (стали, меди, свинца, серной кислоты и др.), производства конструкций энергоустановки а затем и утилизации объекта присутствует значительная часть эмиссии CO₂, обусловленной указанными технологическими процессами.

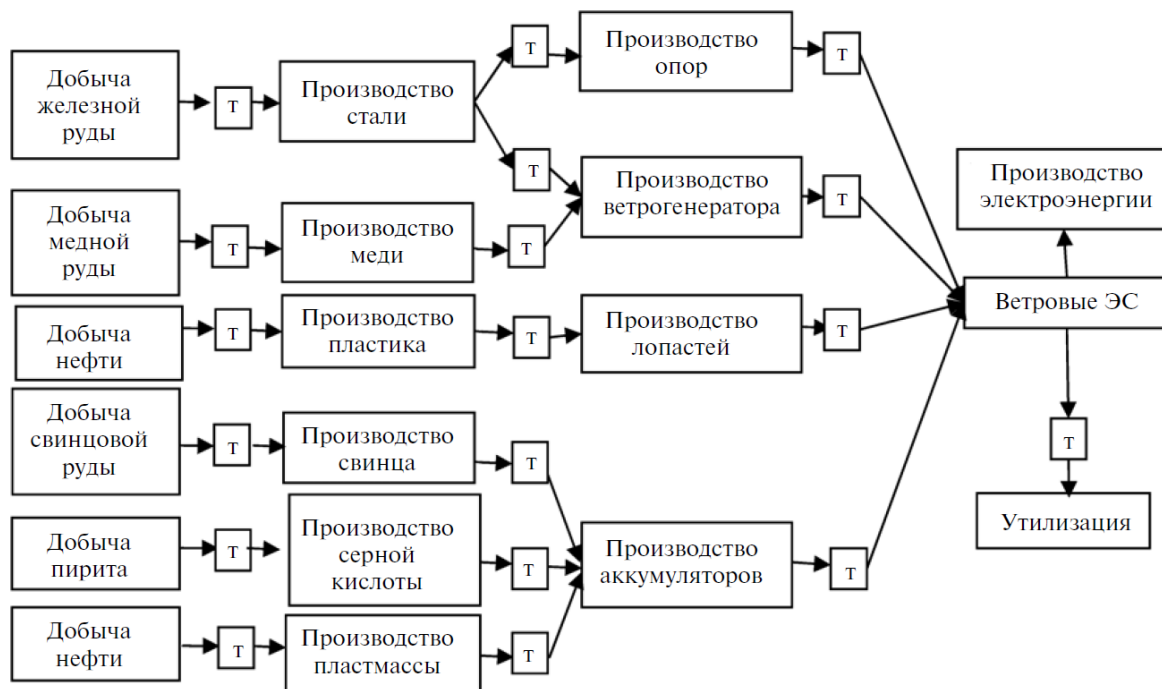


Рисунок 1. Схема жизненного цикла ВЭУ [Соснина и др. 2015. С. 6]

Также следует отметить негативное влияние лопастей ветроэнергетических установок (ВЭУ) на популяцию птиц, влияние вибрации и звуковых колебаний при вращении ВЭУ на организмы животных и человека [Виноградов и Сейфуллин 2020. С. 48]. По оценке, представленной в работе [Рыженков и др. 2011. С. 76] ежегодно в мире погибает более 28 тыс. особей птиц из-за столкновения с лопастями ВЭУ. В том числе этот печальный список пополняют и редкие, охраняемые виды птиц.

Существенное значение приобретает проблема демонтажа и утилизации отработавших конструкций ветроэнергетических установок. По своей конструкции лопасти состоят из композитных материалов, стекловолокна, эпоксидных смол и т.д., что в значительной степени затрудняет их утилизацию и переработку [Павлов. 2018. С. 147]. Сжигание лопастей приводит еще к более тяжелым последствиям для экологии за счет выброса вредных и ядовитых соединений в атмосферу.

В работе [Павлов. 2018] автором предложен способ утилизации лопастей методом дробления до гранул разных размеров и последующего использования при производстве строительных материалов. Автор приводит экономические расчеты эффективности инвестиционного дохода при повторном использовании материалов лопастей ВЭУ.

В статье [Соснина и др. 2013] приводится детальный расчет и анализ выброса вредных веществ при производстве различных типов энергоустановок на ВИЭ. Авторы приводят аргументированное обоснование, что в процессе производства всех ВИЭ происходит загрязнение окружающей среды, при этом, минимальный уровень загрязнения происходит при производстве мини-ГЭС, а максимальный при производстве солнечных энергоустановок [Соснина и др. 2013]. Оценка загрязнения окружающей среды, в том числе и деталями конструкций солнечных энергоустановок приводится в статье [Sovacool B. K. 2021].

Анализ существующих типов производства лопастей для ВЭУ с точки зрения оценки минимально возможного негативного влияния на окружающую среду приведен в работе [Liu P. et al. 2019].

