



УДК 620.92

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЛИКА АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ГАРАНТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ПРЕИМУЩЕСТВЕННЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ВЕТРА*

С.Г. Игнатьев¹, С.В. Киселева²

¹ФГУП ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского
д. 1, ул. Жуковского, Жуковский, Московская обл., 140180, Россия
тел.: +7(495)556-34-31; e-mail: stacgg8@gmail.com

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет
д. 1, Ленинские горы, Москва, 119991, Россия
тел.: +7 (495) 939-42-57; e-mail: k_sophia_v@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.22-24.028-050

Заключение совета рецензентов: 07.08.18 Заключение совета экспертов: 14.08.18 Принято к публикации: 21.08.18

Задача оптимизации состава и мощности автономных ветродизельных установок для гарантированного энергообеспечения потребителей, несмотря на длительную историю исследований, многообразие подходов и методов, не потеряла своей актуальности. Для формирования облика автономной энергосистемы гарантированного электроснабжения с преимущественным использованием энергии ветра был проведен детальный анализ энергетических характеристик ветра на примере измерений скорости ветра на юге Европейской части России в течение 8 месяцев на разных высотах с дискретностью 10 минут. В результате была получена последовательность средних суточных скоростей ветра, а также последовательности, построенные путем произвольных вариаций распределения средних суточных скоростей ветра на этом интервале. Указанные последовательности были использованы для расчета балансов энергии в системах (ВЭУ + дизель-генератор + потребитель с постоянной и ограниченной суточной потребной энергией) и (ВЭУ + дизель-генератор + потребитель с ограничением потребления + накопитель энергии). В целях максимального использования энергии ветра предполагается, что ВЭУ интегрально за рассматриваемый период производит потребное количество энергии. Для обобщенного рассмотрения в работе введены относительные величины потребной энергии, произведенной ВЭУ и дизель-генератором энергии и емкости накопителя путем нормирования их на ометаемую площадь ветроколеса.

В работе показано влияние средней за определенный период скорости ветра на энергетические характеристики системы (ВЭУ + дизель-генератор + потребитель), а именно, найдена близкая к кубической зависимость произведенной за период энергии ВЭУ, использованной потребителем энергии ВЭУ, расхода и экономии топлива от указанной средней скорости. Было выявлено, что для этой же системы при ограниченной потребной энергии и большой средней скорости ветра за период (V_{cp}) ВЭУ с меньшим значением мощности генератора и меньшим радиусом ветроколеса использует энергию ветра более эффективно, чем ветроустановка с большей мощностью генератора и большим радиусом ветроколеса при меньшей средней скорости ветра. Для системы (ВЭУ + дизель-генератор + накопитель энергии + потребитель) с ростом средней скорости V_{cp} при заданном объеме потребной энергии, который в целом за период покрывается выработкой ВЭУ $Q_{\text{ген}} = \mathcal{E}_{\text{ТВЭУ}}$, максимальная размерная емкость накопителя уменьшается. С уменьшением объема накопителя энергии влияние случайного характера изменения скорости ветра $V_{\text{ср}}(i)$ снижается, и при некоторых значениях относительной емкости накопителя им можно пренебречь.

*Игнатьев С.Г., Киселева С.В. Формирование облика автономной энергосистемы гарантированного электроснабжения с преимущественным использованием энергии ветра // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2018;22-24:28-50.



Ключевые слова: автономная энергосистема; гарантированное энергоснабжение; ветроэнергетическая установка; накопитель энергии; дизель-генератор; энергетический баланс; последовательность средних суточных скоростей ветра; потребная суточная энергия.

SHAPING OF AN AUTONOMOUS POWER SYSTEM FOR GUARANTEED POWER SUPPLY WITH THE PREDOMINANCE WIND ENERGY

S.G. Ignatiev¹, S.V. Kiseleva²

¹The Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky (TsAGI)
1 Zhukovsky St., Zhukovsky, Moscow region, 140180, Russia
+7 (495) 556 34 31, e-mail: stacgg8@gmail.com

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography
1 Leninskie Gori, , Moscow, 119991, Russian
tel: +7 (495) 939 42 57, e-mail: k_sophia_v@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.22-24.028-050

Referred 7 August 2018 Received in revised form 14 August 2018 Accepted 21 August 2018

Optimization of the autonomous wind-diesel plants composition and of their power for guaranteed energy supply, despite the long history of research, the diversity of approaches and methods, is an urgent problem. In this paper, a detailed analysis of the wind energy characteristics is proposed to shape an autonomous power system for a guaranteed power supply with predominance wind energy. The analysis was carried out on the basis of wind speed measurements in the south of the European part of Russia during 8 months at different heights with a discreteness of 10 minutes. As a result, we have obtained a sequence of average daily wind speeds and the sequences constructed by arbitrary variations in the distribution of average daily wind speeds in this interval. These sequences have been used to calculate energy balances in systems (wind turbines + diesel generator + consumer with constant and limited daily energy demand) and (wind turbines + diesel generator + consumer with constant and limited daily energy demand + energy storage). In order to maximize the use of wind energy, the wind turbine integrally for the period in question is assumed to produce the required amount of energy. For the generality of consideration, we have introduced the relative values of the required energy, relative energy produced by the wind turbine and the diesel generator and relative storage capacity by normalizing them to the swept area of the wind wheel.

The paper shows the effect of the average wind speed over the period on the energy characteristics of the system (wind turbine + diesel generator + consumer). It was found that the wind turbine energy produced, wind turbine energy used by the consumer, fuel consumption, and fuel economy depend (close to cubic dependence) upon the specified average wind speed. It was found that, for the same system with a limited amount of required energy and high average wind speed over the period, the wind turbines with lower generator power and smaller wind wheel radius use wind energy more efficiently than the wind turbines with higher generator power and larger wind wheel radius at less average wind speed. For the system (wind turbine + diesel generator + energy storage + consumer) with increasing average speed for a given amount of energy required, which in general is covered by the energy production of wind turbines for the period, the maximum size capacity of the storage device decreases. With decreasing the energy storage capacity, the influence of the random nature of the change in wind speed decreases, and at some values of the relative capacity, it can be neglected.

Keywords: autonomous power system; guaranteed power supply; wind generator; energy storage; diesel generator; energy balance; sequence of average daily wind speeds; required daily energy.



Станислав Георгиевич
Игнатьев
Stanislav Ignatiev

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГУП «ЦАГИ имени профессора Н. Е. Жуковского».

Образование: Харьковский авиационный институт по специальности инженер-механик по самолетостроению (1963 г.).

Область научных интересов: аэродинамика дозвуковых летательных аппаратов, ветроэнергетика.

Публикации: более 40.

h-index 4 (по РИНЦ)

E-LibraryAuthorID: 611344

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Researcher at Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI).

Education: Kharkov Aviation Institute with a degree in Mechanical Engineering in Aircraft, 1963.

Research interests: aerodynamics of subsonic aircraft; wind energy.

Publications: more than 40.



Софья
Валентиновна
Киселева
Sofia Kiseleva

Сведения об авторе: канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории возобновляемых источников энергии географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Образование: физический факультет МГУ (1987 г.).

Область научных интересов: возобновляемые источники энергии; оценка ресурсов ВИЭ; лабораторное моделирование динамических процессов в океане.

Публикации: более 100, в том числе патенты на изобретения.

h-index 12 (по РИНЦ); Research ID E-3324-2014
ORCID 0000-0001-5836-8615

Information about the author: Ph.D. in Physics and Mathematics, Senior Researcher at the Renewable Energy Sources Laboratory, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography.

Education: Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, 1987.

Research interests: renewable energy sources; resource evaluation; ecology-geographical aspects of renewable energy; laboratory modeling of ocean and atmosphere's dynamical process.

Publications: more than 100, including patents. Scopus Author ID 57201352245

1. Введение

Ветродизельные системы получили достаточно широкое распространение в нише энергопитания автономных потребителей различной мощности, однако без накопителя энергии доля замещаемого дизельного топлива составляет около 10 ÷ 15 % [1]. Кроме того, при резких изменениях скорости ветра работа дизель-генераторной установки большой мощности не обеспечивается на номинальной мощности, что негативно сказывается на расходе топлива и ресурсе двигателя. В связи с этим встает задача проектирования ветродизельных установок автономного энергоснабжения, в состав которых могут входить гибридные накопители – не только аккумуляторные батареи (АКБ) для долгосрочного накопления энергии, но и иные накопительные устройства, способные «подхватывать» нагрузку в моменты резкого изменения скорости ветра или скачков мощности нагрузки.

Исследования в области оптимизации состава автономных систем с использованием энергии ветра ведутся уже в течение достаточно длительного времени [2, 3]. Подробный анализ современных подходов и методов оптимизации гибридных энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) проведен, в частности, в [4, 5] и других работах. Отмечается, что сложность оптимизации таких систем связана с неопределенностью и высокой динамичностью источников, особенно ветра и солнца. Рассмотрены различные методы и подходы к оптимизации, в том числе:

- подходы на основе методов машинного обучения и искусственного интеллекта (artificial intelligence approach) для моделирования случайным образом приходящих ресурсов солнечной и ветровой энергии, графиков нагрузки потребителя [6–8];
- мультикритериальная оптимизация, целью которой является поиск оптимального по Парето решения (вектора решения) [9];
- итерационные методы оптимизации состава гибридных установок. При этом в качестве критерия оптимизации принимаются: вероятность потери энергоснабжения (Loss of Power Supply Probability –

LPSP); степень покрытия нагрузки; чистая текущая стоимость (Net Present Value – NPV); нормированная стоимость энергии (LCOE) и др. Оптимизируемыми параметрами обычно являются суммарная номинальная мощность генерирующих систем (фотоэлектрической и/или ветровой энергетической установки (ВЭУ), емкость батареи аккумуляторов и мощность дизель-генераторов [10, 11];

- аналитический метод, в рамках которого проводится математическое или численное моделирование работы отдельных компонентов автономной энергетической системы, производительность которой может быть оценена для набора допустимых системных конфигураций и конкретных параметров входящих в нее компонентов, например, для набора мощностей ветровых и солнечных установок, емкостей аккумуляторов, потребляемой мощности и т.д. Оптимальная структура интегрированной энергетической системы определяется путем сравнения одного или нескольких показателей эффективности. [12]. Как правило, в рамках этого подхода используются балансовые модели [13];

- вероятностный подход к определению состава и мощности компонентов гибридных энергетических систем на ВИЭ также позволяет учитывать влияние неопределенности прихода солнечной энергии и скорости ветра на результаты оптимизации. В этом случае предусмотрена разработка моделей поступления в систему ресурсов ВИЭ (солнечной и/или ветровой энергии) и потребления энергии (нагрузки потребителя). На основе этих моделей оцениваются риски снижения доли покрытия нагрузки ниже допустимых [14]. Однако этот метод оптимизации не может характеризовать динамические изменения производительности гибридной системы.

На основе перечисленных подходов был разработан широкий ряд программных средств (ПО) для оптимизации гибридных систем с той или иной степенью детализации неопределенных параметров задачи [15, 16]. В большинстве случаев критериями оптимизации в них являются чистая текущая стоимость энергии и производительность. Одним из наиболее популярных ПО для оптимизации электро-энергетических гибридных систем на основе ВИЭ



является Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources (HOMER) [17], а также HYBRID2 [18]. Последнее позиционируется как симуляционное ПО с очень высокой точностью, так как оно позволяет работать с детализированными режимами прихода ресурсов (солнечной и ветровой энергии) – от 10 минут до 1 часа. Целый ряд других компьютерных программ также применяется для проектирования и оптимизации гибридных систем. Однако, несмотря на многообразие программных продуктов, анализирующих режимы работы энергетического оборудования в составе гибридных автономных систем на ВИЭ, разрабатываются они непосредственно в лабораториях университетов или предприятий, исследующих перспективы и технические проблемы работы микросетей и, как правило, в свободном доступе не предоставляются. Это определяет большое количество работ, посвященных разработкам своих, часто узкоспециализированных, программных продуктов.

Одним из ключевых факторов при оптимизации гибридных автономных энергетических систем, использующих ветровую и солнечную энергию, является адекватное представление динамики падающей солнечной радиации и скорости ветра. В большинстве случаев это делается следующим образом. На основе многолетних измерений скорости ветра (метеорологических наблюдений, данных реанализа или ветромониторинга) проводится расчет параметров функции Вейбулла, которая широко применяется для характеристики распределения повторяемости скорости ветра в расчетах производительности ВЭУ и, следовательно,

оценки емкости АКБ и других параметров гибридной системы [19, 20]. В ряде исследований, посвященных оптимизации автономных ветроэнергетических систем с аккумулярованием энергии, предпринимается моделирование распределения скорости ветра на часовых и более коротких интервалах, в том числе, с помощью спектрального распределения горизонтальной составляющей скорости ветра Ванд-дер-Ховена.

Однако, как было показано ранее в [21], функция Вейбулла далеко не однозначна в описании характеристик ветрового режима и может приводить к ошибочным результатам при оценке мощности ветрового потока и производительности ВЭУ. Кроме того, для оптимизации состава гибридных установок часто используются результаты мониторинга скорости ветра (часто – годового) на площадке предполагаемого строительства автономной энергогенерирующей системы [22]. Но для скорости ветра годичный период не является представительным периодом для надежной оптимизации состава гибридной автономной установки с использованием энергии ветра. В связи с этим в настоящей работе с новых оригинальных позиций проведен детальный анализ особенностей скорости ветра, который может обеспечить более универсальный обобщенный подход к оптимизации в части оценки производительности ветровой установки и требуемой емкости накопителя. Цель исследования – определить энергетические характеристики элементов системы гарантированного энергообеспечения с преимущественным использованием энергии ветра.

Список обозначений	
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
ρ	Плотность
$\xi(V), \eta(V)$	Коэффициенты эффективности ВЭУ в зависимости от скорости ветра
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
D	Диаметр, м
p	Функция плотности вероятности
q	Энергия, кВт·ч /сутки
N_c	Количество суток
S	Площадь, м ²
T, t	Время, с
V_∞	Скорость ветра, м/с
W	Мощность, Вт
<i>Индексы нижние</i>	
i	Номер суток
max	Максимальное значение
min	Минимальное значение
ср	Среднее значение
потр	Потребная
<i>Буквы русского алфавита</i>	
Э	Энергия
<i>Аббревиатуры</i>	
АКБ	Аккумуляторная батарея
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ВК	Ветроколесо
ВЭГ	Ветровой электрогенератор
ВЭУ	Ветроэнергетическая установка

ДГУ	Дизель-генераторная установка
КИУМ	Коэффициент использования установленной мощности
СК	Суперконденсатор

2. Теоретический анализ

Решение задачи формирования облика автономной энергосистемы гарантированного электроснабжения с преимущественным использованием энергии ветра требует более детального, чем обычно, представления об энергетических характеристиках ветра.

