

## АНАЛИЗ РЕЖИМОВ РАБОТЫ НАКОПИТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ\*

*С.Г. Обухов<sup>1</sup>, И.А. Плотников<sup>1</sup>, В.Г. Масолов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
д. 30, пр. Ленина, Томск, 634050, Россия

тел.: +7 (3822) 60-63-33

<sup>2</sup>ООО «ВДМ-техника»

стр. 1, дом 23а, ул. Долгоруковская, Москва, 127006, Россия

тел.: +7 (3822) 56-35-01; e-mail: serob99@mail.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.055-067

Заключение совета рецензентов: 03.05.18 Заключение совета экспертов: 08.05.18 Принято к публикации: 15.05.18

Представлены результаты сравнительного анализа режимов работы автономного гибридного энергетического комплекса с накопителем энергии и без накопителя. Предложена методика определения энергетических характеристик основных компонентов гибридного энергетического комплекса: потребителей электроэнергии, ветроэнергетических и фотоэлектрических установок, – построены их имитационные модели.

Установлено, что для компенсации сезонных колебаний мощности в автономных энергетических системах с возобновляемыми источниками энергии требуются накопительные устройства емкостью на десятки МВт·ч, способные обеспечивать хранение энергии длительностью до полугода, что позволит отказаться от накопительных устройств для сглаживания сезонных колебаний энергетического баланса.

Результаты анализа суточного энергетического баланса гибридной электростанции показали, что применение накопителей энергии для сглаживания суточных колебаний мощности в локальных энергосистемах является технически реализуемой задачей, обеспечивающей значительное повышение их энергетической эффективности. Анализ режимов работы накопителей энергии продемонстрировал, что для запаса и выдачи энергии на временных интервалах продолжительностью в несколько часов не требуются накопительные устройства с относительно высокими значениями зарядной и разрядной мощности, то есть для реализации функций сглаживания суточных пиков избытка и дефицита мощности можно использовать свинцово-кислотные аккумуляторные батареи глубокого разряда.

Определено, что в зарядно/разрядных токах накопителя энергии неизбежны низкочастотные и высокочастотные пульсации большой амплитуды, обусловленные изменениями выходной мощности установок возобновляемой энергетики и нагрузки. И если низкочастотные пульсации (период десятки минут) могут частично демпфироваться за счет ограничения максимального зарядного тока аккумуляторных батарей, то устранить высокочастотные пульсации (период десятки секунд) в энергетических системах с единственным накопителем энергии принципиально невозможно.

Установлено, что наилучшим образом требованиям автономных энергетических комплексов с возобновляемыми источниками энергии соответствует комбинированный накопитель энергии, имеющий характеристики аккумулятора в режимах приема и выдачи мощности на суточных временных интервалах и обладающий свойствами суперконденсатора в режимах приема и отдачи импульсов мощности на секундных отрезках времени.

Ключевые слова: гибридные энергетические системы; накопители энергии; аккумуляторная батарея; суперконденсатор.

\* Обухов С.Г., Плотников И.А., Масолов В.Г. Анализ режимов работы накопителей энергии в автономных гибридных электростанциях с возобновляемыми источниками энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):55-67.



## THE ANALYSIS OF OPERATION MODES OF ENERGY STORES IN AUTONOMOUS HYBRID POWER PLANTS WITH RENEWABLE ENERGY RESOURCES

*S.G. Obukhov<sup>1</sup>, I.A. Plotnikov<sup>1</sup>, V.G. Masolov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University  
30 Lenin Av., Tomsk, 634050, Russia

tel.: +7 (3822) 60 63 33

<sup>2</sup>“VDM-tehnika” LLC

23a/1 Dolgorukovskaya St., Moscow, 127006, Russia

tel.: +7 (3822) 56 35 01; e-mail: serob99@mail.ru

doi: 10.15518/isjeee.2018.13-15.055-067

Referred 3 May 2018 Received in revised form 8 May 2018 Accepted 15 May 2018

The paper presents the results of the comparative analysis of operation modes of an autonomous hybrid power complex with/without the energy store. We offer the technique which defines the power characteristics of the main components of a hybrid power complex: the consumers of the electric power, wind power and photo-electric installations (the last ones have been constructed). The paper establishes that, in order to compensate the seasonal fluctuations of power in autonomous power systems with renewable energy resources, the accumulative devices are required, with a capacity of tens of MWh including devices that are capable to provide energy storage with duration about half a year. This allows abandoning the storage devices for smoothing the seasonal fluctuations in the energy balance.