Крупные ВЭУ имеют более высокую энергетическую эффективность, поскольку обладают стабильным энергетическим потенциалом ветра на высоте их башни, достигающей 100 метров [Лукутин и др. 2008. С. 112].

В структуру автономной ВЭУ (рис. 2 [Лукутин и др. 2008. С. 113]) помимо ветродвигателя и генератора входят элементы силовой электроники: выпрямитель для зарядки аккумуляторной батареи или иного накопителя, а также инвертор для преобразования постоянного тока накопителя в переменный, необходимый для подключения к электрической сети абонентов. Наличие выпрямителя и инвертора в значительной степени ухудшает показатели качества электроэнергии у потребителя. А в случае подключения ВЭУ в качестве дополнительного источника генерации к централизованной энергосистеме, появляются дополнительные вопросы о показателях качества электроэнергии в точке общего присоединения. Ряд авторов при обосновании энергетической эффективности применения ВЭУ, затрагивая вопросы обеспечения качества электроэнергии, не оценивают показатель, связанный с синусоидальностью формы кривой напряжения [Алехина Е.В. 2013]. Тем не менее, необходимые для нормального функционирования ВЭУ элементы силовой электроники (выпрямитель и инвертор) являются причиной искажения именно синусоидальности кривой напряжения.

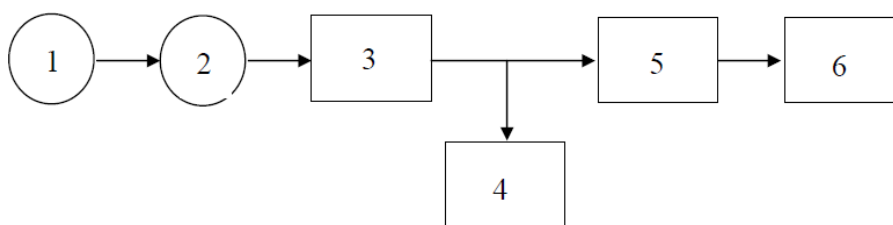


Рисунок 2. Структурная схема автономной ВЭУ [Лукутин и др. 2008. С. 113]:

1 – ветродвигатель; 2 – генератор; 3– выпрямительно-зарядное устройство; 4– аккумуляторная батарея;
5 – автономный инвертор; 6 – электрические нагрузки станции.

Таким образом, для определения эффективности применения ВИЭ для электроснабжения изолированных районов Арктики и Крайнего Севера необходимо в комплексе учитывать экологические аспекты производства, функционирования и утилизации составных частей и агрегатов ВИЭ. С технической точки зрения необходим учет режимных параметров: показателей качества электроэнергии в точке присоединения, уровни напряжения в узлах нагрузки, режимы работы накопителей электроэнергии. В настоящее время в качестве накопителей активно начинают применяться гибридные элементы состоящие из аккумуляторных батарей и суперконденсаторов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом настоящего исследования являются изолированные системы электроснабжения труднодоступных северных территорий России. Такие системы оснащаются комбинированными электростанциями, в состав которых входит дизель генератор и один или несколько видов ВИЭ. Для Ханты-Мансийского автономного округа – Югры в качестве ВИЭ наибольшее распространение получили солнечные панели и ветроэнергетические установки, существенным недостатком которых является не стабильная генерация, зависящая от скорости ветра и количества солнечных дней. Таким образом, возникает научно-техническая задача оптимального распределения генерирующих элементов с учетом суточных графиков электрических нагрузок. Избытки энергии в часы минимального потребления могут быть сосредоточены в накопителях – аккумуляторных батареях и суперконденсаторах. При резком увеличении спроса на электроэнергию накопители будут отдавать ее потребителю.

Для оценки режимных параметров функционирования изолированной системы электроснабжения с ВИЭ в настоящей работе предлагается использовать метод вейвлет преобразования.

В настоящее время продолжается разработка моделей и алгоритмов вейвлет анализа для решения широкого круга научно-технических задач. Так, в работе [Кропотов Ю.А. и др. 2015] для анализа и прогнозирования временных рядов данных о концентрациях загрязняющих веществ использован метод вейвлет преобразования. Как отмечают авторы [Кропотов Ю.А. и др. 2015. С. 185] при построении модели анализа данных о негативном воздействии промышленных производств на основе вейвлет анализа «позволяет получить информацию о данных с более низкой погрешностью за счет снижения их флуктуаций и за счет повышения отношения сигнал/шум».