Традиционно [23, 24] ветроэнергетический потенциал местности характеризуется мощностью воздушной струи с единичной площадью поперечного сечения и определяется интегралом:

$$W_{уд} = \rho \int_0^{V_{max}} V_{\infty}^3 p_{\Gamma}(V) dV,$$

где ρ – плотность воздуха; $p_{\Gamma}(V_{\infty})$ – функция плотности вероятности генеральной совокупности случайной величины «скорость ветра V_{∞} », которая определяется при измерениях скорости ветра на метеостанциях в течение 30 ÷ 35 лет. На более короткой статистике функция $p(V_{\infty})$ случайным образом отклоняется от функции $p_{\Gamma}(V_{\infty})$. Величина $W_{уд}$ характеризует среднее многолетнее значение мощности воздушной струи и не отражает её изменение по времени.

В природе на циклических промежутках времени с повторяющимися условиями скорость ветра является случайной функцией времени $V_{\infty}(t)$. В монографии [21] доказано, что каждую реализацию случайной функции на произвольном отрезке времени T можно характеризовать дополнительной функцией $p_T^*(V_{\infty})$. Эта функция обладает такими же свойствами, что и функция плотности вероятности случайной величины, поэтому она тоже названа функцией плотности вероятности, но рассматривается как характеристика состоявшейся реализации функции $V_{\infty}(t)$. Через функцию $p^*(V_{\infty})$ для отрезка времени $T = t_N - t_0$ определяются энергетические характеристики ветра. При этом доказаны равенства:

– для средней скорости

$$V_{cp} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_N} V_{\infty}(t) dt = \int_{V_0}^{V_N} V_{\infty} p_T^*(V_{\infty}) dV_{\infty}; \quad (1)$$

– для средней мощности

$$W_{cp} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_N} W(V_{\infty}(t)) dt = \int_{V_0}^{V_N} W(V_{\infty}) p_T^*(V_{\infty}) dV_{\infty}; \quad (2)$$

– для энергии

$$\bar{\Theta}_T = \int_0^T W(V_{\infty}(t)) dt = T \int_{V_{min}}^{V_{max}} W(V_{\infty}) p_T^*(V_{\infty}) dV_{\infty}. \quad (3)$$

В этих формулах $W(V_{\infty}(t))$ – мощность, причем это может быть как мощность воздушной струи, так и мощность ВЭУ.

Для исследования воспользуемся результатами измерений скорости ветра на юге Европейской части России в течение 8 месяцев на разных высотах. Результаты измерений были представлены в виде средних значений скорости ветра на интервале времени Δt 10 мин. По этим значениям рассчитаны среднесуточные значения скорости ветра $V_{сут}(i)$, по которым определялись искомые энергетические характеристики как в течение суток, так и в течение $1 \leq i \leq N_c = 248$ суток.

В механике и физике словом потенциал обычно обозначают не мощность, а энергию. Определим ветроэнергетический потенциал местности на отрезке времени T как энергию воздушной струи с единичной площадью поперечного сечения. При заданном изменении скорости ветра по времени $V_{\infty}(t)$, в соответствии с формулой (3), выразим ветроэнергетический потенциал как интеграл по времени от изменения мощности воздушной струи с единичной площадью поперечного сечения:

$$\bar{\Theta}_{T_{возд}} = \frac{\rho}{2} \int_0^T V_{\infty}^3 dt.$$

При использовании среднесуточной скорости $V_{сут}(i)$ будем вычислять этот интеграл по правилу прямоугольников, положив $\Delta t = 24$ ч. Тогда $T = N_c \Delta t$ [час] и

$$\bar{\Theta}_{T_{возд}} = \frac{1}{2000} \sum_{i=1}^{N_c} \rho V_{сут}^3 \Delta t \text{ [кВт} \cdot \text{ч]}.$$



При изменении скорости ветра V_∞ мощность ветроустановки определяется её характеристикой $W_{ВЭУ}(V_\infty)$. На рис. 1 показана типичная для ВЭУ с диаметром ветроколеса $D_{БК}$ характеристика $W(V_\infty)$. Участок с постоянным значением функции $W(V_\infty)$

определяет значение мощности установленного генератора W_G . Здесь же показана кривая изменения мощности воздушной струи с площадью поперечного сечения $S_{БК} = \pi D_{БК}^2 / 4$ и функция $C_p(V_\infty) = W_{ВЭУ} / W_{возд.} = \xi(V_\infty)\eta(V_\infty)$.

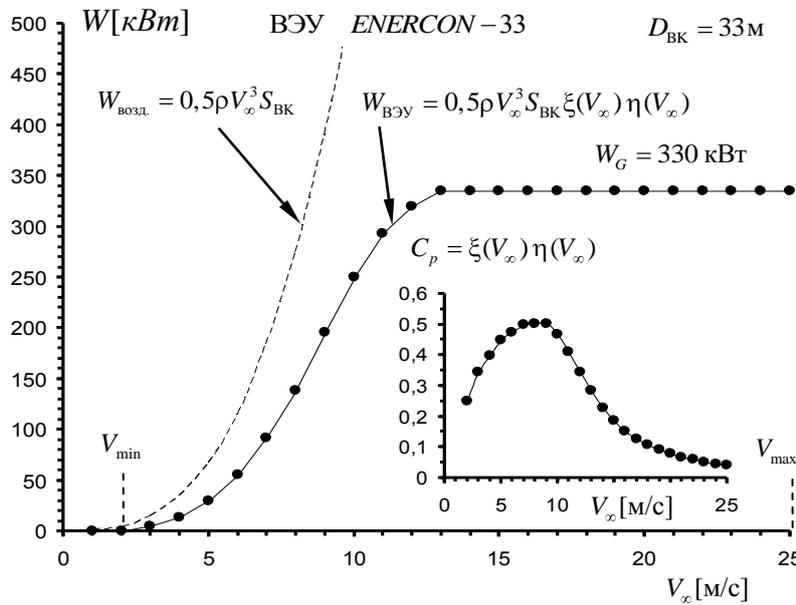


Рис. 1 – Типовая мощностная характеристика ВЭУ
Fig. 1 – Typical power characteristics of wind turbines

Будем использовать характеристики $W(V_\infty)$ и $C_p(V_\infty)$, заменив скорость ветра V_∞ на среднесуточную скорость $V_{сут}(i)$.

Знание характеристики $C_p(V_{сут})$ позволяет определить производимую ВЭУ энергию на единицу площади $S_{БК}$ при изменении скорости ветра по времени $V_{сут}(i)$ следующим образом.

По скорости $V_{сут}(i)$ суточные значения мощности воздушной струи с единичной площадью поперечного сечения определяются с помощью формулы:

$$W_{возд} = 0,5\rho V_{сут}^3 [\text{Вт}/\text{м}^2].$$

Суточное значение мощности ВЭУ на единицу площади $S_{БК}$ определится с помощью функции $C_p(V_{сут})$:

$$W_{ВЭУ} = 0,5\rho V_{сут}^3 * C_p(V_{сут})[\text{Вт}/\text{м}^2].$$

Суточное значение энергии воздушной струи и энергии ВЭУ на единицу площади $S_{БК}$ находится как произведение мощности на время:

$$\bar{q}_{возд} = \frac{\Delta t}{2000} \rho V_{сут}^3 [\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2],$$

$$\bar{q}_{ВЭУ} = \frac{\Delta t}{2000} \rho V_{сут}^3 * C_p(V_{сут})[\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2].$$

С помощью этих формул ветроэнергетический потенциал и вырабатываемая ВЭУ энергия за число суток $N_c = 248$ вычисляется по следующим формулам:

$$\bar{\mathcal{E}}_{T\text{возд}} = \sum_{i=1}^{N_c} \bar{q}_{возд}(i) [\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2],$$

$$\bar{\mathcal{E}}_{T\text{ВЭУ}} = \sum_{i=1}^{N_c} \bar{q}_{ВЭУ}(i) [\text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2].$$

На верхней диаграмме рис. 2 показано изменение скорости $V_{сут}(i)$ в течение $N_c = 62$ суток и график функции $C_p(V_{сут})$. Пунктирная линия на диаграмме $V_\infty(i)$ соответствует значению скорости ветра, когда $C_p(V_{сут}) = C_{p\text{max}}$. На графике видно, что ВЭУ с принятой характеристикой $C_p(V_{сут})$ в течение двух месяцев не часто работает в точке максимальной эффективности.

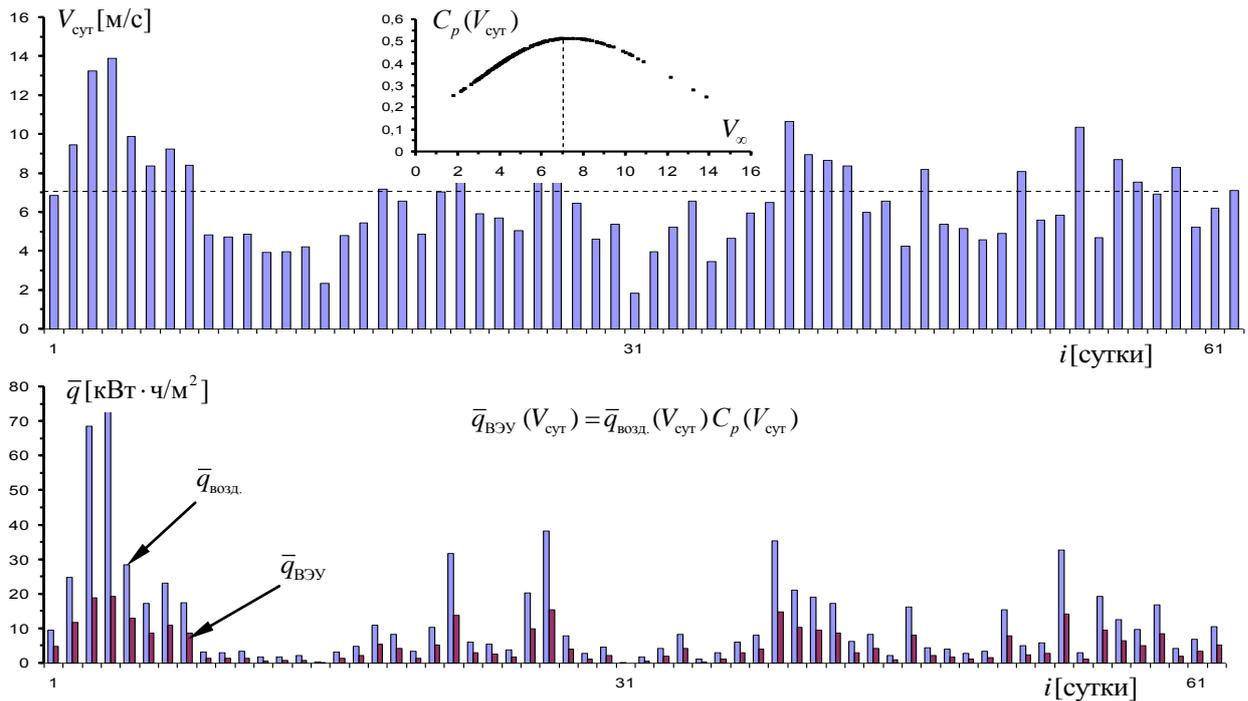


Рис. 2 – Средняя суточная скорость ветра и энергия воздушной струи
 Fig. 2 – Average daily wind speed and energy of the air jet

На нижней диаграмме рис. 2 показано сравнение суточной энергии воздушной струи и энергии ВЭУ. На графике видно, что ВЭУ с рассматриваемой характеристикой $C_p(V_{сут})$ далеко не полностью использует энергию ветра. Расчет величин $\bar{E}_{T\text{возд}}$ и $\bar{E}_{T\text{ВЭУ}}$ на отрезке времени с числом суток $N_c = 62$ показал, что ветроустановка превращает в полезную энергию только 43 % энергии воздушной струи.

Представим теперь, что задано суточное потребление энергии $q_{\text{потр}}$ [кВт·ч/сутки].

В процессе исследования примем, что в течение $N_c = 248$ суток потребная энергия имеет постоянное значение $q_{\text{потр}}(i) = \text{const}$.

Через величину $q_{\text{потр}}$ определяется потребное количество энергии на отрезке времени с числом суток N_c :

$$Q_{T\text{потр}} = q_{\text{потр}} N_c \text{ [кВт}\cdot\text{ч]}.$$

Ветроустановка с площадью $S_{\text{БК}}$ при известном значении $\bar{E}_{T\text{ВЭУ}}$ за число суток N_c выработает количество энергии

$$E_{T\text{ВЭУ}} = S_{\text{БК}} \bar{E}_{T\text{ВЭУ}} \text{ [кВт}\cdot\text{ч]}.$$

Для максимального использования энергии ветра необходимо, чтобы автономная ветроустановка за число суток N_c произвела потребное количество энергии, то есть $E_{T\text{ВЭУ}} = Q_{T\text{потр}}$, тогда

$$q_{\text{потр}} N_c = S_{\text{БК}} \bar{E}_{T\text{ВЭУ}}.$$

Отсюда

$$\frac{q_{\text{потр}}}{S_{\text{БК}}} = \frac{\bar{E}_{T\text{ВЭУ}}}{N_c}.$$

Обозначим: $\bar{q}_{\text{потр}} = q_{\text{потр}} / S_{\text{БК}}$ [кВт·ч/м²] – относительное значение суточной потребной энергии; $\bar{q}_{\text{срВЭУ}} = \bar{E}_{T\text{ВЭУ}} / N_c$ [кВт·ч/м²] – относительное среднесуточное значение энергии ВЭУ.

В этом случае из условия $E_{T\text{ВЭУ}} = Q_{T\text{потр}}$ следует равенство относительных значений суточной энергии $\bar{q}_{\text{потр}} = \bar{q}_{\text{срВЭУ}}$.