The analysis of operation modes of energy stores has shown that for a stock and delivery of energy on time intervals, lasting several hours, the accumulative devices with rather high values of charging and digit power aren't required. It allows using the lead-acid rechargeable batteries of the deep category for smoothing the daily peaks of surplus and a capacity shortage. Moreover, the analysis of operation modes of energy stores as a part of the hybrid complexes has demonstrated that in charging/digit currents of the energy store the low-frequency and high-frequency pulsations of big amplitude caused by changes of size of output power of the renewable power installations and loading are inevitable. If low-frequency pulsations (the period of tens of minutes) can partially be damped due to the restriction of size of the maximum charging current of rechargeable batteries, then it is essentially impossible to eliminate high-frequency pulsations (the period of tens of seconds) in the power systems with the only store of energy. The paper finds out that the combined energy store having characteristics of the accumulator in the modes of receiving and delivery of power on daily time intervals, and at the same time having properties of the supercondenser in the modes of reception and return of impulses of power on second intervals of time is best suited to requirements of the autonomous power complexes with renewable energy resources.

Keywords: hybrid energy systems; energy storage; battery; supercapacitor.



*Сергей Геннадьевич Обухов*  
*Sergey Obukhov*

**Сведения об авторе:** д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа энергетика.

**Образование:** Томский политехнический университет (1985 г.).

**Область научных интересов:** энергетика; возобновляемая энергетика.

**Публикации:** более 100.

*h*-index: РИНЦ – 7, Scopus – 3.

**Information about author:** D.Sc. in Engineering, Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering School of Energy.

**Education:** Tomsk Polytechnic University, 1985.

**Research interest:** energy, renewable energy.

**Publications:** more than 100.



*Игорь Александрович Плотников*  
*Igor Plotnikov*

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Инженерная школа энергетика.

**Образование:** Томский политехнический университет (1984 г.).

**Область научных интересов:** энергетика; возобновляемая энергетика; силовая электроника.

**Публикации:** 79.

*h*-index: РИНЦ – 5, Scopus – 4.

**Information about author:** Ph.D. in Engineering, Assistant Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, Engineering School of Energy

**Education:** Tomsk Polytechnic University, 1984.

**Research interest:** energy; renewable energy; power electronics.

**Publications:** 79.



Владимир Геннадьевич Масолов  
Vladimir Masolov

**Сведения об авторе:** канд. техн. наук, генеральный директор ООО «ВДМ-техника».

**Образование:** Московский горный институт (1983 г.).

**Область научных интересов:** возобновляемая энергетика; ветроэнергетика.

**Публикации:** 8.

**Information about author:** Ph.D. in Engineering, General Manager of "VDM-tekhnika" LLC (Moscow).

**Education:** Moscow Mining University, 1983.

**Research interest:** renewable energy; wind power engineering.

**Publications:** 8.

## 1. Введение

Одним из способов повышения энергетической эффективности систем децентрализованного электроснабжения является использование в энергетическом балансе регионов возобновляемых источников энергии (ВИЭ). С учетом того, что мощность, генерируемая установками ВИЭ, крайне изменчива во времени, а потребителям необходимо гарантировать бесперебойную подачу электроэнергии, перспективным вариантом построения автономных энергетических систем являются гибридные электростанции (ГС), включающие в себя дизель-генераторные установки (ДГУ) и энергетические установки на базе ВИЭ [1, 2].

Важным элементом большинства ГС, особенно с высоким уровнем замещения органического топлива, является накопитель энергии (НЭ), применение которого позволяет повысить энергетическую эффективность электростанции за счет аккумуляции излишков энергии в периоды ее избытка, и отдачи

потребителю в периоды дефицита. Актуальной проблемой проектирования ГС является определение рационального типа и емкости накопительного устройства [3, 4]. Сложность данной задачи обусловлена тем, что текущие значения выходной электрической мощности генерирующих источников могут изменяться в широком диапазоне, а характер их изменений имеет стохастическую природу. Определить рациональный тип и емкость НЭ позволяет анализ их режимов работы.

Данное исследование посвящено анализу режимов работы накопителей энергии. В работе предложена методика анализа рабочих режимов изолированных ГС с ВИЭ, впервые выполнен детальный анализ режимов работы НЭ в составе таких электростанций. Кроме того, установлены технические требования к эксплуатационным характеристикам НЭ, обоснована необходимость применения в составе ГС с ВИЭ комбинированных НЭ на основе аккумуляторных батарей и суперконденсаторов.