Как было отмечено выше, одним из определяющих параметров функционирования изолированных систем электроснабжения с ВИЭ следует считать показатели качества электроэнергии. Действующий в настоящий момент стандарт ГОСТ 32144-2013 (Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения) определяет в числе прочих и требования к форме кривой напряжения. Введены два показателя:

– значение коэффициента гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка

$$K_{U(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (1)$$

– значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (2)$$

Для решения научно-практических задач разработаны и успешно применяются методы непрерывного (3), дискретного (4) и пакетного вейвлет преобразования [Смоленцев Н.К. 2014]:

$$\hat{F}(a, b) = |a|^{-1/2} \int f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (3)$$

$$\hat{F}_{m,n} = a_0^{-m/2} \int f(t) \psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt. \quad (4)$$

где $\psi_{j,k}(t)$ – функция материнского вейвлета. Формула (4) получается из (3), если учесть, что a и b принимают только дискретные значения: $a = a_0^m$, $b = nb_0 a_0^m$, а $m, n \in \mathbb{Z}$ [Смоленцев Н.К. 2014].

Свойства вейвлет преобразования также могут быть применены для анализа графиков нагрузок потребителей децентрализованной системы электроснабжения с целью оптимального выбора режима работы при наличии комбинированной системы генерации: солнечные панели и ВЭУ. Дискретное разложение суточного графика мощности группы потребителей изолированной системы электроснабжения на первом уровне, с учетом того, что каждая вейвлет функция может характеризоваться коэффициентами фильтров нижних h_0, h_1 и верхних частот g_0, g_1 в матричном виде реализуется по формуле:

$$\begin{bmatrix} h_0 & h_1 & 0 & 0 & K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_0 & h_1 & K & K & 0 & 0 \\ K & K & K & K & K & K & K & K \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K & K & h_0 & h_1 \\ g_0 & g_1 & 0 & 0 & K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & g_0 & g_1 & K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K & K & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & K & K & g_0 & g_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ K \\ K \\ K \\ P_{n-1} \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{j,0}^A \\ P_{j,1}^A \\ K \\ P_{j,n/2}^A \\ P_{j,0}^D \\ P_{j,1}^D \\ K \\ P_{j,n/2}^D \end{bmatrix} \quad (5)$$

Для вейвлета Хаара коэффициенты фильтров нижних h_0, h_1 равны:

$$h_0(k) = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad h_1(k) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Повторив процедуру для аппроксимирующих коэффициентов первого уровня разложения $P_{1,0}^A = [P_{1,0(1)}^A \ P_{1,0(2)}^A \ P_{1,0(3)}^A \ \dots \ P_{1,0((n-1)/2)}^A \ P_{1,0(n/2)}^A]$ в соответствии с схемой (рис. 3) можно получить аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты второго уровня разложения и т.д.

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

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

Обратное вейвлет преобразование позволяет перейти к исходному формату исследуемого сигнала, в данном случае размерности активной мощности (кВт).