Вместе с этим заданное количество потребной энергии $Q_{T\text{потр}} = E_{T\text{ВЭУ}}$ позволяет определить искомую характерную площадь $S_{\text{БК}}$ ветроустановки и, соответственно, диаметр ветроколеса:

$$S_{\text{БК}} = Q_{T\text{потр}} / \bar{E}_{T\text{ВЭУ}}, \quad D_{\text{БК}} = 2\sqrt{S_{\text{БК}} / \pi}.$$

Использование относительной величины $\bar{q}_{\text{потр}}$, которая характеризует количество потребной энергии в сутки на единицу ометаемой ветроколесом площади, целесообразно по следующей причине. В общем случае необходимо исследовать энергетику рассматриваемой системы при различных значениях количества потребной энергии $Q_{\text{потр}}$ на характерных отрезках времени (например, в течение года). В связи с этим величина $Q_{\text{потр}}$ является одним из параметров, влияние которого на характеристики системы необходимо исследовать. Однако указанный вы-

ше способ определения площади $S_{\text{БК}}$ приводит к тому, что, если потребное суточное количество энергии $q_{\text{потр}}$ [кВт·ч/сутки] отнести к площади $S_{\text{БК}}$, относительная величина суточной потребной энергии

$$\bar{q}_{\text{потр}} = q_{\text{потр}} / S_{\text{БК}} [\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2]$$

не зависит от объёма $Q_{\text{потр}}$. Это иллюстрируется табл. 1 и 2 на примере местностей с различными значениями средней скорости $V_{\text{ср}}$ и $\bar{\mathcal{E}}_{\text{ТВЭУ}}$ за время $N_c = 248$ суток.

Таблица 1

Энергетические характеристики автономной ВЭУ при различных средних за период скоростях ветра

Table 1

Energy characteristics of an autonomous wind turbine at various average wind speeds for the period

$V_{\text{ср}} = 6,5 \text{ м/с}, \bar{\mathcal{E}}_{\text{ТВЭУ}} = 1228,025 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2, N_c = 248 \text{ суток}$					
Через потребную энергию			Через энергию ВЭУ		
$q_{\text{потр}}$ [кВт·ч / сутки]	$Q_{\text{потр}} = q_{\text{потр}} N_c$ [кВт·ч]	$S_{\text{БК}} = Q_{\text{потр}} / \bar{\mathcal{E}}_{\text{ТВЭУ}}$ [м ²]	$\bar{q}_{\text{потр}} = q_{\text{потр}} / S_{\text{БК}}$ [кВт·ч / м ²]	$\mathcal{E}_{\text{ТВЭУ}} = \bar{\mathcal{E}}_{\text{ТВЭУ}} S_{\text{БК}}$ [кВт·ч]	$\bar{q}_{\text{срВЭУ}} = \bar{\mathcal{E}}_{\text{ТВЭУ}} / N_c$ [кВт·ч / сутки]
15	3 720	3,03	4,952	3 720	4,952
50	12 400	10,1	4,952	12 400	4,952
100	24 800	20,2	4,952	24 800	4,952
$V_{\text{ср}} = 5,4 \text{ м/с}, \bar{\mathcal{E}}_{\text{ТВЭУ}} = 771,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2, N_c = 248 \text{ суток}$					
15	3 720	4,82	3,11	3720	3,11
50	12 400	16,07	3,11	12 400	3,11
100	24 800	32,15	3,11	24 800	3,11

Вследствие этого, не теряя общности по объёму потребной энергии, энергетический баланс между элементами энергосистемы гарантированного электроснабжения с преимущественным использованием энергии ветра можно исследовать путем сравнения суточной относительной энергии ВЭУ $\bar{q}_{\text{ВЭУ}}(i)$ и постоянным значением суточной относительной потребной энергии $\bar{q}_{\text{потр}} = \bar{q}_{\text{срВЭУ}}$.

Из правого столбца таблиц 1 через $\bar{\mathcal{E}}_{\text{ТВЭУ}}$ можно определить искомое значение $\bar{q}_{\text{потр}} = \bar{q}_{\text{срВЭУ}}$, которое зависит только от распределения средней скорости ветра $V_{\text{ср}}$ по времени.

Отметим, что использование условия $\mathcal{E}_{\text{ТВЭУ}} = Q_{\text{потр}}$ для определения размера ветроколеса ВЭУ при её характеристике $C_p(V_x)$ обеспечивает баланс значений необходимой и располагаемой энергий на рассматриваемом большом отрезке времени (например, в течение года). При этом на практике суточная и месячная производительности такой ВЭУ являются случайными величинами, и баланс необходимой и располагаемой энергии на коротких промежутках времени не выполняется.

Получающийся дисбаланс при автономном использовании изолированной ВЭУ можно устранить за счёт создания системы энергоснабжения, которая включает в себя дополнительные источники энергии, например, дизель-генератор или накопитель электроэнергии.

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Анализ работы ВЭУ с дизель-генератором

Создание устойчиво работающих ветроэлектростанций переменного тока, в которых наряду с ВЭУ работает дизель-генератор, потребовало серьезных исследований работы энергосистемы с двумя источниками тока. Обычно такие системы имеют мощность $W_p = 20 \div 100 \text{ кВт}$. При этом значения расчетной мощности W_p генераторов ВЭУ и дизель-генератора чаще всего принимаются одинаковыми. Будем исходить из того, что все технические проблемы совместной работы двух источников переменного тока, в том числе и согласование мгновенных значений потребной и располагаемых мощностей, решены.

При анализе совместной работы ВЭУ и дизель-генератора обычно предполагают три режима работы, которые характеризуются различными значениями скорости ветра относительно значений расчетной для ВЭУ скорости ветра V_p и скоростью ветра V_{min} , при которой ВЭУ начинает работать, в частности, $V_p = 13$ м/с, а $V_{min} = 2$ м/с (см. рис. 1).

Рассматриваются следующие режимы:

1. При скорости $V_{\infty} \geq V_p$ нагрузка обеспечивается только ВЭУ.
2. При скорости $V_{\infty} < V_{min}$ нагрузка обеспечивается только дизель-генератором.
3. При скорости $V_{min} < V_{\infty} < V_p$ нагрузка обеспечивается совместной работой обоих источников электроэнергии.

Поставим дополнительно естественное для автономной ВЭУ условие, что ежесуточное потребление электроэнергии ограничено $\bar{q}_{потр}$.

Рассмотрим влияние средней на отрезке времени $N_c = 248$ суток скорости ветра V_{cp} на энергетические характеристики системы ВЭУ + дизель-генератор.

Анализ среднесуточных скоростей ветра на разных высотах показал, что с изменением высоты изменяется и среднее значение скорости ветра, а характер изменения суточных значений скорости ветра в течение $N_c = 248$ суток остается практически неизменным. Значения среднесуточной скорости ветра оказываются почти пропорциональными значению средней для рассматриваемого отрезка времени скорости V_{cp} . Характер изменения среднесуточной скорости ветра в течение этого времени при $V_{cp} = 6,49$ м/с показан на рис. 3.

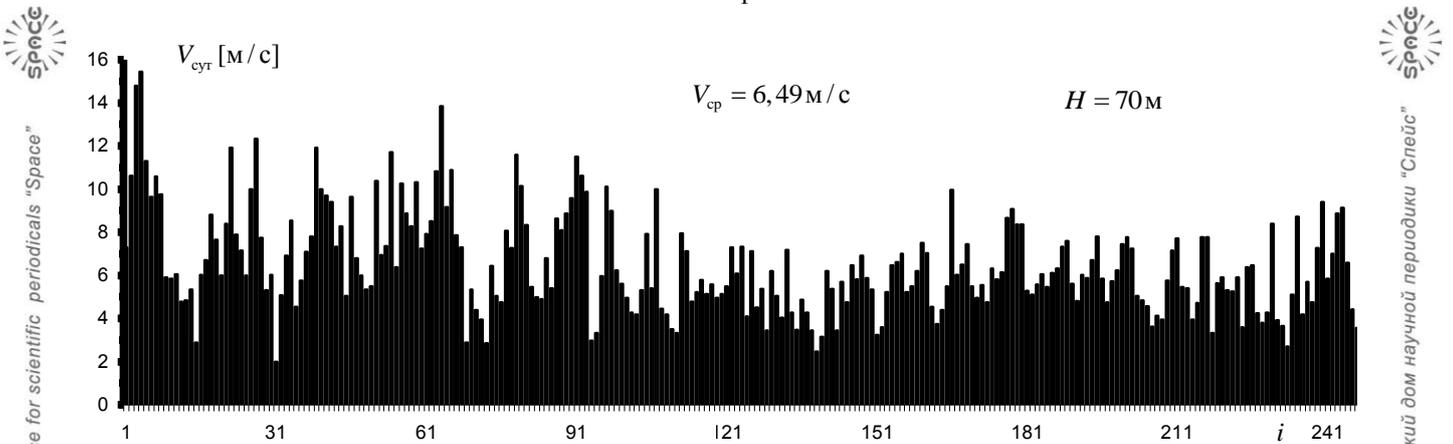


Рис. 3 – Динамика среднесуточной скорости ветра при средней скорости за период $V_{cp} = 6,49$ м/с

Fig. 3 – Dynamics of average daily wind speed at average speed for the period $V_{cp} = 6,49$ м/с

Анализ энергетических характеристик рассматриваемой системы проведем путем сравнения изменения в течение $N_c = 248$ суток суточных значений $\bar{q}_{потр}$ и $\bar{q}_{ВЭУ}(i)$. На рис. 4 показаны необходимые для такого анализа диаграммы.

На диаграмме в середине рис. 4, где указано значение средней скорости ветра $V_{cp} = 6,49$ м/с, представлено извлеченное ВЭУ из воздушного потока посуточное относительное значение энергии $\bar{q}_{ВЭУ}(i)$ [кВт·ч/м²]. Здесь же пунктирной горизонтальной линией показано ежесуточное значение потребной энергии $\bar{q}_{потр}$. На графике видно, что для некоторых суток энергия ВЭУ больше потребного количества энергии. В этом случае используемая в сутки энергия ВЭУ $\bar{q}_{ВЭУ исп}$ равна потребному её количеству $\bar{q}_{ВЭУ исп} = \bar{q}_{потр}$. Посуточное изменение использованной энергии ветра показано на верхней

диаграмме рис. 4. Здесь видно, что иногда использованная энергия ветра ограничена $\bar{q}_{потр}$ и иногда – $\bar{q}_{ВЭУ исп} < \bar{q}_{потр}$. Суммирование в течение всех $N_c = 248$ суток дает значение полной использованной энергии ВЭУ $\bar{E}_{Т ВЭУ исп}$.

В рассматриваемом случае, в силу ограничения ежесуточной потребной энергии $q_{потр}$ [кВт·ч/сутки], этот избыток энергии необходимо ликвидировать. Это можно сделать, либо остановив вращение ветроколеса системой торможения, либо «слив» электрический заряд в землю.

Неиспользованная в течение суток энергия ветра на диаграмме $\bar{q}_{ВЭУ}(i)$ характеризуется положительным значением разности $\Delta \bar{q}_{ВЭУ} = \bar{q}_{ВЭУ}(i) - \bar{q}_{потр}$, а энергия использованного топлива $\bar{q}_{топл}(i)$ – отрицательным значением этой разности.

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



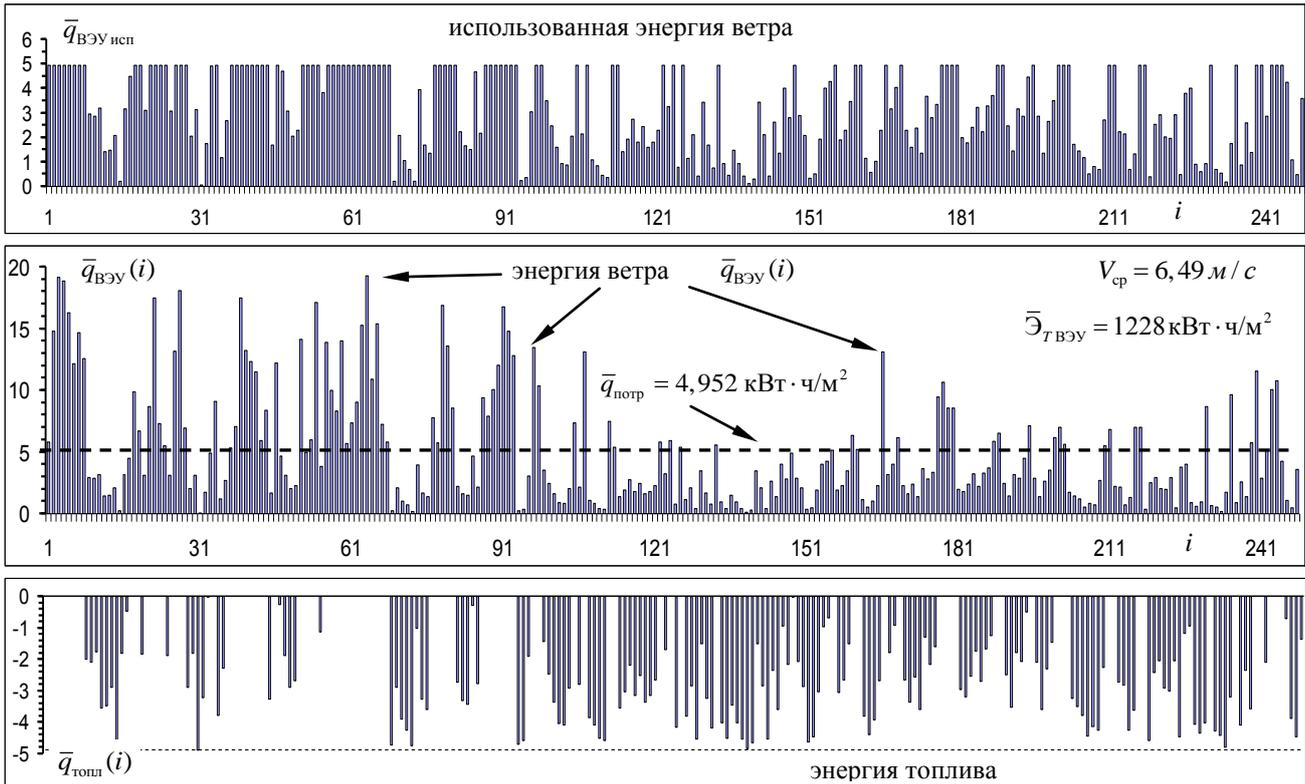


Рис. 4 – Динамика энергетических характеристик ветра и использованной энергии топлива
 Fig. 4 – Dynamics of wind energy characteristics and used energy of fuel

На нижней диаграмме рис. 4 показано ежесуточное значение энергии $\bar{q}_{\text{топл}}(i)$, которое должен обеспечить дизель-генератор. На графике видно, что при рассмотренном законе изменения среднесуточной скорости ветра по времени потребное значение энергии обеспечивается только дизель-генератором всего несколько дней. В подавляющем большинстве случаев ВЭУ и дизель-генератор обеспечивают нагрузку при совместной работе.

Суммирование значений $\bar{q}_{\text{топл}}(i)$ в течение всех $N_c = 248$ суток дает полную энергию топлива $\bar{\Theta}_{\text{топл}}$.