Список обозначений	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
$\eta$	коэффициент полезного действия, о.е.
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
$A$	Площадь, м <sup>2</sup>
$C, K$	Постоянные коэффициенты
$G$	Солнечная радиация, кВт/м <sup>2</sup>
$H$	Солнечная инсоляция, кВт·ч/м <sup>2</sup>
$N$	Число дней, модулей
$P$	Мощность, кВт
$T$	Температура, °С, °К
$V$	Скорость ветра, м/с
$W$	Энергия, кВт·ч
<i>Индексы нижние</i>	
$AB$	Аккумуляторная батарея
$ave$	Среднее значение
$conv$	Конвертер
$FF$	Коэффициент заполнения (фулфактор)
$FM$	Фотомодуль
$load$	Нагрузка
$min$	Минимум
$max$	Максимум
$nom$	Номинальное значение
$PV$	Фотоэлектрическая установка
$sRES$	Замещение возобновляемой энергией
$WT$	Ветроэнергетическая установка
$WW$	Ветроколесо

Аббревиатуры	
DOD	Допустимая глубина разряда
SOC	Остаточная емкость
АБ	Аккумуляторная батарея
ВИЭ	Возобновляемые источники энергии
ВЭУ	Ветроэнергетическая установка
ГС	Гибридная электростанция
ДГУ	Дизель-генераторная установка
НЭ	Накопитель энергии
СБ	Солнечная батарея
ФМ	Фотоэлектрический модуль
ФЭУ	Фотоэлектрическая установка

## 2. Теоретическая часть

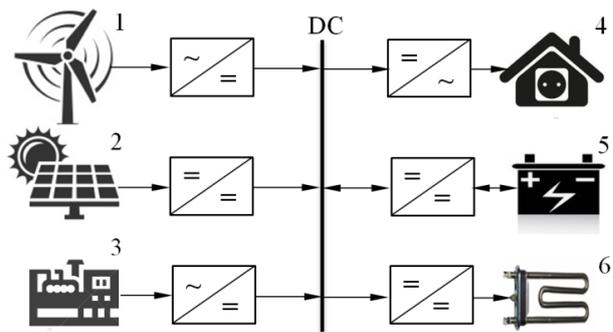
Выбору рационального типа и емкости НЭ для ГС с ВИЭ посвящено множество научных работ. Как правило, выбор параметров НЭ осуществляется в рамках многопараметрической оптимизации состава оборудования ГС по критериям минимума затрат, эксплуатационной надежности, требуемому уровню замещения топлива, эмиссии выхлопных газов. Для решения задачи на основе анализа энергетического баланса в электростанции на продолжительных интервалах времени (обычно год) используются: специализированное программное обеспечение [5, 6], классические алгоритмы оптимизации [7, 8], метаэвристические методы на базе генетических алгоритмов [9, 10], алгоритмы роя частиц [11, 12] и др.

Подробный обзор научных исследований, касающихся выбора оптимального состава оборудования ГС с ВИЭ, представлен в работе [13]. Другие технические аспекты применения и эксплуатации НЭ в составе ГС с ВИЭ рассмотрены в работах [14–17]. В статье [14] разобраны основные технические характеристики НЭ и определены перспективные типы для аккумулирования энергии на разных временных интервалах. Оценка влияния емкости НЭ на расход дизельного топлива в изолированной энергетической системе на основе анализа годового баланса мощности выполнена в работе [15]. Суточный баланс мощности и влияние емкости НЭ на расход топлива и эмиссию выхлопных газов оценены в работе [16]. Подробный анализ потоков мощности в автономной электростанции с количественной оценкой потерь энергии дан в работе [17].

Представленные методы и результаты исследований позволяют выбрать НЭ для эксплуатации в составе ГС с ВИЭ, однако в перечисленных исследованиях не рассматривается анализ рабочих режимов НЭ, что не позволяет установить технические требования к эксплуатационным характеристикам НЭ по приему и выдаче мощности для различных интервалов времени. Определение этих требований является необходимым условием разработки эффективных систем накопления энергии для ГС с ВИЭ, обеспечивающих повышение их надежности и технико-экономической эффективности.

## 3. Постановка задачи

В качестве объекта исследований в настоящей работе рассматривалась условная гибридная электростанция, территориально расположенная в районе г. Томска с географическими координатами 56.5° с.ш., 85° в.д. Типовая структурная схема электростанции с сопряжением генерирующих установок на шине постоянного тока (DC) показана на рис. 1.