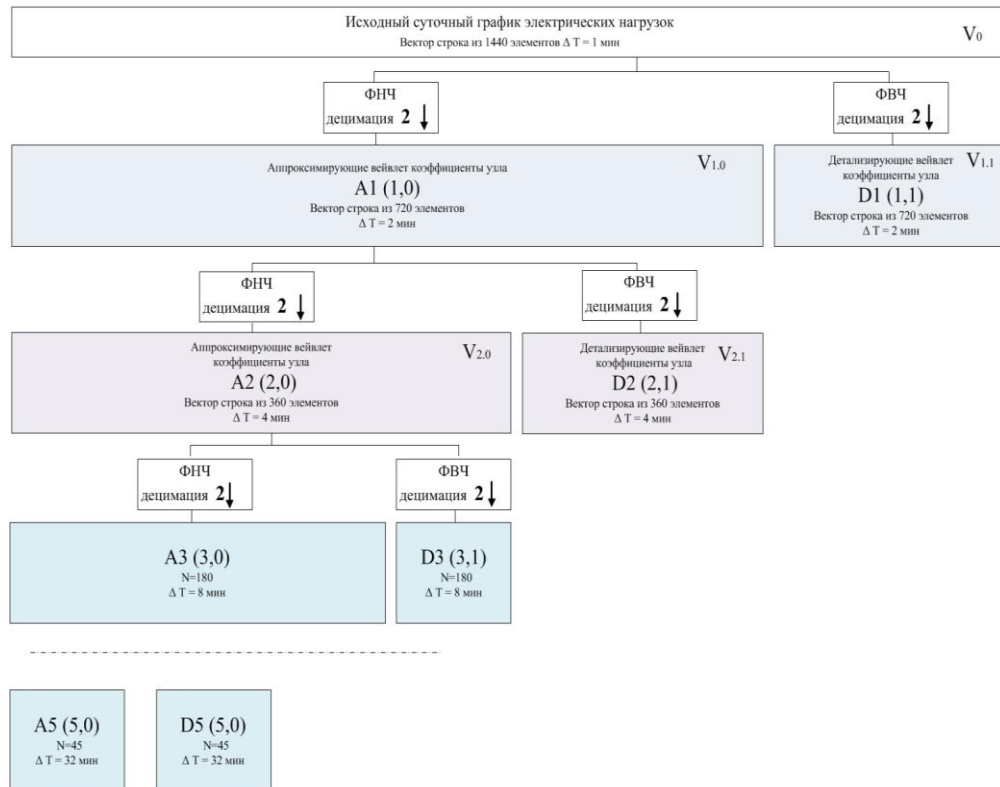


Рисунок 3. Схема дискретного вейвлет разложения до 5 уровня

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве исходных данных для проведения численного эксперимента, примем суточный график электрических нагрузок изолированной системы электроснабжения, полученный с интервалом времени в 1 минуту при помощи установленных на объекте системы автоматической системы коммерческого учета электроэнергии (рис. 4). Аналогичный набор данных может быть получен дежурным персоналом подстанции, при ручном режиме фиксации величины мощности по показаниям ваттметров.

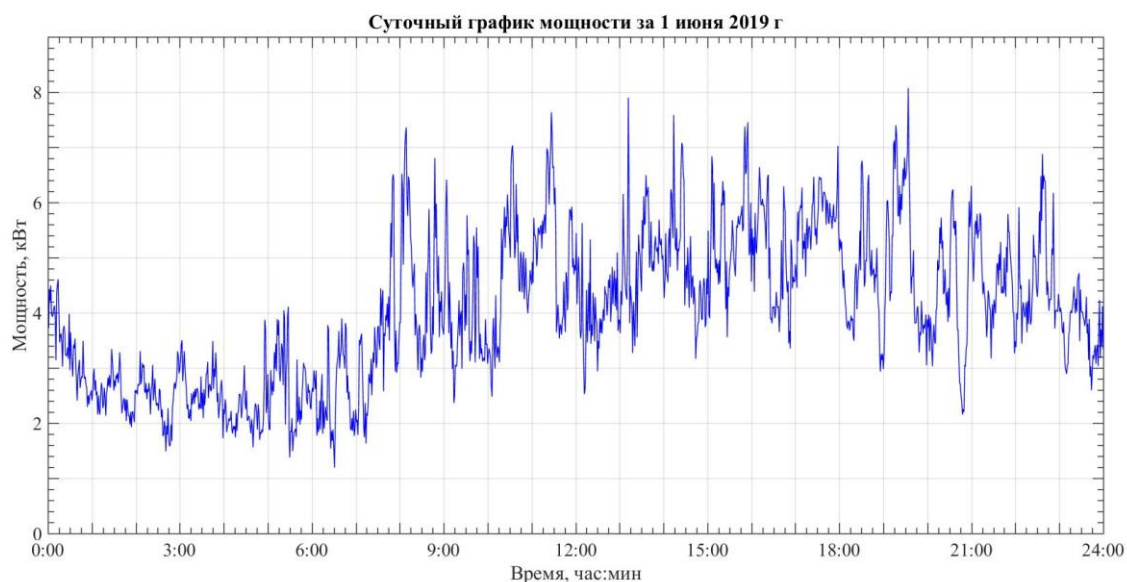


Рисунок 4. Суточный график мощности потребителя

Для выявления трендовой составляющей графика электрических нагрузок, а при разработке гибридного накопителя электроэнергии на базе аккумуляторной батареи и суперконденсатора необходимо сохранить без изменения низкочастотную составляющую. В настоящей работе, за низкочастотную компоненту (с усреднением по 32 минуты) отвечает только вейвлет коэффициент A5 (рис. 5), получаемый в результате дискретного вейвлет преобразования суточного графика (рис. 4).