Результаты подобного анализа распределения энергий за число суток N_c для различных значений средней скорости $V_{\text{ср}}$ сведены в табл. 2. Здесь $\bar{Q}_{\text{Т потр}} = Q_{\text{Т потр}} / S_{\text{ВК}} = \bar{\Theta}_{\text{Т ВЭУ}}$.

Как видно, получены естественные при выполнении условия $\Theta_{\text{Т ВЭУ}} = Q_{\text{Т потр}}$ результаты.

Таблица 2

Энергия ВЭУ, топлива и использованная энергия за период 248 суток при различных средних значениях скорости ветра

Table 2

Energy of wind turbines, fuel and energy used over a period of 248 days at various average wind speeds

$H, \text{ м}$	$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$	$\bar{Q}_{\text{Т потр}} = \bar{\Theta}_{\text{Т ВЭУ}}$ кВт·ч/м ²	$\bar{q}_{\text{потр}}$	$S_{\text{ВК}}, \text{ м}^2$	$\bar{\Theta}_{\text{Т ВЭУ исп.}}$ кВт·ч/м ²	$\bar{\Theta}_{\text{Т топл}}$ кВт·ч/м ²	$\Delta \bar{\Theta}_{\text{Т топл}}$ кВт·ч/м ²	$\Delta \bar{\Theta}_{\text{Т ВЭУ}}$ кВт·ч/м ²
70	6,49	1228,025	4,95	3,03	772,52	455,5	772,52	455,5
60	6,17	1077,43	4,34	3,45	663,75	413,68	663,75	413,68
50	5,96	984,23	3,97	3,78	597,26	386,97	597,26	386,97
40	5,42	771,4	3,11	4,82	438,76	332,64	438,76	332,64
30	4,5	449,6	1,81	8,27	241,15	208,47	241,15	208,47



1. Экономия энергии топлива $\bar{\Theta}_{T\text{топл}}$ равна использованной энергии ветра $\bar{\Theta}_{T\text{ВЭУ исп}}$.
2. Неиспользованная энергия ветра $\bar{\Theta}_{T\text{ВЭУ}}$ равна энергии израсходованного топлива $\bar{\Theta}_{T\text{топл}}$.
3. Относительная величина $\bar{q}_{\text{потр}}$ зависит от средней скорости $V_{\text{ср}}$.

В табл. 2 также видно сильное влияние скорости $V_{\text{ср}}$ на энергетические характеристики системы на рассматриваемом интервале времени N_c . Влияние этой скорости на энергетические характеристики системы показано на рис. 5.

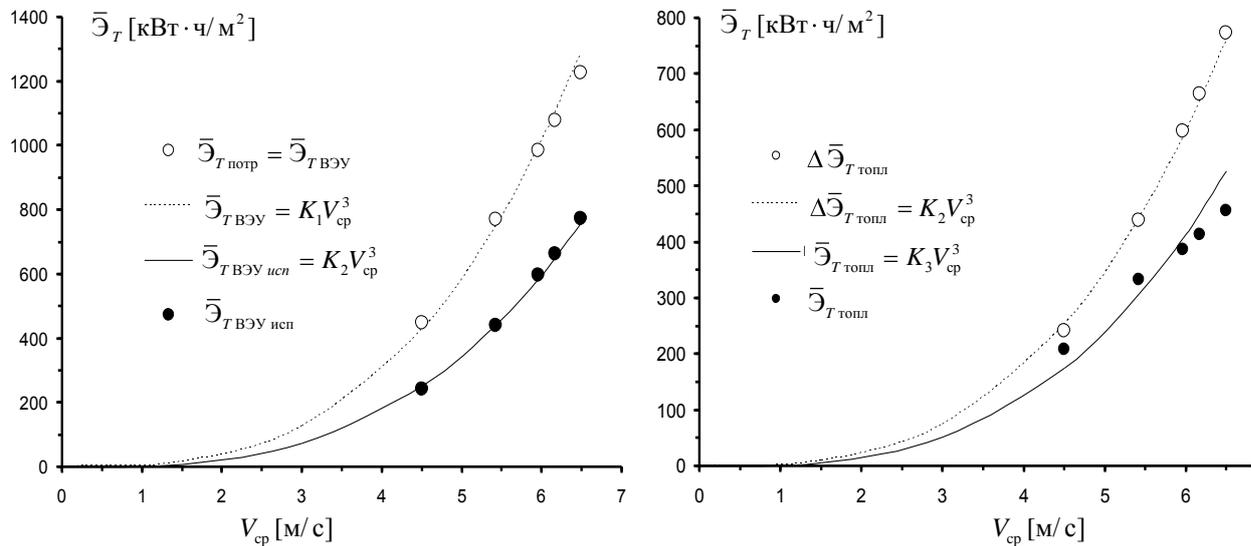


Рис. 5 – Влияние средней за период скорости на энергетические характеристики элементов гибридной системы
 Fig. 5 – Influence of the average speed over the period on the energy characteristics of the hybrid system elements

Интересно отметить, что на рис. 5 величины $\bar{\Theta}_{T\text{ВЭУ}}$, $\bar{\Theta}_{T\text{ВЭУ исп}}$ и $\bar{\Theta}_{T\text{топл}}$ как функции средней скорости ветра изменяются почти как кубическая парабола $KV_{\text{ср}}^3$. А расход топлива не совсем подчиняется этому закону.

Данные табл. 2 при заданной размерной величине потребной энергии позволяют рассчитать влияние средней скорости ветра на баланс размерных энергий. В табл. 3 приведены результаты такого расчета для

размерной величины суточной энергии $q = 15 \text{ кВтч/сутки}$. За время $N_c = 248$ суток потребуется количество энергии $Q_{T\text{потр}} = 3720 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. При каждом значении средней скорости $V_{\text{ср}}$ и рассматриваемом изменении среднесуточной скорости ветра по времени известно значение $\bar{\Theta}_{T\text{ВЭУ}}$. Эта информация позволяет для каждой средней скорости ветра определить оме-таемую ветроколесом площадь и его диаметр.

Таблица 3
 Влияние средней скорости ветра на баланс размерных энергий в гибридной системе
 Table 3
 Effect of average wind speed on the size energy balance in a hybrid system

$q = 15 \text{ кВтч/сутки}, N_c = 248 \text{ суток}, Q_{T\text{потр}} = 3720 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$							
$V_{\text{ср}}, \text{ м/с}$	$\bar{\Theta}_{T\text{ВЭУ}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^2$	$S_{\text{БК}}, \text{ м}^2$	$\Theta_{T\text{ВЭУ исп}} = S_{\text{БК}} \bar{\Theta}_{T\text{ВЭУ исп}}$		$\Theta_{T\text{топл}} = S_{\text{БК}} \bar{\Theta}_{T\text{топл}}$		$\Theta_{T\text{ВЭУ исп}} + \Theta_{T\text{топл}}, \text{ кВт} \cdot \text{ч}$
			$\bar{\Theta}_{T\text{ВЭУ исп}}$	$\Theta_{T\text{ВЭУ исп}}$	$\bar{\Theta}_{T\text{топл}}$	$\Theta_{T\text{топл}}$	
6,49	1 228,025	3,03	772,52	2 340,16	455,5	1 379,84	3 720
6,17	1 077,43	3,45	663,75	2 291,28	413,68	1 428,28	3 720
5,96	984,23	3,78	597,26	2 267,4	386,97	1 462,6	3 720
5,42	771,4	4,82	438,76	2 115,89	332,64	1 604,11	3 720
4,5	449,6	8,27	241,15	1 995,17	208,47	1 724,23	3 720

$$S_{\text{БК}} = Q_{\text{топр}} / \bar{\varepsilon}_{\text{ТВЭУ}}, D_{\text{БК}} = 2\sqrt{S_{\text{БК}} / \pi}.$$

Размерные количества энергий определяются путем умножения относительных энергий из табл. 2 на соответствующую площадь $S_{\text{БК}}(V_{\text{cp}})$. Результаты таких расчетов тоже показаны в табл. 3.

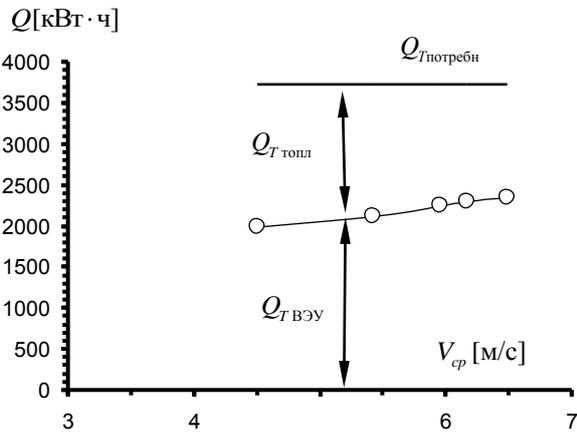


Рис. 6 – Соотношение размерных величин потребной энергии, энергии, выработанной ВЭУ, и топлива
 Fig. 6 – The ratio of the required energy, energy generated by wind turbines and fuel

Приведенные в табл. 3 результаты расчетов в виде графика представлены на рис. 6. Здесь горизонтальная сплошная линия показывает постоянное потребное количество энергии $Q_{\text{топр}} = 3720 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$, а линия с точками – используемую энергию ветра, которую дает ВЭУ. Разница между ними – это энергия,

которую в результате сжигания топлива дает дизель-генератор. Из табл. 3 и рис. 6 следует, что при заданном значении $Q_{\text{топр}}$ с увеличением средней скорости V_{cp} более полно используется энергия ветра и требуется меньше топлива для дизель-генератора.

Вместе с этим из табл. 3 следует, что ометаемая ветроколесом площадь $S_{\text{БК}}(V_{\text{cp}})$ тоже зависит от средней скорости V_{cp} . А это означает, что для каждого значения скорости V_{cp} необходим свой размер ветроустановки.

Знание площади $S_{\text{БК}}$ и зависимости $C_p(V_{\infty})$ позволяет определить основную энергетическую характеристику $W_{\text{ВЭУ}}(V_{\infty})$ искомых ветроустановок по формуле:

$$W_{\text{ВЭУ}}(V_{\infty}) = 0,5\rho V_{\infty}^3 \cdot S_{\text{БК}} \cdot C_p(V_{\infty}) / 1000 \text{ [кВт]}.$$

В правой части рис. 7 показаны зависимости $W_{\text{ВЭУ}}(V_{\infty})$, рассчитанные по этой формуле. На полочном участке каждой из этих зависимостей указаны значения мощности устанавливаемого генератора W_G . Отметим, что эта мощность получается путем умножения мощности воздушной струи на значения площади $S_{\text{БК}}$, которая различна для разных значений скорости V_{cp} .

На графиках рис. 7 видно, что при рассматриваемых условиях с ростом средней скорости V_{cp} для ветроустановки требуется не только меньший размер ветроколеса, но и меньшая мощность генератора W_G .

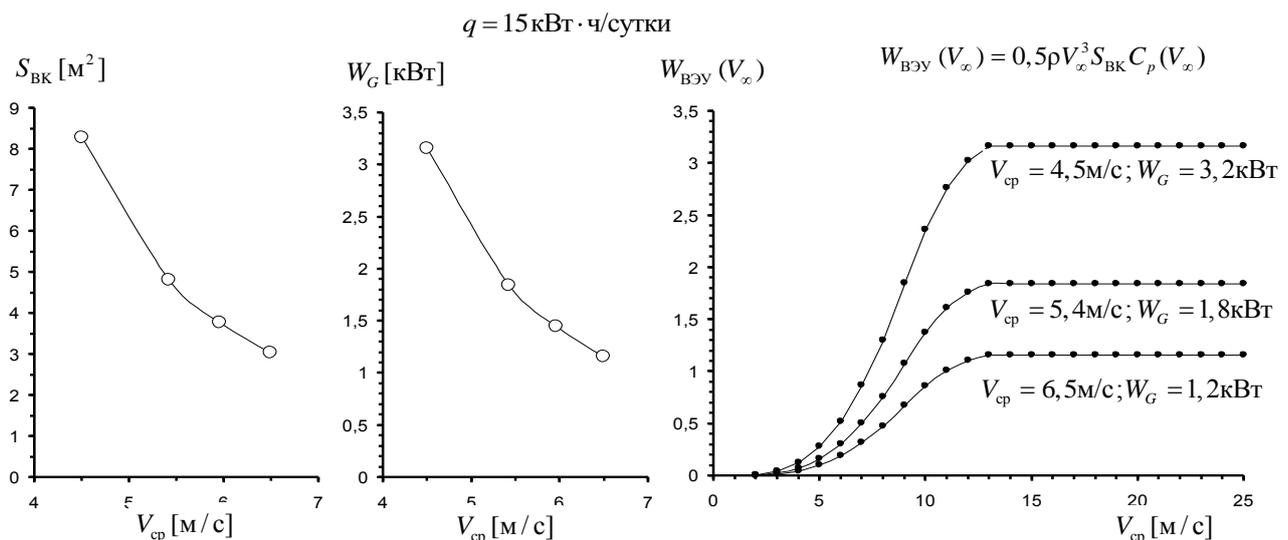


Рис. 7 – Соотношение мощности ВЭУ и ветрогенератора при различных скоростях ветра
 Fig. 7 – Power ratio of wind turbine and wind generator at various wind speeds

С первого взгляда этот результат кажется неправильным, так как при традиционном проектировании ВЭУ для местностей с большей средней скоростью обычно используется большая мощность генератора.