**Рис. 1** – Типовая структурная схема гибридной электростанции с ВИЭ: 1 – ветроэнергетическая установка; 2 – фотоэлектрическая установка; 3 – дизель-генераторная установка; 4 – потребитель электроэнергии; 5 – накопитель энергии; 6 – балластная нагрузка

**Fig. 1** – The standard block diagram of a hybrid power plant with renewable energy sources: 1 – wind turbine; 2 – PV systems; 3 – diesel generator set; 4 – electricity consumer; 5 – energy storage; 6 – dump load

В состав электростанции входят ДГУ, ветроэнергетические (ВЭУ) и фотоэлектрические (ФЭУ) установки, а также балластная нагрузка, подключенные к сборной шине через соответствующие преобразователи. Потребитель электроэнергии подключается к шине через автономный инвертор напряжения, а накопитель энергии, представляющий собой аккумуляторную батарею (АБ), – через реверсивный преобразователь.

Электростанция предназначена для электроснабжения коммунально-бытовых потребителей с суточным максимумом электрических нагрузок в январе  $P_{max} = 5$  кВт. С помощью методики [18] были построены характерные суточные графики электрических нагрузок с часовой дискретизацией для каждого месяца года и определен годовой объем потребляемой электроэнергии, который составил  $W_{load} = 28$  МВт·ч.

В качестве исходных данных для определения энергетических характеристик рассматриваемой электростанции использовались статистические данные о средней скорости ветра  $V_{ave}$ , температуре окружающего воздуха  $T$  и среднесуточной инсоляции  $H$  из базы данных космического агентства США NASA SSE [19] за 22-х летний период наблюдений (табл. 1).

Таблица 1

Значения средней скорости ветра, интенсивности солнечной радиации и температуры окружающего воздуха в г. Томске по данным NASA SSE [19]

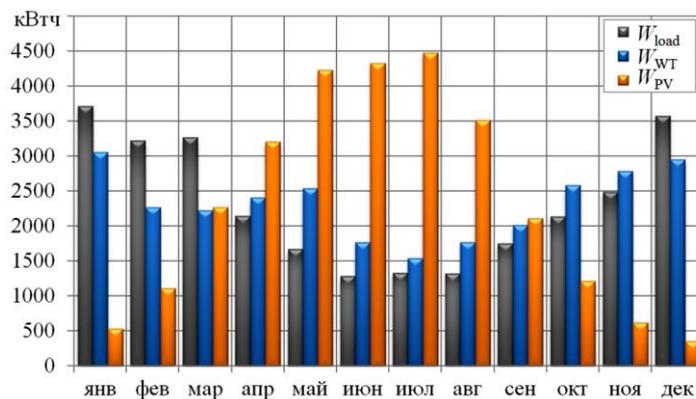
Table 1

The values of average wind speed, intensity of solar radiation and the air temperature in Tomsk according to NASA SSE [19]

Месяц	$V_{ave}$ , м/с	$H$ , кВт·ч/м <sup>2</sup>	$T$ , °С
январь	3,49	0,69	-16,2
февраль	3,27	1,59	-14,5
март	3,14	2,94	-8,88
апрель	3,26	4,29	-0,99
май	3,28	5,48	11,1
июнь	2,94	5,79	17,1
июль	2,78	5,80	20,3
август	2,91	4,55	16,7
сентябрь	3,07	2,83	8,99
октябрь	3,30	1,58	1,19
ноябрь	3,42	0,83	-9,33
декабрь	3,45	0,46	-15,0

Задача исследования заключалась в определении требований к накопительным устройствам по объемам запасаемой энергии, режимам приема и отдачи мощности на продолжительных (месяцы, год), средних (часы, сутки) и коротких (секунды, минуты) интервалах времени.

**Рис. 2** – Гистограммы годового энергетического баланса гибридной электростанции с ВИЭ, территориально расположенной в г. Томске  
**Fig. 2** – Histograms of an annual power balance of a hybrid power plant territorially located in Tomsk



Расчеты показали, что для полного покрытия потребляемой за год энергии для данной электростанции необходимо использовать или 14 ВЭУ номинальной мощностью 5 кВт, или 110 ФМ мощностью 260 Вт. Однако, даже в этом случае, не будет никакой гарантии надёжного электроснабжения потребителей только от установок ВИЭ, так как объемы генерируемой и потребляемой энергии значительно