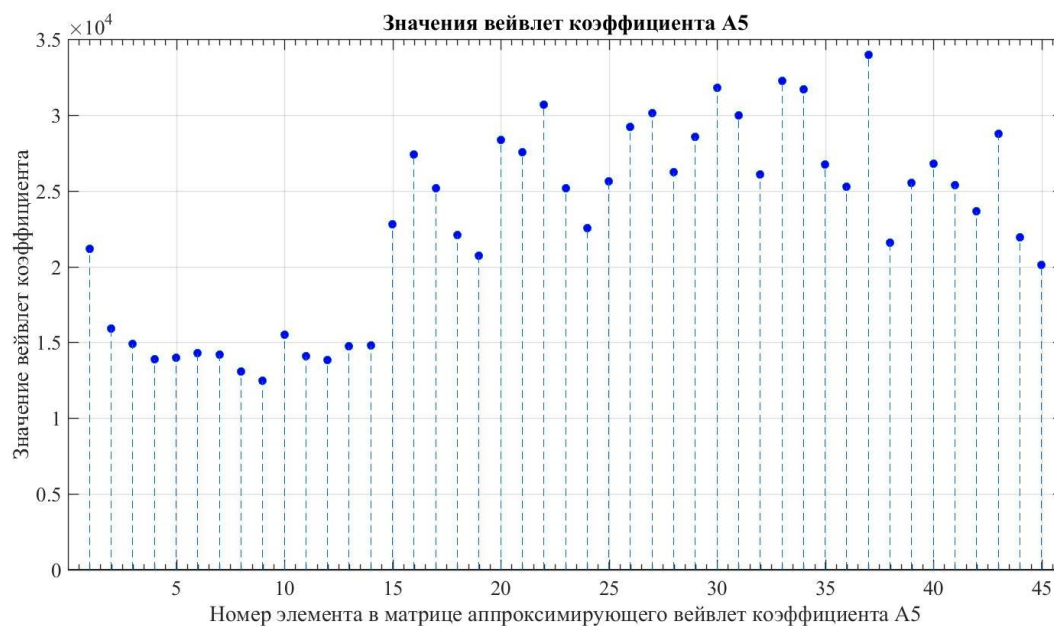


Рисунок 5. Значение аппроксимирующего вейвлет коэффициента 5 уровня разложения

Для выделения низкочастотной компоненты при восстановлении необходимо будет обнулить все вейвлет коэффициенты, кроме A5 (рис. 6).

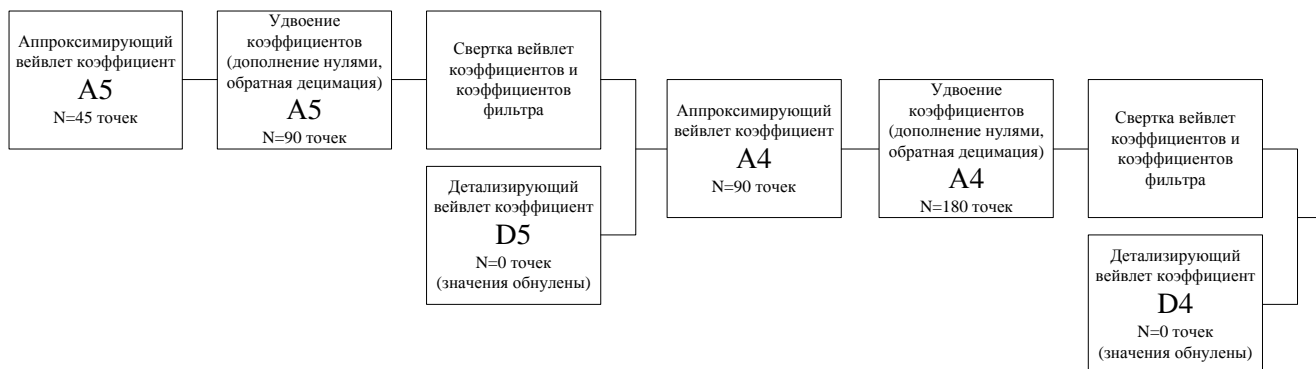


Рисунок 6. Фрагмент схемы восстановления

В результате такой операции получаем суточный график мощности изолированной системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии, восстановленный по одиночной ветви вейвлет коэффициентов пятого уровня разложения (рис. 7). Восстановленный график имеет период усреднения 32 минуты и состоит из 45 ступеней. Следует отметить, что подобная «ступенчатая» форма восстановленного графика характерна только при использовании в качестве базисной функции вейвлета Хаара. При выборе другой вейвлет функции график будет иметь более гладкий вид.