International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"

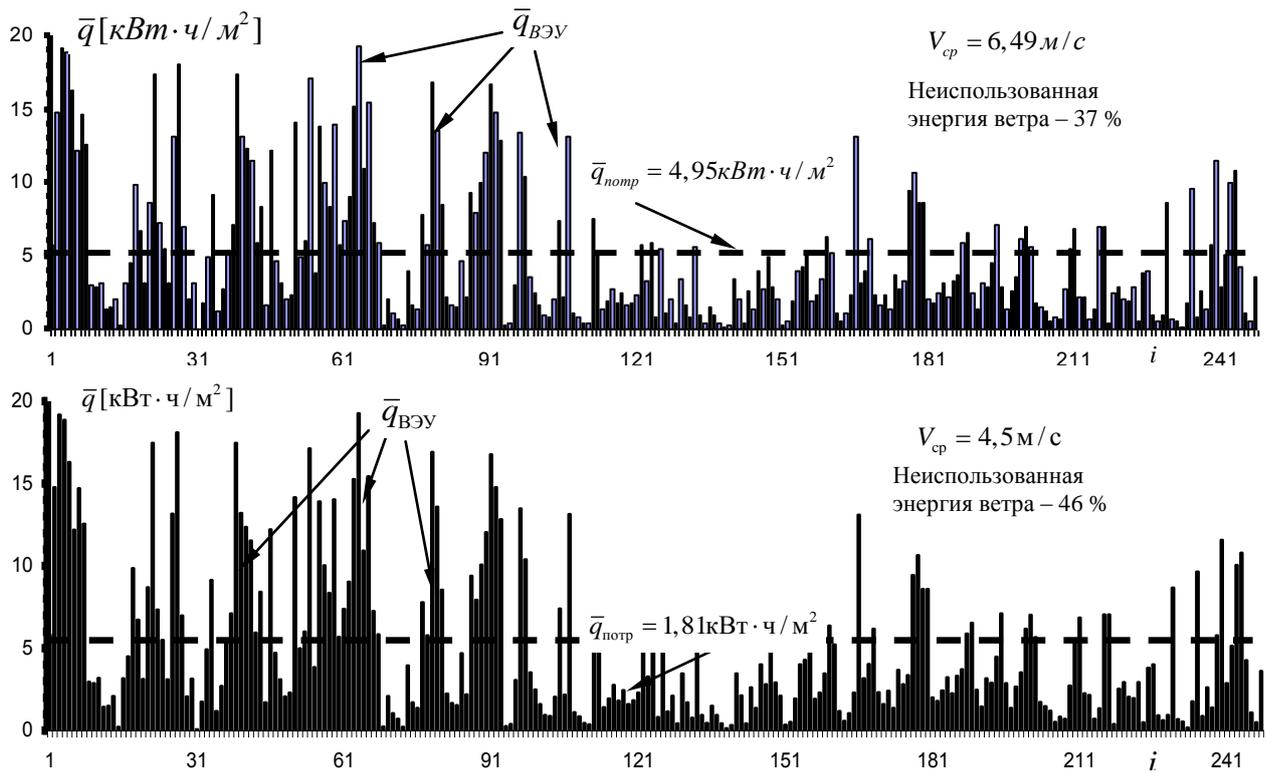


Рис. 8 – Диаграммы посуточного изменения относительной энергии ВЭУ и потребной энергии
Fig. 8 – Diagrams of daily changes in relative energy of wind turbines and the required energy

Для осмысления полученного результата рассмотрим показанные на рис. 8 диаграммы посуточного изменения относительных энергий $\bar{q}_{ВЭУ}(i)$ и $\bar{q}_{потр}$ при двух значениях средней скорости $V_{cp} = 4,5 м/с$ и $V_{cp} = 6,49 м/с$. Как уже отмечалось, неиспользованная энергия ветра характеризуется на этих диаграммах положительным значением разности $\Delta \bar{q}_{iВЭУ} = \bar{q}_{iВЭУ} - \bar{q}_{потр}$. Суммирование этих разностей показало, что относительная доля неиспользованной энергии ветра в рассматриваемых случаях оказалась различной. При средней скорости $V_{cp} = 6,49 м/с$ неиспользуемая энергия ветра составляет 37 % выработанной энергии $\bar{\mathcal{E}}_{ТВЭУ}$, а при средней скорости $V_{cp} = 4,5 м/с$ – 46 %. Таким образом, при ограниченной необходимой энергии и рассмотренных законах изменения среднесуточной скорости ветра при большой средней скорости V_{cp} , ветроустановка с меньшим значением мощности генератора и меньшим радиусом ветроколеса использует энергию ветра более эффективно, чем ВЭУ с большими значениями мощности генератора и радиуса ветроколеса при меньшей средней скорости ветра.

Как уже отмечалось, в природе на циклических промежутках времени с повторяющимися условиями скорость ветра является случайной функцией времени

$V_{\infty}(t)$ [3]. Показано также, что заданной функции $V_{\infty}(t)$ соответствует единственная функция $p^*(V_{\infty})$, которая применяется в формулах (1–3). В то же время одной функции $p^*(V_{\infty})$ соответствует бесчисленное множество функций $V_{\infty}(t)$ с одинаковыми значениями характеристик V_{cp} , W_{cp} и \mathcal{E}_T . Равенства (1–3) позволяют моделировать влияние различных реализаций случайной функции $V_{\infty}(t)$, если известна одна её реализация. При дискретных значениях среднесуточной скорости $V_{сут}(i)$ это можно сделать, изменяя произвольным образом расположение дискретных значений скорости вдоль оси времени.

На рис. 9 показаны дополнительные 3 варианта функции $\bar{q}_{ВЭУ}(i)$, соответствующие различным перестановкам в массиве исходной (измеренной) скорости ветра при постоянном значении ветроэнергетического потенциала $\bar{\mathcal{E}}_{ТВЭУ} = 711,4 кВт \cdot ч / м^2$ и средней скорости $V_{cp} = 5,4 м/с$. На всех диаграммах пунктирной линией показано относительное значение $\bar{q}_{потр}$.

Поскольку от перемены мест слагаемых сумма разностей $\Delta \bar{q}_{iВЭУ} = \bar{q}_{iВЭУ} - \bar{q}_{потр}$ не меняется, для всех четырех вариантов изменения скорости ветра суммарные значения использованной и неиспользован-

ной энергии ветра будут одинаковыми, как и значения количества энергии, которое необходимо получить от сжигания топлива в дизель-генераторе. В рассмотренном примере для всех вариантов изменения скорости $V_{сум}(i)$ энергия топлива оказалась равной 43 % потребного значения энергии.

Таким образом, при ограниченной величине необходимой энергии $Q_{Тпогр} = \mathcal{E}_{ТВЭУ}$ случайный характер изменения скорости ветра по времени $V_{сум}(i)$ при постоянном значении средней скорости $V_{ср}$ и соответствующем постоянном значении энергии $\bar{\mathcal{E}}_{ТВЭУ}$ не влияет на соотношение используемой и неиспользуемой энергий ветра и количество энергии, которое должен выработать дизель-генератор при сжигании топлива.

Примечательно, что в конце XIX в. и первой половине XX в. ветродвигатели работали с сельскохозяйственными машинами (насосы для выкачивания поземной воды, корне- и жмыходробилки и т.д.), время работы которых не регламентировалось, – они работали только тогда, когда был ветер. В этих условиях энергия ветра использовалась полностью, как и при работе ВЭУ на энергосистему.

Выявленное в этом разделе неполное использование энергии ветра связано только с ограничением суточного значения электроэнергии при её выработке автономной ВЭУ.

3.2 Анализ работы энергосистемы ВЭУ + накопитель электроэнергии + дизель-генератор

Накопитель электроэнергии, если не ограничивать его объем, позволяет снять ограничение на ежедневное потребление энергии. Будем считать, что

технически ВЭУ и дизель-генератор работают на накопитель электроэнергии. В накопитель будем отправлять неиспользованное суточное количество электроэнергии ВЭУ:

$$\Delta \bar{q}_{iВЭУ} = \bar{q}_{iВЭУ} - \bar{q}_{погр} > 0.$$

Обозначим при расчете энергетического баланса относительные величины:

\bar{Q}_{ni} [кВт·ч/м²] – количество энергии в накопителе в i сутки; \bar{Q}_{ni-1} [кВт·ч/м²] – количество энергии в накопителе в $i-1$ сутки; $\bar{q}_{iВЭУ}$ [кВт·ч/м²] – производимая ВЭУ электроэнергия в i сутки; $\bar{q}_{iВЭУисп}$ [кВт·ч/м²] – использованная электроэнергия ВЭУ в i сутки; $\bar{q}_{iтопл}$ [кВт·ч/м²] – использованная дизель-генератором энергия топлива в i сутки; $\bar{q}_{\Sigma} = \bar{q}_{iВЭУисп} - \bar{q}_{iтопл}$ – использованная энергия ВЭУ и дизель-генератора в сутки.

Напомним, что в данном анализе энергия топлива имеет отрицательное значение, поэтому разность $\bar{q}_{\Sigma} = \bar{q}_{iВЭУисп} - \bar{q}_{iтопл}$ – всегда положительное число.

Алгоритм определения энергетического состояния каждой составляющей системы иллюстрируется табл. 4 на примере распределения среднесуточной скорости $V_{сум}(i)$ при значении $V_{ср} = 5,4$ м/с и значении $\bar{q}_{погр} = 0,311$ кВт·ч/м². Алгоритм основан на вычислении и анализе следующей суммы:

$$\bar{Q}_{ni} = \bar{Q}_{ni-1} + \bar{q}_{iВЭУ} - \bar{q}_{погр}.$$

Таблица 4

Иллюстрация алгоритма определения энергетического состояния всех элементов гибридной системы

Table 4

Illustration of the algorithm for determining the energy state of the hybrid system elements

$V_{ср} = 5,4$ м/с, $\bar{q}_{погр} = 3,11$ кВт·ч/м ² , $\bar{Q}_{n0} = 0$							
1	2	3	4	5	6	7	8
i	$\bar{q}_{iВЭУ}$	$\bar{q}_{iВЭУ} - \bar{q}_{погр}$	$\bar{Q}_{ni} = \bar{Q}_{ni-1} + \bar{q}_{iВЭУ} - \bar{q}_{погр}$	$\bar{q}_{iВЭУ} = \bar{q}_{iВЭУисп}$	$\bar{q}_{iтопл}$	$\bar{q}_{iВЭУисп} = \bar{Q}_{ni-1} + \bar{q}_{iВЭУ}$	$\bar{q}_{\Sigma} = \bar{q}_{iВЭУисп} - \bar{q}_{iтопл}$
1	1,306	-1,804	-1,804 (=0)		-1,804	1,306	3,11
2	8,028	4,918	4,918	3,11			
3	1,209	-1,902	3,017	3,11			
4	2,386	-0,725	2,293	3,11			
5	3,282	0,172	2,463	3,11			
6	1,075	-2,036	0,428	3,11			
7	0,749	-2,361	-1,934 (= 0)		-1,934	1,176	3,11
8	0,763	-2,348	-2,348 (= 0)		-2,348	0,763	3,11
9	0,637	-2,473	-2,473 (= 0)		-2,473	0,637	3,11
10	1,962	-1,148	-1,148 (= 0)		-1,148	1,962	3,11
11	1,269	-1,841	-1,841 (= 0)		-1,841	1,269	3,11
12	1,907	-1,203	-1,203 (= 0)		-1,203	1,907	3,11
13	5,911	2,801	2,801	3,11			
14	6,405	3,295	6,096	3,11			
15	4,771	1,661	7,757	3,11			

International Publishing House for scientific periodicals "Space"

Международный издательский дом научной периодики "Спейс"



В зависимости от знака этой разности выполняются различные операции.

В табл. 4 для первого дня ($i=1$) энергия в накопителе отсутствует, $\bar{Q}_{ni-1} = \bar{Q}_{n0} = 0$. Это обозначено в первой строке табл. 4.

При известном значении $\bar{q}_{iВЭУ}$ может возникнуть одна из двух ситуаций:

1. Пусть $\bar{Q}_{ni} = \bar{Q}_{ni-1} + \bar{q}_{iВЭУ} - \bar{q}_{потр} = \Delta\bar{q}_i < 0$. Эта ситуация соответствует первой строке ($i=1$) табл. 4. В этом случае вместо отрицательного значения $\Delta\bar{q}_i = -1,804$ полагаем количество энергии в накопителе (в 4 столбце) $\bar{Q}_{ni} = 0$. Величина $\Delta\bar{q}_i$ является энергией, которую должен выработать дизель-генератор, располагается в 6 столбце, где $\bar{q}_{iтопл} = \Delta\bar{q}_i$. Энергия нагрузки в этот день обеспечивается суммой $\bar{q}_\Sigma = \bar{q}_{iВЭУисп} - \bar{q}_{iтопл} = \bar{q}_{потр}$, которая располагается в 8 столбце. В 7 столбце располагаем $\bar{q}_{iВЭУ} = \bar{q}_{iВЭУисп}$ использованную энергию ВЭУ.

2. Пусть $\bar{Q}_{ni} = \bar{Q}_{ni-1} + \bar{q}_{iВЭУ} - \bar{q}_{потр} = \Delta\bar{q}_i > 0$. Эта ситуация соответствует второй строке ($i=2$) табл. 4. В этот день нагрузка обеспечивается энергией самой ВЭУ, а её избыток $\Delta\bar{q}_i = 4,918$ отправляется в накопитель. Используемая энергия ветра здесь $\bar{q}_{iВЭУисп} = \bar{q}_{потр}$ и располагается в 5 столбце таблицы. Энергия накопителя $\bar{Q}_{ni2} = \Delta\bar{q}_2 = 4,918$ остается в 4 столбце для использования в следующие сутки.

Такая ситуация возникает при значениях $i = 2,3,4,5,6$.

При значениях $i = 7; 8; 9; 10; 11; 12$ сумма $\bar{Q}_{ni} = \bar{Q}_{ni-1} + \bar{q}_{iВЭУ} - \bar{q}_{потр} = \Delta\bar{q}_i < 0$. Здесь возникает 1 ситуация. В этом случае опять вместо отрицательного значения $\Delta\bar{q}_i$ полагаем количество энергии в накопителе $\bar{Q}_{ni} = 0$. Отрицательная величина $\Delta\bar{q}_i$ является энергией, которую должен выработать дизель-генератор, располагается в 6 столбце, где $\bar{q}_{iтопл} = \Delta\bar{q}_i$. Энергия нагрузки обеспечивается суммой $\bar{q}_\Sigma = \bar{q}_{iВЭУисп} - \bar{q}_{iтопл} = \bar{q}_{потр}$, которая располагается в 8 столбце. В 7 столбце располагаем $\bar{q}_{iВЭУ} = \bar{q}_{iВЭУисп}$ использованную энергию ВЭУ.

На рис. 10 работа рассматриваемой системы энергообеспечения иллюстрируется диаграммами в течение $N_c = 28$ суток. На верхней диаграмме показано сравнение суточной энергии ВЭУ с её потребными значениями. Средняя диаграмма показывает изменение энергии накопителя, а нижняя диаграмма – суточную энергию топлива, которую вырабатывает дизель-генератор. Из приведенных диаграмм следует, что наличие накопителя электроэнергии позволяет в рассматриваемом примере в течение 14 дней не использовать энергию топлива вообще, а в дни её использования существенно снизить расход топлива по сравнению с потребным значением.