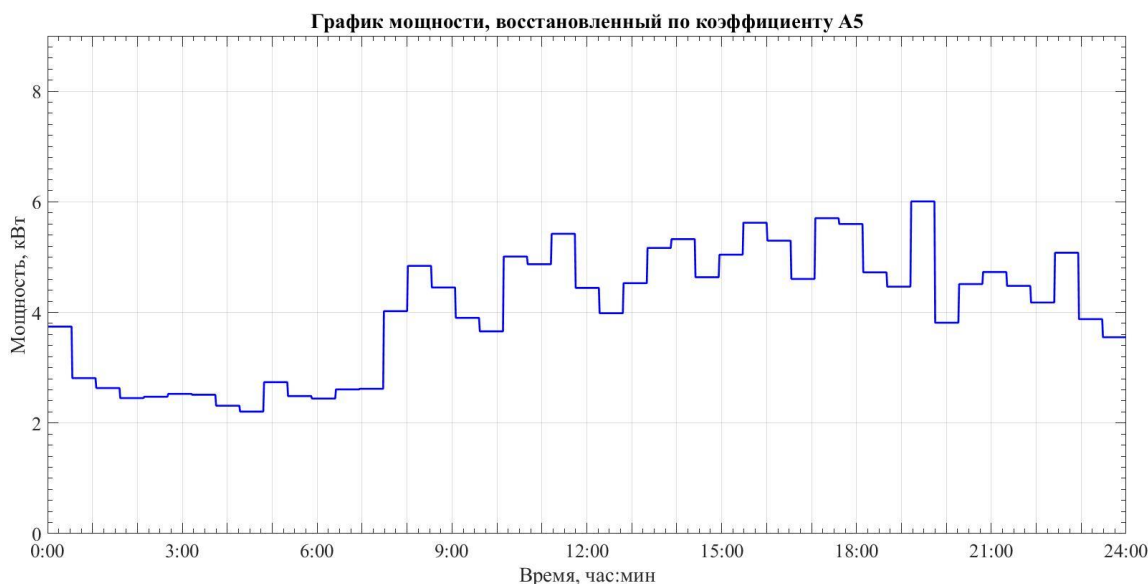


Рисунок 7. График мощности, восстановленный по коэффициенту A5

Вейвлет преобразование, как и преобразование Фурье подчиняется теореме Парсеваля, устанавливающей равенство между энергией сигнала и энергией спектра. Так, для исследуемого суточного графика электрических нагрузок (рис. 4) на интервале времени от t_1 (0:00) до t_2 (23:59) энергия исходного сигнала мощности равна энергии сигнала после вейвлет преобразования:

$$\int_{t_1}^{t_2} |p(t)|^2 dt = \int_{t_1}^{t_2} |F\{p(t)\}|^2 d\omega, \quad (7)$$

Поскольку, в настоящей работе, для выделения трендовой составляющей, обнулены все вейвлет коэффициенты кроме A5 и восстановление сигнала мощности осуществляется по одиночной ветви, то график (рис. 7) будет содержать в себе существенную долю, но не полную энергию сигнала. Полная энергия сигнала будет получена при суммировании трендовой (низкочастотной) составляющей и высокочастотной компонентой.

Чтобы сохранить информацию о высокочастотной компоненте не достаточно ограничиться детализирующим вейвлет коэффициентом D5, поскольку проведя процедуру восстановления по аналогии с аппроксимирующим коэффициентом (рис. 6) будет получен график с аналогичным усреднением по времени – 32 минуты. Настоящая работа предполагает учет высокочастотной компоненты для выбора параметров суперконденсатора, как элемента гибридного накопителя

электроэнергии. На основании вышеизложенного, для сохранения информации о высокочастотных флуктуациях мощности эффективнее будет использовать детализирующий вейвлет коэффициент первого уровня разложения D1 (рис. 8). Как следует из алгоритма вейвлет разложения (рис. 3) вейвлет коэффициент D1 состоит из 720 элементов.

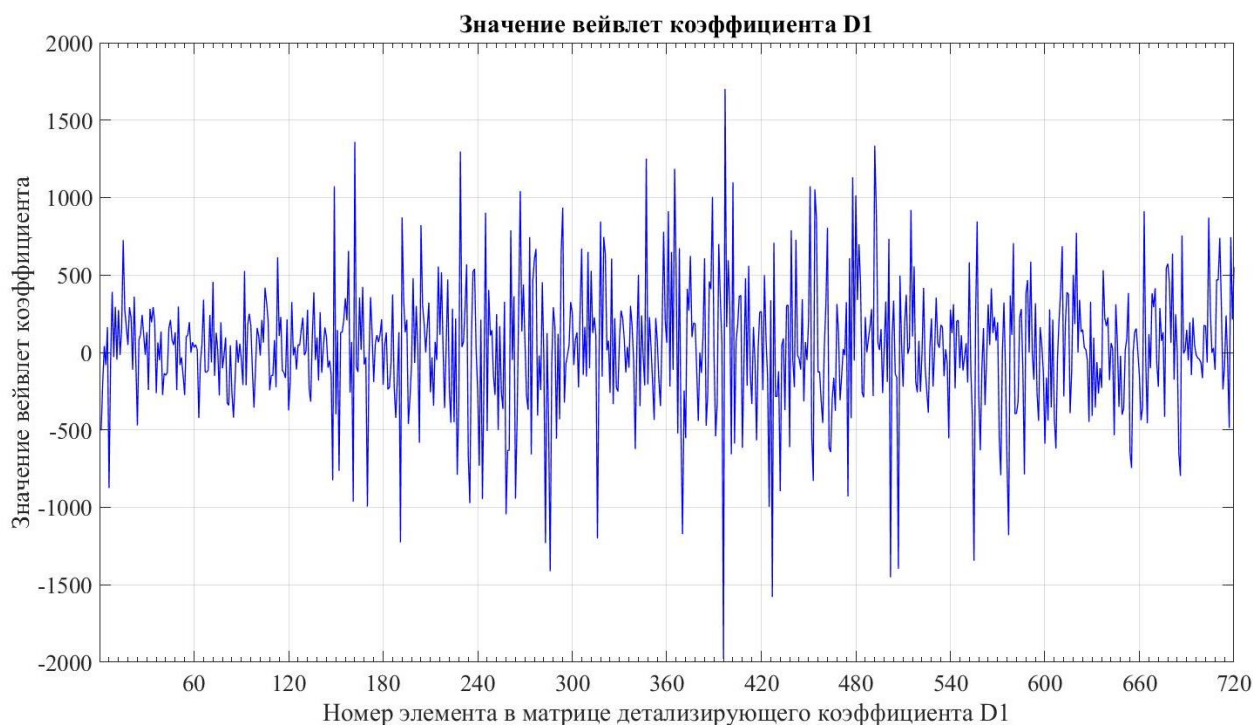


Рисунок 8. Значение вейвлет коэффициента D1

Восстановление графика мощности по одиночной ветви вейвлет коэффициентов D1 позволяет перейти к реальному масштабу времени и мощности. При этом усреднение флуктуационных колебаний мощности осуществляется с интервалом 2 минуты. Полученная зависимость флуктуационных (высокочастотных) колебаний мощности соответствует графику мощности, полученному для ультра-конденсатора.

Определяя энергию сигнала мощности до преобразования и энергию низкочастотной (рис. 7) и высокочастотной компоненты (рис. 8) по формуле (7) определяем что энергия восстановленного сигнала после обратного вейвлет преобразования составляет по A5 – 70,67%, по D1 – 28,24%, что в сумме дает 98,91%, т.е. погрешность составила примерно 1%. Следует также ввести понятие среднеквадратического отклонения значений восстановленного сигнала \hat{p} от исходного p :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (p_k - \hat{p}_k)^2}{\sum_{k=1}^n p_k^2}} \quad (8)$$

Расчетное среднеквадратическое отклонение в представленном численном эксперименте составило 0,16 Вт, что соответствует статистической погрешности.

В настоящее время наиболее распространенным способом организации децентрализованных систем электроснабжения является использование дизельных электростанций, наиболее ярким примером в этом отношении является Республика Саха – Якутия, где «2,2 млн. км² территории с населением 150 тыс. человек обеспечиваются электроэнергией и теплом от 129 дизельных электростанций» [Лукутин и др. 2008. С. 125]. Полностью отказаться от использования дизельных электростанций не нарушая при этом условия надежности электроснабжения удаленных территорий, невозможно. Поэтому для повышения технико-экономических и экологических характеристик децентрализованных систем электроснабжения следует применять комбинированные энергоустановки, например ветродизельные. При этом возникает научно-практическая задача по

оптимизации режима работы ветрогенератора и дизельной электростанции. Применение математического аппарата вейвлет анализа для разложения суточного графика нагрузок позволяет разделить условно постоянную составляющую графика и высокочастотную (переменную) составляющую, характеризующую включение и отключение отдельных электроприемников в короткие промежутки времени. Настройка комбинированной энергоустановки на режим работы, являющийся оптимальным для данного агрегата (ветрогенератор, дизельная электростанция, накопитель) позволит сократить до 15% расход моторного топлива, а как следствие выбросы CO₂ в атмосферу.

ВЫВОДЫ

Для комплексной оценки эффективности внедрения возобновляемых источников электроэнергии в системы электроснабжения изолированных территорий, предлагается комплексный учет экологических и технических факторов. Ключевыми определяющими факторами с точки зрения сохранности окружающей среды необходимо признать эмиссию жизненного цикла ВИЭ. К данному вопросу следует отнести расчет углеродного следа при производстве, функционировании и утилизации отработанных элементов ВИЭ (в частности, солнечных панелей и лопастей ветрогенераторов). Для оценки технической целесообразности применения ВИЭ следует учитывать режимы работы как отдельных систем ВИЭ, так и комбинированных элементов. Для расчета показателей качества электроэнергии и оптимального выбора накопителей (суперконденсаторов и аккумуляторных батарей) в настоящей работе предложено применять методы дискретного вейвлет преобразования. На основе дискретного вейвлет разложения с помощью вейвлета Хаара были выявлены трендовая составляющая графика электрических нагрузок (для выбора аккумулятора) и высокочастотная флуктуационная составляющая для расчета и выбора суперконденсатора. Немаловажную роль в решении о внедрении ВИЭ играет еще социальная роль. В России по прежнему сохраняется достаточно большое количество малых населенных пунктов, относящихся к системе децентрализованного электроснабжения, для которых ВИЭ является наряду с дизель-генераторными электростанциями, единственным источником электрической энергии. Учет предложенных в работе факторов с помощью моделей вейвлет анализа позволит решить как экологические вопросы рассматриваемых районов, так и задачи надежного и качественного электроснабжения населения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20052, <https://rscf.ru/project/22-29-20052/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алехина Е.В. 2013. Основные аспекты ветроэнергетики // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12. Ч. 2. С. 8–12 [Alekhina E.V. 2013. Osnovnye aspekty vetroenergetiki // Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki. Vyp. 12. Ch. 2. P. 8–12. (in Russian)]
- Безруких П.П. 2015. Эффективность возобновляемой энергетики. Мифы и факты // Вестник аграрной науки Дона. № 1 (29). С. 5–17. [Bezrukih P.P. 2015. Effektivnost' vozobnovlyaevoi energetiki. Mify i fakty // Vestnik agrarnoi nauki Dona. № 1 (29). P. 5–17. (in Russian)]
- Виноградов А.В., Сейфуллин А.Ю. 2020. Перспективные источники энергии для микросетей систем сельского электроснабжения // Агроинженерия. № 4 (98). С. 46–54. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-4-46-54. [Vinogradov A.V., Seifullin A.Yu. 2020. Perspektivnye istochniki energii dlya mikrosetei sistem sel'skogo elektrosnabzheniya // Agroiinzheneriya. № 4 (98). P. 46–54. DOI: 10.26897/2687-1149-2020-4-46-54. (in Russian)]
- Киушкина В.Р. 2019. Повышение энергетической безопасности децентрализованных зон электроснабжения регионов северных территорий и арктических зон (на примере Республики Саха (Якутия)). Дис. ... докт. техн. наук: 05.14.01. Красноярск. 400 с. [Kiushkina V.R. 2019. Povyshenie energeticheskoi bezopasnosti detsentralizovannykh zon elektrosnabzheniya regionov severnykh territorii i arkticheskikh zon (na primere Respubliki Sakha (Yakutiya)). Dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.14.01. Krasnoyarsk. 400 p. (in Russian)]
- Кропотов Ю.А., Проскуряков А.Ю., Белов А.А., Колпаков А.А. 2015. Алгоритмы системы автоматизированного мониторинга и управления экологической безопасностью промышленных производств // Системы управления, связи и