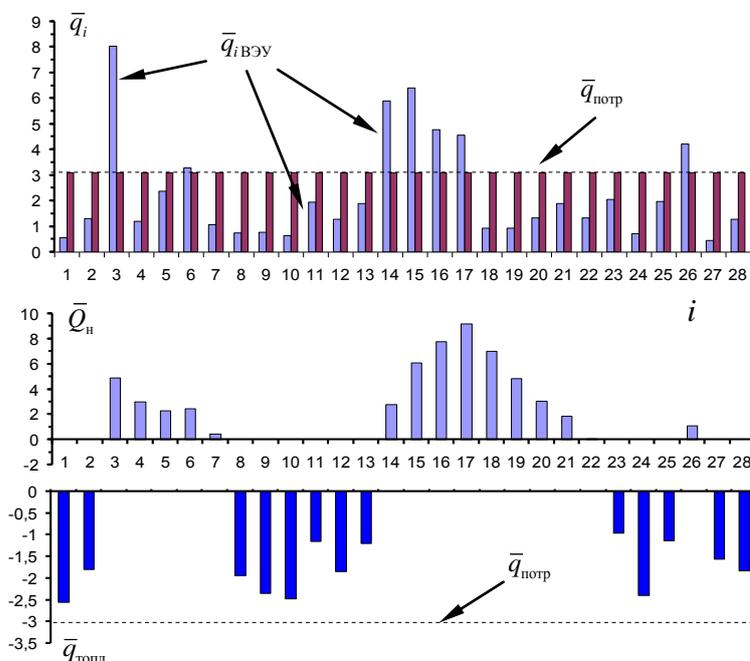


Рис. 10 – Диаграммы потребной энергии, энергии в накопителе и ВЭУ за период 28 дней
 Fig. 10 – Diagrams of required energy, energy in the drive and wind turbines for a period of 28 days

Описанный алгоритм позволяет рассчитать еже-суточный энергетический баланс рассматриваемой

системы при различных законах изменения средне-суточной скорости ветра на отрезке времени N_c .



Вначале исследуем случай, когда емкость накопителя электроэнергии не ограничена. На исходном распределении ежесуточной скорости ветра $V_{сут}(i)$

в течение $N_c = 248$ суток оценим объем этого накопителя при различных значениях средней скорости ветра V_{cp} .

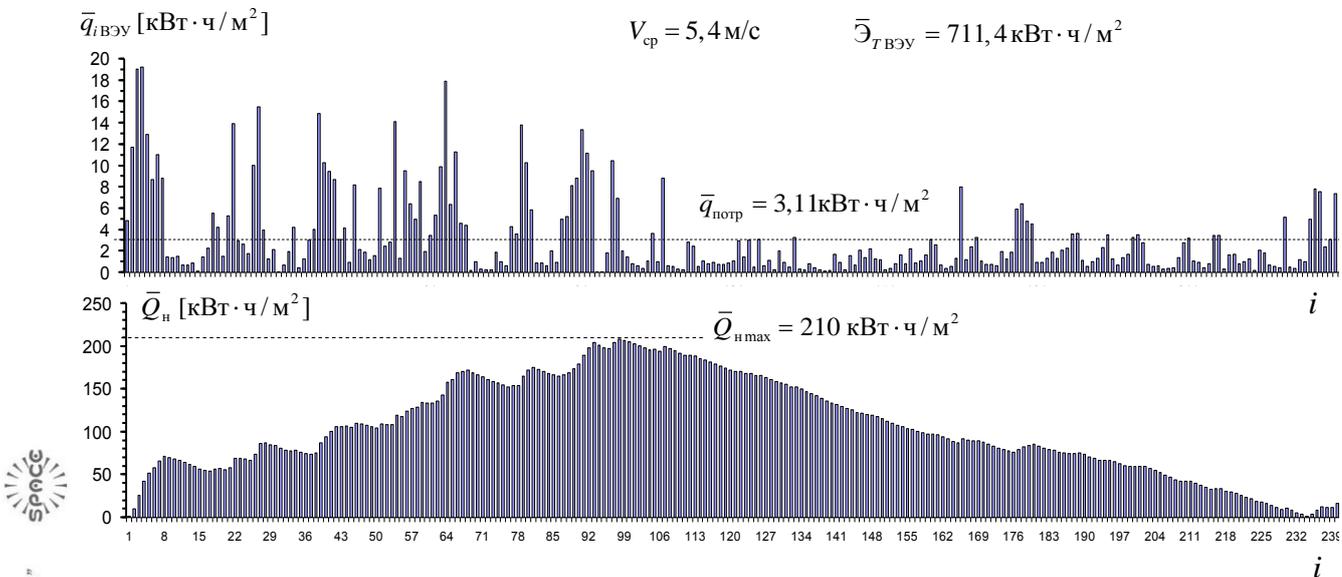


Рис. 11 – Изменение относительной суточной энергии ветра и энергии накопителя при исходной последовательности средних суточных скоростей ветра
Fig. 11 – The change in the relative daily wind energy and energy in the drive when the original sequence of average daily wind speeds

На рис. 11 верхняя диаграмма показывает изменение относительной суточной энергии ветра $\bar{q}_{iВЭУ}(i)$ при исходном (измеренном) распределении суточной скорости $V_{сут}(i)$ в течение $N_c = 248$ суток при средней скорости $V_{cp} = 5,4$ м/с, а нижняя диаграмма – изменение энергии накопителя $\bar{Q}_n(i)$. На диаграмме $\bar{Q}_n(i)$ хорошо видно, что когда суточное значение энергии ВЭУ $\bar{q}_{iВЭУ} > \bar{q}_{потр}$, энергия в накопителе нарастает, а когда $\bar{q}_{iВЭУ} < \bar{q}_{потр}$ – энергия в накопителе убывает.

На диаграмме $\bar{Q}_n(i)$ виден максимум. Максимальное значение \bar{Q}_{nmax} составляет долю выработанной ВЭУ энергии $\bar{E}_{ТВЭУ}$, так как $\bar{Q}_{nmax} < \bar{E}_{ТВЭУ}$. Из рис. 11 следует, что если объем накопителя для рассматриваемого распределения скорости $V_{сут}(i)$ будет равен \bar{Q}_{nmax} , то при выполнении условия $Q_{Тпотр} = \bar{E}_{ТВЭУ}$ ВЭУ с таким накопителем обеспечит нагрузку только энергией ветра.

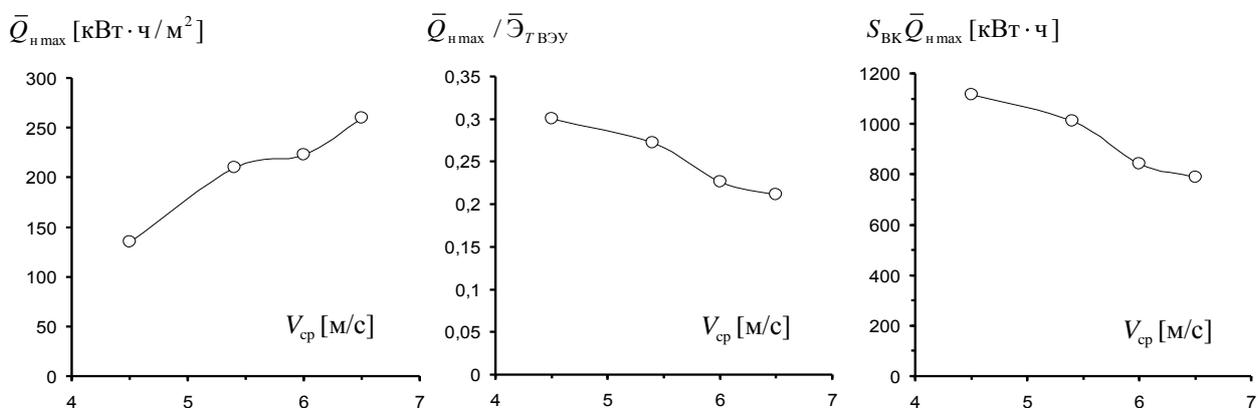


Рис. 12 – Влияние средней скорости ветра на максимальный объем накопленной энергии в аккумуляторе
Fig. 12 – Effect of average wind speed on the maximum amount of accumulated energy in the battery

Это, по мнению авторов данной статьи, редкое свойство измеренного распределения скоростей проявляется при всех высотах и значениях средней скорости ветра $4,5 \leq V_{cp} \leq 6,5$ м/с. При этом во всех случаях в диаграммах $\bar{Q}_n(i)$ максимум достигается в одно и то же время – на $99 \div 100$ сутки. Однако максимальные значения \bar{Q}_{nmax} зависят от средней скорости V_{cp} . Влияние средней скорости V_{cp} на объем энергии \bar{Q}_{nmax} иллюстрируется рис. 12.

На графике $\bar{Q}_{nmax}(V_{cp})$ видно, что с увеличением средней скорости V_{cp} относительная емкость накопителя \bar{Q}_{nmax} возрастает. Интересно отметить, что отношение $\bar{Q}_{nmax} / \bar{E}_{ТВЭУ}$ с увеличением средней скорости V_{cp} уменьшается.

В разделе 2.1. отмечалось, что при выполнении условия $Q_{Tпотр} = \bar{E}_{ТВЭУ}$ для каждого значения средней скорости V_{cp} требуются ВЭУ с разными размерами ветроколеса (площади S_{BK}) и разными значениями мощности генератора W_G . На правом графике рис. 12 показано изменение емкости накопителя для таких ВЭУ. Эта емкость определяется произведением $S_{BK} \bar{Q}_{nmax}$ [кВт·ч]. На графике также видно, что с увеличением средней скорости V_{cp} при заданном объеме потребной энергии $Q_{Tпотр} = \bar{E}_{ТВЭУ}$ максимальная размерная емкость накопителя уменьшается.

Рассмотрим влияние случайности изменения скорости ветра по времени на распределение энергии в элементах рассматриваемой системы. Будем рассматривать случайные варианты изменения среднесуточной скорости $V_{сут}(i)$ в течение $N_c = 248$ суток, для которых изменение суточных значений энергии ВЭУ были показаны на рис. 9 при значении средней скорости $V_{cp} = 5,4$ м/с. Напомним, что для всех трех распределений скорости ветра условие $Q_{Tпотр} = \bar{E}_{ТВЭУ}$ выполняется. Необходимые для рассмотрения диаграммы приведены на рис. 13–15.

На рис. 13а показаны диаграммы посуточного изменения энергии накопителя $\bar{Q}_n(i)$ и энергии топлива $\bar{q}_{топл}(i)$ при первом варианте изменения скорости ветра по времени. В отличие от рис. 11, в этом случае в интервале $N_c = 248$ суток в накопителе энергия есть только в течение первых 3 месяцев и полутора месяцев в конце периода. В середине интервала $N_c = 248$ суток энергия ветра весьма незначительна, и длительное время потребная энергия обеспечивается использованием топлива. Но условие $Q_{Tпотр} = \bar{E}_{ТВЭУ}$ выполняется так, что в последние су-

тки $i = 248$ в накопителе остается количество энергии, которое дается сжиганием топлива.

На рис. 13b показаны такие же диаграммы для второго варианта изменения скорости ветра по времени. Интересно отметить, что по сравнению с первым вариантом значение \bar{Q}_{nmax} увеличилось совсем незначительно. Однако здесь для обеспечения гарантированного электроснабжения необходимое количество энергии топлива более чем в 4 раза меньше, чем на рис. 13а. На рис. 13b в последнем дне периода в накопителе остается такое же малое количество энергии, которое обеспечивается сжиганием топлива.

На рис. 13c показаны такие же диаграммы для третьего варианта изменения скорости ветра по времени. Здесь значение \bar{Q}_{nmax} почти в полтора раза больше, чем в предыдущих случаях, и накопитель работает практически только в последние месяцы интервала времени $N_c = 248$ суток. В первой половине рассматриваемого интервала гарантированное электроснабжение обеспечивается большим количеством энергии топлива.

Приведенные на рис. 13 результаты позволяют предположить, что даже при выполнении условия $Q_{Tпотр} = \bar{E}_{ТВЭУ}$ и наличии накопителя электроэнергии максимальной емкости $\bar{Q}_n = \bar{Q}_{nmax}$ вероятны случаи, когда гарантированность электроснабжения можно обеспечить только с помощью дизель-генератора. При этом в конце рассматриваемого периода времени в накопителе остается количество электроэнергии, равное энергии использованного топлива.

Рассмотрим теперь влияние ограниченности объема накопителя электроэнергии на энергетические характеристики системы ВЭУ + накопитель электроэнергии + дизель-генератор.

Обозначим ограниченный относительный объем накопителя \bar{Q}_n^* [кВт·ч/м²].

На рис. 14 для измеренного (исходного) распределения суточной скорости ветра $V_{сут}(i)$ показана диаграмма изменения накопленной энергии $\bar{Q}_n(i)$ [кВт·ч/м²] в течение $N_c = 248$ суток. Как уже отмечалось, в этом случае при объеме накопителя $\bar{Q}_n^* = \bar{Q}_{nmax}$ система обеспечивает нагрузку только энергией ветра. На этой же диаграмме показана пунктирная горизонтальная линия, соответствующая значению $\bar{Q}_n^* = 100$ кВт·ч/м². Из диаграммы следует, что при ограниченном объеме накопителя электроэнергии при значениях $\bar{Q}_n(i) > \bar{Q}_n^*$ избыток электроэнергии ВЭУ необходимо «сбрасывать». Ввиду ограниченности объема накопителя электроэнергии, по-видимому, изменится и процесс накопления электроэнергии $\bar{Q}_n(i)$. Для гарантированного снабжения



электроэнергией нагрузки в этом случае потребуются подключать дизель-генератор, так как из-за сброса энергии ветра используемая энергия ветра $\bar{\mathcal{E}}_{ТВЭУ\text{исп}}$

будет меньше $\bar{\mathcal{E}}_{ТВЭУ} = \bar{Q}_{\text{потр}}$. Очевидно, что энергия топлива в этом случае будет соответствовать «сброшенной» из накопителя электроэнергии.