- безопасности. № 2. С. 184–197.[Kropotov Yu.A., Proskuryakov A.Yu., Belov A.A., Kolpakov A.A. 2015. Algoritmy sistemy avtomatizirovannogo monitoringa i upravleniya ekologicheskoi bezopasnost'yu promyshlennykh proizvodstv // Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti. № 2. P. 184–197. (in Russian)]
- Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. 2008. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография. – М.: Энергоатомиздат. 231 с.[Lukutin B.V., Surzhikova O.A., Shandarova E.B. 2008. Vozobnovlyаемaya energetika v detsentralizovannom elektrosnabzhenii: monografiya. – М.: Energoatomizdat. 231 p. (in Russian)]
- Павлов Д.В. 2018. Анализ эффективности утилизации устаревших ветрогенераторов // Перспективы науки. № 4 (103). С. 147–150.[Pavlov D.V. 2018. Analiz effektivnosti utilizatsii ustarevshikh vetrogeneratorov // Perspektivy nauki. № 4 (103). P. 147–150. (in Russian)]
- Рыженков М.А., Ермоленко Б.В., Ермоленко Г.В. 2011. Экологические аспекты ветроэнергетики // Теплоэнергетика. № 11. С. 72–78.[Ryzhenkov M.A., Ermolenko B.V., Ermolenko G.V. 2011. Ekologicheskie aspekty vetroenergetiki // Teploenergetika. № 11. P. 72–78. (in Russian)]
- Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Крюков Е.В. 2015. Сравнительная экологическая оценка установок нетрадиционной энергетике // Теплоэнергетика. № 8. С. 3–10. DOI: 10.1134/S004036361508007X [Sosnina E.N., Masleeva O.V., Kryukov E.V. 2015. Sravnitel'naya ekologicheskaya otsenka ustanovok netraditsionnoi energetiki // Teploenergetika. № 8. S. 3–10. DOI: 10.1134/S004036361508007X (in Russian)]
- Соснина Е.Н., Маслеева О.В., Пачурин Г.В., Крюков Е.В. 2013. Экологическая оценка процесса производства возобновляемых источников энергии // Современные проблемы науки и образования. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11590> (дата обращения: 26.10.2022 [Sosnina E.N., Masleeva O.V., Pachurin G.V., Kryukov E.V. 2013. Ekologicheskaya otsenka protsessa proizvodstva vozobnovlyaemykh istochnikov energii // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. № 6. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=11590> (data obrashcheniya: 26.10.2022 (in Russian)]
- Смоленцев, Н. К. 2014. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс. – 628 с. [Smolentsev, N. K. 2014. Osnovy teorii veivletov. Veivlety v MATLAB / N.K. Smolentsev. – М.: DMK Press. – 628 p. (in Russian)]
- Liu P, Meng F, Barlow CY. 2019. Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison // Journal of Cleaner Production DOI:doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.043.
- Sovacool B. K. 2021. Who are the victims of low-carbon transitions? Towards a political ecology of climate change mitigation // Energy Research & Social Science № 73. DOI:[10.1016/j.erss.2021.101916](https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.101916)

*Поступила в редакцию: 31.10.22
Переработанный вариант: 31.12.22*