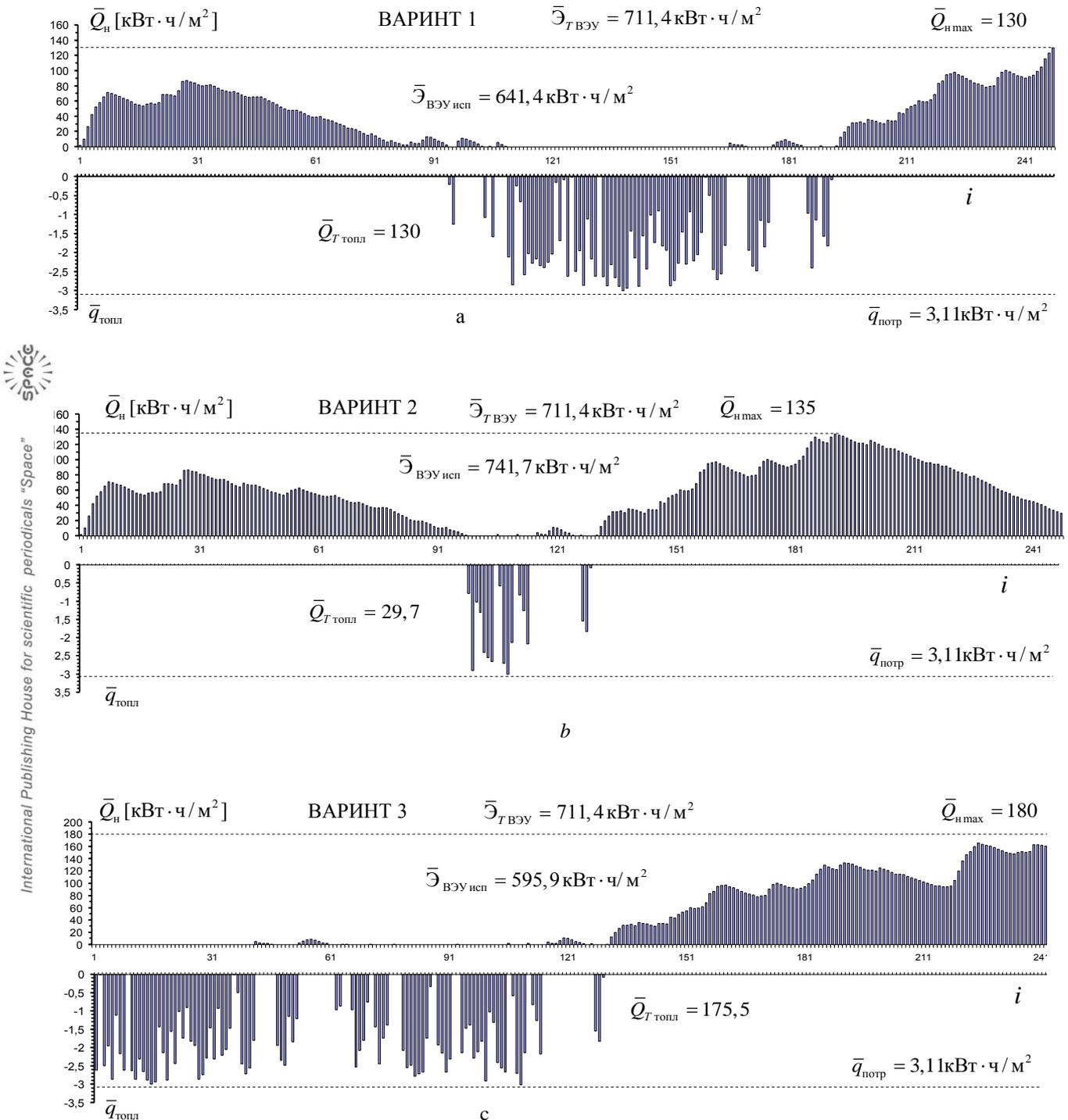


Рис. 13 – Изменение относительной суточной энергии ветра и энергии в накопителе при 1, 2, 3 последовательностях средних суточных скоростей ветра
 Fig. 13 – The change in the relative daily wind energy and energy in the drive at 1, 2, 3 sequences of average daily wind speeds

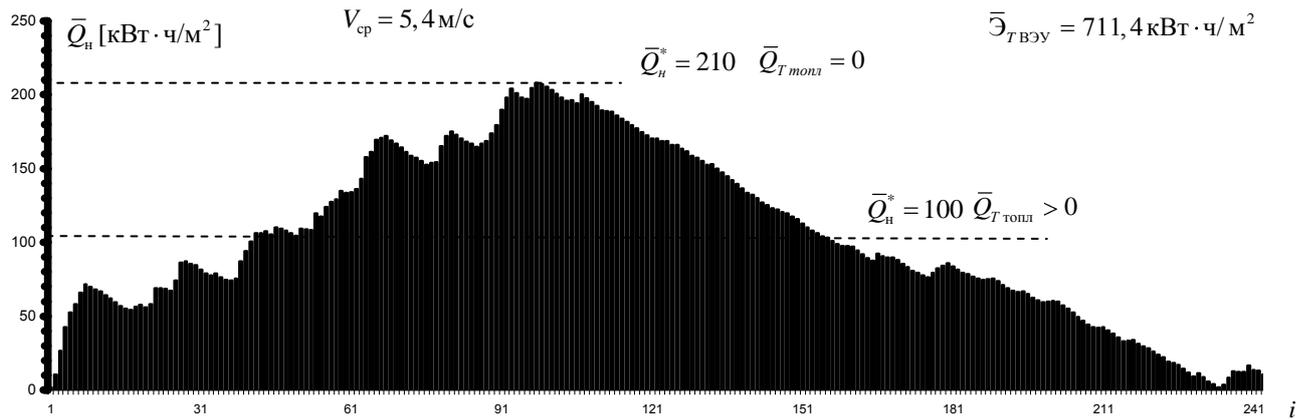


Рис. 14 – Диаграмма изменения накопленной энергии в течение 248 суток
 Fig. 14 – Diagram of changes in the accumulated energy within 248 days

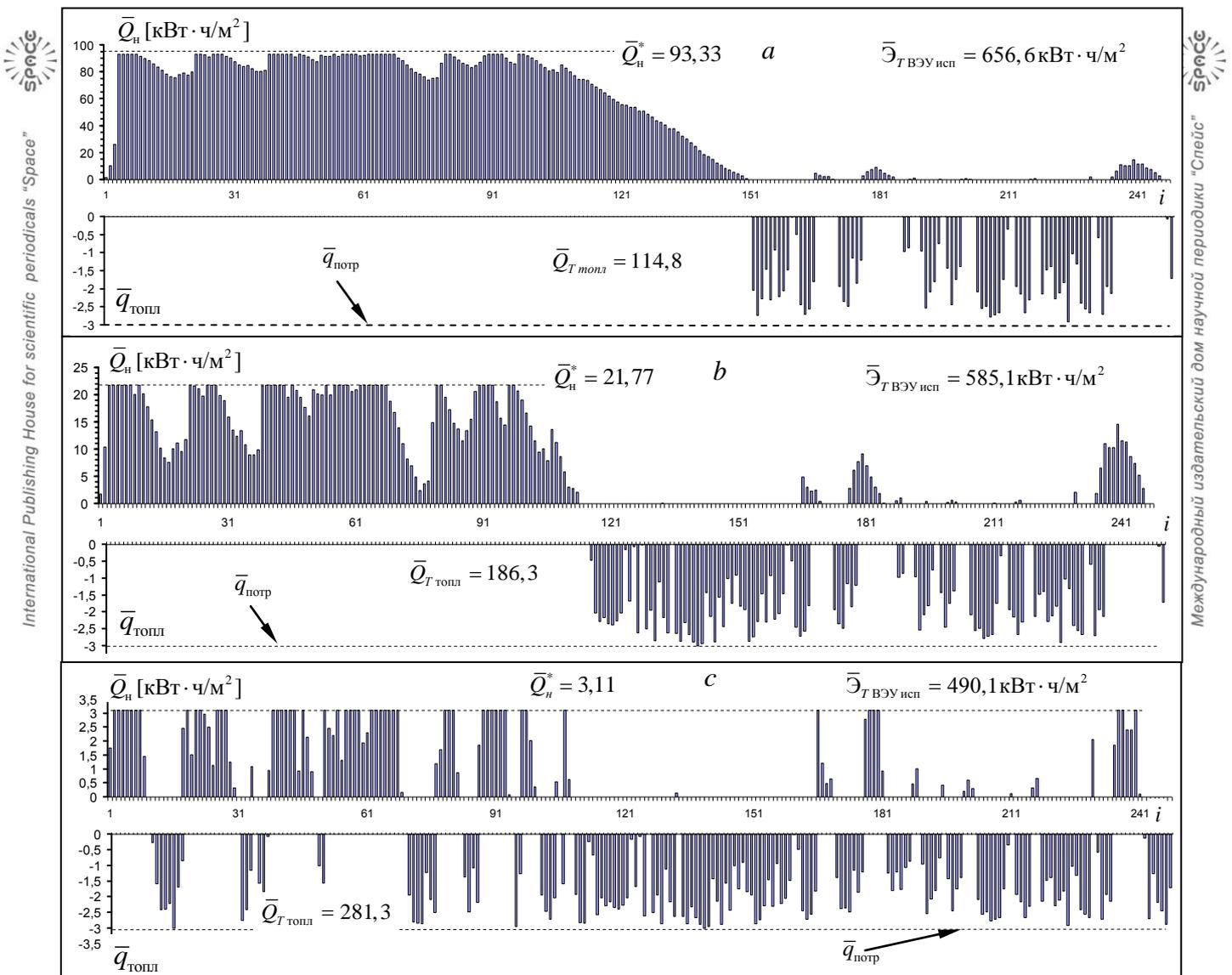


Рис. 15 – Изменение энергии в накопителе и энергии затраченного топлива при 1, 2, 3 последовательностях скорости ветра
 Fig. 15 – The dynamics of energy in the drive and the energy of spent fuel at 1, 2, 3 sequences of wind speed

Интересно отметить следующее.

При объеме накопителя $\bar{Q}_n^* = 93,33 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (рис. 15a) энергия в нем должна сохраняться в течение первых 5 месяцев. На последующих отрезках времени энергия в накопителе должна сохраняться несколько дней. При объеме накопителя $\bar{Q}_n^* = 21,77 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (рис. 15b) непрерывное сохранение электроэнергии должно осуществляться в течение первых почти четырех месяцев. В обоих случаях энергия топлива используется во второй половине всего отрезка времени и с уменьшением объема накопителя использование энергии топлива возрастает.

При объеме накопителя электроэнергии $\bar{Q}_n^* = 3,11 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ (рис. 15c) максимальное время хранения электроэнергии в накопителе сокращается до 10 ÷ 12 дней. В то же время энергия топлива используется с незначительными перерывами в течение всего периода времени $N_c = 248$ суток.

Важно также отметить, что во всех рассмотренных случаях энергия в накопителе часто достигает ограниченного значения \bar{Q}_n^* , а суточное потребление энергии топлива практически всегда меньше потребного количества энергии $\bar{q}_{\text{потр}}$.

Влияние емкости накопителя электроэнергии и случайного характера изменения скорости ветра на относительную долю топлива

Таблица 5

Table 5

Influence of the storage capacity and the random nature of the wind speed on the relative share of fuel

$\mathcal{E}_{T\text{топл}} / \mathcal{E}_{T\text{ВЭУ}}$ при условии $\mathcal{E}_{T\text{ВЭУ}} = Q_{T\text{потр}}$				
Вариант ветра	$\bar{Q}_n^* = 3,11 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$	$\bar{Q}_n^* = 21,77 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$	$\bar{Q}_n^* = 93,33 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$	$\bar{Q}_n^* = \bar{Q}_{n\text{max}}$ кВт·ч/м ²
исходный	0,365	0,242	0,149	0
1 вариант	0,364	0,253	0,168	0,168
2 вариант	0,360	0,230	0,053	0,039
3 вариант	0,368	0,250	0,228	0,227

Таким образом, ограниченность объема накопителя электроэнергии неизбежно приводит к неполному использованию энергии ветра даже при выполнении условия $Q_{T\text{потр}} = \mathcal{E}_{T\text{ВЭУ}}$. Неиспользованная энергия ветра должна компенсироваться энергией топлива для дизель-генератора.

Напомним, что при выполнении условия $\mathcal{E}_{T\text{ВЭУ}} = Q_{T\text{потр}}$ относительная величина энергии топлива $\mathcal{E}_{T\text{топл}} / \mathcal{E}_{T\text{ВЭУ}}$ не зависит от потребного количества энергии $Q_{T\text{потр}}$. Поэтому влияние объема накопителя электроэнергии и случайного характера изменения скорости ветра $V_{\text{сут}}(i)$ на долю энергии используемого топлива можно проанализировать на примере изменения этой величины. В табл. 5 и на рис. 16 показано влияние этих факторов на относительную долю топлива, которое компенсирует неиспользуемую энергию ветра.

На основании таблицы и графиков можно сделать следующие заключения.

С увеличением объема накопителя электроэнергии относительная доля энергии топлива уменьшается. При этом за исключением исходного распределения скорости $V_{\text{сут}}(i)$ при объеме накопителя $\bar{Q}_n^* = 93,33 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ необходимое количество энергии топлива почти такое же, как и при объеме накопителя $\bar{Q}_n^* = \bar{Q}_{n\text{max}}$, и влияние случайности распределения скорости ветра $V_{\text{сут}}(i)$ почти такое же, как и при значении $\bar{Q}_n^* = \bar{Q}_{n\text{max}}$.

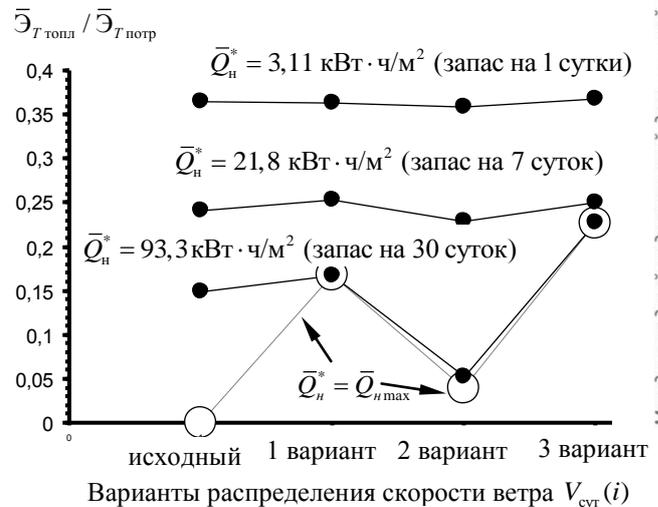


Рис. 16 – Влияние емкости накопителя электроэнергии и случайного характера изменения скорости ветра на относительную долю топлива

Fig. 16 – Influence of the storage capacity and the random nature of the wind speed on the relative share of fuel

С уменьшением объема накопителя электроэнергии влияние случайного характера изменения скорости ветра $V_{\text{сут}}(i)$ снижается, и при значениях $\bar{Q}_n^* = 3,11 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ и $\bar{Q}_n^* = 21,77 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ им можно пренебречь. В этих случаях относительная доля энергии топлива может составлять около 25 ÷ 37 %.



4. Заключение

Решение задачи формирования облика автономной энергосистемы гарантированного электроснабжения с преимущественным использованием энергии ветра требует детального представления об энергетических характеристиках ветра. Данная работа была основана на положении о том, что в природных условиях на циклических промежутках времени с повторяющимися условиями скорость ветра является случайной функцией времени $V_x(t)$. Для конкретных расчетов и анализа были использованы результаты измерений скорости ветра на юге Европейской части России в течение 8 месяцев на разных высотах с дискретностью 10 мин. В предположении о постоянной величине суточной потребляемой энергии рассмотрены соотношения энергии, выработанной ВЭУ, дизель-генератором, накопленной в аккумуляторе и потребленной за каждые сутки рассмотренного периода. Для максимального использования энергии ветра было принято, что за весь период ВЭУ интегрально производит потребное количество энергии.

Для обобщения результатов и их дальнейшей экстраполяции на другие ветровые условия рассматриваются относительные величины потребной энергии и произведенной энергии ВЭУ в сутки, приведенные к единице ометаемой площади ветроколеса. Без потери общности по объему потребной энергии энергетический баланс между элементами энергосистемы гарантированного электроснабжения с преимущественным использованием энергии ветра можно исследовать путем сравнения суточной относительной энергии ВЭУ $\bar{q}_{ВЭУ}(i)$ и постоянного значения потребной энергии $\bar{q}_{потр}$. При этом на практике часто оказывается, что суточная и месячная производительности ВЭУ являются случайными величинами, и баланс необходимой и располагаемой энергии на коротких промежутках времени не выполняется.

На основе указанных предположений были рассмотрены следующие случаи:

1. *Работа ВЭУ с дизель-генератором при естественном для автономной ВЭУ условии ограничения ежесуточной потребляемой энергии.* Были проведены расчеты и анализ влияния средней за период скорости ветра на энергетические характеристики системы (ВЭУ + дизель-генератор). При этом было исследовано поведение указанной системы как источника энергии для потребителя на четырех различных реализациях исходной последовательности скорости ветра. Показано, что при ограниченной величине потребной энергии и равенстве выработанной энергии от ВЭУ за весь период этой потребной энергии ($Q_{Тпотр} = \mathcal{E}_{ТВЭУ}$) случайный характер изменения скорости ветра по времени $V_{сут}(i)$ при постоянном значении средней скорости за период $V_{ср}$ не влияет на соотношение используемой и неиспользуемой потребителем энергии ветра за весь период и коли-

чество энергии, которое должен выработать дизель-генератор. А неполное использование энергии ветра в каждые сутки связано только с ограничением суточного потребления электроэнергии, выработанной автономной ВЭУ.

Показано также, что с увеличением средней скорости за период $V_{ср}$ для получения потребной энергии необходим не только меньший размер ветроколеса ВЭУ, но и меньшая мощность генератора W_G . С первого взгляда этот результат кажется неверным, так как при традиционном проектировании ВЭУ для местностей с большей средней скоростью обычно используется большая мощность генератора. Однако на основе проведенных расчетов и анализа получено, что при ограниченной потребной энергии на рассмотренных последовательностях среднесуточной скорости ветра при большой средней скорости $V_{ср}$ ВЭУ с меньшим значением мощности генератора и меньшим радиусом ветроколеса использует энергию ветра более эффективно, чем ветроустановка с большими значениями мощности генератора и радиуса ветроколеса при меньшей средней скорости ветра.

2. *Работа энергосистемы (ВЭУ + накопитель электроэнергии + дизель-генератор).* Аналогично предыдущему случаю был рассчитан ежесуточный энергетический баланс данной системы при различных последовательностях изменения среднесуточной скорости ветра и рассмотрено влияние случайности изменения скорости ветра по времени на распределение энергии в элементах системы. Здесь, помимо относительной производительности и относительной потребной энергии, вводится понятие относительной емкости накопителя путем нормирования фактической емкости на площадь ветроколеса.

В работе было показано, что с увеличением средней скорости $V_{ср}$ при заданном объеме потребной энергии, которое в целом за период покрывается выработкой ВЭУ $Q_{Тпотр} = \mathcal{E}_{ТВЭУ}$, максимальная размерная емкость накопителя уменьшается. Кроме того, оказалось, что даже при выполнении условия $Q_{Тпотр} = \mathcal{E}_{ТВЭУ}$ и наличии накопителя электроэнергии максимальной емкости $\bar{Q}_н = \bar{Q}_{нmax}$ вероятны случаи, когда гарантированное электроснабжение можно обеспечить только за счет дизель-генератора. Далее было рассмотрено влияние ограниченности объема накопителя электроэнергии на энергетические характеристики системы (ВЭУ + накопитель электроэнергии + дизель-генератор). На основе проведенных расчетов и построенных диаграмм произведенной, потребленной и накопленной энергии показано, что ограниченность объема накопителя электроэнергии неизбежно приводит к неполному использованию энергии ветра даже при выполнении условия $Q_{Тпотр} = \mathcal{E}_{ТВЭУ}$. Неиспользованная энергия ветра должна компенсироваться энергией топлива для дизель-генератора. С уменьшением объема накопителя энер-



гии влияние случайного характера изменения скорости ветра $V_{\text{сут}}(i)$ снижается, и при некоторых значениях относительной емкости им можно пренебречь.

Анализ последовательностей скоростей ветра, осредненных за часовые и более короткие интервалы времени, по апробированным в данной работе алгоритмам позволит оценить возможность и необходимость введения гибридных накопителей (например, комплекса «АКБ – суперконденсатор») в состав автономных ветродизельных установок для гарантированного энергоснабжения и поддержания качества электроэнергии.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-08-01233.

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 16-08-01233.

Список литературы

- [1] Real-time demand response [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.hydro.com.au/documents/Energy/King_Island_Renewable_Energy_PK_2008.pdf. – Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 17.06.2018).
- [2] Elhadidy, M.A. Optimal sizing of battery storage for hybrid (wind + diesel) power systems / M.A. Elhadidy, S.M. Shaahid // International Journal of Renewable Energy. – 1999. – Vol. 18. – No. 1. – P. 77–86.
- [3] Protogeropoulos, C. Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage / C. Protogeropoulos, B.J. Brinkworth, R.H. Marshall // International Journal of Energy Review. – 1997. – Vol. 21. – P. 465–479.
- [4] Chauhann, A. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 99–120.
- [5] Bernal-Agustin, J.L. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems / J.L. Bernal-Agustin, R. Dufo-Lopez // Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol. 13. – P. 2111–2118.
- [6] Paliwal, P. Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using particle swarm optimization / P. Paliwal, N.P. Patidar, R.K. Nema // Renew Energy. – 2014. – Vol. 63. – P. 194–204.
- [7] Askarzadeh, A. A discrete chaotic harmony search-based simulated annealing algorithm for optimum design of PV/wind hybrid system / A. Askarzadeh // Sol Energy. – 2013. – Vol. 97. – P. 93–101.
- [8] Merei, G. Optimization of an off-grid hybrid PV–wind–diesel system with different battery technologies using genetic algorithm / G. Merei, C. Berger, D.U. Sauer // Sol. Energy. – 2013. – Vol. 97. – P. 460–473.
- [9] Fadaee, M. Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using

evolutionary algorithms: A review / M. Fadaee, M.A.M. Radzi // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2012. – Vol. 16. – No. 5. – P. 3364–3369.

[10] Gupta, A. Steady-state modeling of hybrid energy system for off grid electrification of cluster of villages / A. Gupta [et al.] // Renew. Energy. – 2010. – Vol. 35. – P. 520–535.

[11] Li, C.-H. Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology / C.-H. Li [et al.] // Renew. Energy. – 2009. – Vol. 32. – No. 3. – P. 815–826.

[12] Khatod, D. Analytical approach for well-being assessment of small autonomous power system with solar and wind energy sources / D. Khatod, V.K. Pant, J. Sharma // IEEE Trans Energy Convers. – 2010. – Vol. 25. – No. 2. – P. 535–545.

[13] Обухов, С.Г. Методика выбора ветроэнергетических установок малой мощности / С.Г. Обухов, М.А. Сурков, З.П. Хошнау // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2011. – № 2. – С. 25–30.

[14] Lujano-Rojas, J.M. Probabilistic modeling and analysis of stand-alone hybrid power systems / J.M. Lujano-Rojas, R. Dufo-López, J.L. Bernal-Agustín // Energy. – 2013. – Vol. 63. – P. 19–27.

[15] Connolly, D. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems / D. Connolly [et al.] // Appl. Energy. – 2010. – Vol. 87. – No. 4. – P. 1059–1082.

[16] Sinha, S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems / S. Sinha, S.S. Chandel // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2014. – Vol. 32. – P. 192–205.

[17] HOMER Energy/ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.homerenergy.com>. Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 20.07.2018).

[18] Manwell, J. Hybrid2 Theory Manual / J. Manwell [et al.]. – University of Massachusetts, Dept. of Mechanical Engineering, 1998.

[19] Хошнау, З.П. Методика выбора ветроэлектростанции по функции распределения вейбулла и определение экономической эффективности инвестиционного проекта / З.П. Хошнау // Сборник трудов международной научнотехнической конференции «IV чтения Ш. Шокина» I том. – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2010. – 284 с.

[20] Tai-Her Yeh. A Study on Generator Capacity for Wind Turbines Under Various Tower Heights and Rated Wind Speeds Using Weibull Distribution / Tai-Her Yeh, Li Wang // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2008. – Vol. 23. – No. 2. – P. 592–602.

[21] Игнатъев, С.Г. Новые методы оценки энергии ветра и оптимизации параметров ветроэнергетических установок / С.Г. Игнатъев. – Москва: Шанс, 2016. – 631 с.

[22] Чемяков, В.В. Анализ ветрового режима и моделирование работы ветроэлектрической установкой в условиях Черноморского побережья Краснодарского края / В.В. Чемяков // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAE). 2011. – № 12. – С. 49–55.



[23] Старков, А.Н. Атлас ветров России / А.Н. Старков [и др.]. – М.: Изд. «Можайск-Терра», 2000. – 201 с.

[24] Николаев, В.Г. Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения / В.Г. Николаев, С.В. Ганага, Ю.И. Кудряшов. – М.: «Атмограф» 2008. 581 с.

References

[1] Real-time demand response. Available on: http://www.hydro.com.au/documents/Energy/King_Island_Renewable_Energy_PK_2008.pdf. (06.17.2018).

[2] Elhadidy M.A., Shaahid S.M. Optimal sizing of battery storage for hybrid (wind + diesel) power systems. *International Journal of Renewable Energy*, 1999;18(1):77–86.

[3] Protogeropoulos C., Brinkworth B.J., Marshall R.H. Sizing and techno-economical optimization for hybrid solar photovoltaic/wind power systems with battery storage. *International Journal of Energy Review*, 1997;21:465–479.

[4] Chauhan A., Saini R.P. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014;38:99–120.

[5] Bernal-Agustin J.L., Dufo-Lopez R. Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Sustainable Energy Reviews*, 2009;13:2111–2118.

[6] Paliwal P, Patidar N.P., Nema R.K. Determination of reliability constrained optimal resource mix for an autonomous hybrid power system using particle swarm optimization. *Renew Energy*, 2014;63:194–204.

[7] Askarzadeh A. A discrete chaotic harmony search-based simulated annealing algorithm for optimum design of PV/wind hybrid system. *Sol. Energy*, 2013;97: 93–101.

[8] Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV–wind– diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Sol. Energy*, 2013;97:460–473.

[9] Fadaee M., Radzi M.A.M. Multi-objective optimization of a stand-alone hybrid renewable energy system by using evolutionary algorithms: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2012;16(5):3364–3369.

[10] Gupta A., Saini R.P., Sharma M.P. Steady-state modeling of hybrid energy system for off grid electrification of cluster of villages. *Renew. Energy*, 2010;35:520–535.

[11] Li C.-H., Zhu X.-J., Cao G.-Y., Sui S., Hu M.R. Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology. *Renew Energy*, 2009;32(3):815–826.

[12] Khatod D., Pant V.K., Sharma J. Analytical approach for well-being assessment of small autonomous power system with solar and wind energy sources. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2010;25(2):535–545.

[13] Obukhov S.G., Surkov M.A., Khoshnau Z.P. Method of selection of low-power wind power plants (Metodika vybora vetroenergeticheskikh ustanovok maloy

moshchnosti). *Electro. Electrical engineering, electric power industry, electrical industry (Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost')*, 2011;(2):25–30 (in Russ.).

[14] Lujano-Rojas J.M., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Probabilistic modeling and analysis of stand-alone hybrid power systems. *Energy*, 2013;63:19–27.

[15] Connolly D., Lund H., Mathiesen B.V., Leahy M. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Appl. Energy*, 2010;87(4):1059–1082.

[16] Sinha S., Chandel S.S. Review of software tools for hybrid renewable energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2014;32:192–205.

[17] HOMER Energy/ [Электронный ресурс] <http://www.homerenergy.com>. Заглавие с экрана. – (Дата обращения: 07. 20.2018).

[18] Manwell J., Rogers A., Hayman G., Avelar C., McGowan J. Hybrid2 Theory Manual. University of Massachusetts, Dept. of Mechanical Engineering, 1998.

[19] Khoshnau Z.P. Methods of choosing a wind power plant based on the Weibull distribution function and determining the economic efficiency of an investment project (Metodika vybora vetroelektrostantsii po funktsii raspredeleniya veybulla i opredeleniye ekonomicheskoy effektivnosti investitsionnogo proyekta). Proceedings of the international scientific and technical conference “IV reading of Sh. Shokin”, Vol. I. Pavlodar: PSU named. S. Toraigyrov, 2010; 284 p. (in Russ.).

[20] Tai-Her Yeh, Li Wang. A Study on Generator Capacity for Wind Turbines Under Various Tower Heights and Rated Wind Speeds Using Weibull Distribution. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008;23(2):592–602.

[21] Ignatiev S.G. New methods for estimating wind energy and optimizing parameters of wind power plants (Novyye metody otsenki energii vetra i optimizatsii parametrov vetroenergeticheskikh ustanovok). M.: Izd. “Chance” Publ., 2016; 631 p. (in Russ.).

[22] Chemekov V.V. Analysis of the wind regime and modeling of the wind power installation in the conditions of the Black Sea coast of the Krasnodar Territory (Analiz vetrovogo rezhima i modelirovaniye raboty vetroelektricheskoy ustanovkoy v usloviyakh Chernomorskogo poberezh'ya Krasnodarskogo kraya). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2011;12:49–55 (in Russ.).

[23] Starkov A.N., Landberg L., Bezrukikh P.P., Borisenko M.M. Atlas of Russian Winds (Atlas ветров России). Moscow: Izd. Mozhaisk-Terra Publ., 2000; 201 p. (in Russ.).

[24] Nikolaev V.G., Ganaga S.V., Kudryashov Yu.I. National cadastre of Russia wind energy resources and the methodological bases of their definition (Natsional'nyy kadastr vetroenergeticheskikh resursov Rossii i metodicheskiye osnovy ikh opredeleniya). Moscow: “Atmograp” Publ., 2008; 581 p. (in Russ.).

Транслитерация по BSI