## 4. Экспериментальная часть

### 4.1. Анализ годового энергетического баланса

Определим годовой энергетический баланс в гибридной электростанции при условии равенства объемов электроэнергии, отпущенной потребителю  $W_{load}$  и выработанной фотоэлектрическими  $W_{PV}$  и ветроэнергетическими  $W_{WT}$  установками (кВт·ч):

$$W_{load} = W_{PV} = W_{WT} . \quad (1)$$

Для расчёта общего количества электроэнергии, генерируемой ВЭУ в течение года, используем эмпирическое выражение [20]:

$$W_{WT} = \sum_{i=1}^{12} 2,92 \cdot 10^{-4} \cdot A_{WW} \cdot T_i \cdot V_{ave,i}^3, \quad (2)$$

где  $A_{WW}$  – площадь ветроколеса, м<sup>2</sup>;  $T_i$  – число часов эксплуатации ВЭУ в  $i$ -том месяце года;  $V_{ave,i}$  – среднемесячная скорость ветра в  $i$ -том месяце года, м/с.

Годовой объем электроэнергии, вырабатываемый ФЭУ, определяется по уравнению [21]:

$$W_{PV} = \sum_{i=1}^{12} H_i \cdot \eta \cdot A_{PV} \cdot N_i, \quad (3)$$

где  $H_i$  – среднесуточная интенсивность солнечной радиации в  $i$ -том месяце года, кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $\eta$  – общий коэффициент полезного действия солнечной батареи с преобразователями (в расчетах принят равным 0,14);  $A_{PV}$  – площадь солнечной батареи, м<sup>2</sup>;  $N_i$  – число дней эксплуатации ФЭУ в  $i$ -том месяце года.

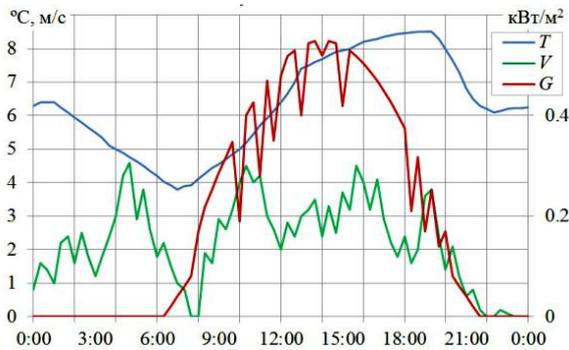
Расчетный годовой энергетический баланс гибридной электростанции при принятых условиях показан на рис. 2.

различаются по месяцам года. Например, для ФЭУ максимальное значение генерируемой энергии наблюдается в июле и составляет 4,5 МВт·ч, что практически в 3,5 раза превышает объем энергии, потребляемой нагрузкой в данном месяце. Максимальный дефицит энергии ФЭУ имеется в декабре и составляет 3,2 МВт·ч, то есть около 90 % от требуемого объема. Совместное использование в составе

электростанции ВЭУ и ФЭУ позволяет улучшить ситуацию по объемам избытка и дефицита энергии по сезонам года, но полностью проблему не решает. Для полного сглаживания сезонных колебаний потребляемой и вырабатываемой энергии для данной электростанции требуется НЭ емкостью около 10 МВт·ч, способный обеспечить хранение энергии в течение полугода. Но на современном этапе развития технологий применение накопителей энергии с такими характеристиками или технически невозможно, или экономически нецелесообразно [22, 23].

#### 4.2. Анализ суточного энергетического баланса

Рассматривался суточный энергетический баланс в ГС с 5-ю ВЭУ VDM-2 [24] производства ООО «ВДМ-техника» суммарной установленной мощностью 10 кВт и ФЭУ, построенной на базе 40 ФМ JAP6-60-250 [25] суммарной мощностью 10 кВт. В качестве объекта электроснабжения был принят условный потребитель с максимальной электрической нагрузкой  $P_{max} = 5$  кВт и типичным графиком электрических нагрузок децентрализованных потребителей.



**Рис. 3** – Климатические ряды изменения основных метеорологических факторов в г. Томске 9 мая 2017 года  
**Fig. 3** – Climatic change ranks of the major meteorological factors in Tomsk on May 9, 2017

Для проведения анализа привлекались данные архивов погоды за 9 мая 2017 года, полученные с сайта «Расписание погоды» [26]. На основе статистических архивных данных для этого дня года с интервалом в 20 мин были сгенерированы климатические ряды изменения основных метеорологических факторов: температуры окружающего воздуха ( $T$ , °C), скорости ветра ( $V$ , м/с) и солнечной радиации ( $G$ , кВт/м<sup>2</sup>) (рис. 3). При построении суточного хода солнечной радиации применялась методика, подробно изложенная в [27].

Вычисление текущих значений выходной электрической мощности ФЭУ осуществлялось с помощью эмпирического выражения, полученного А.Д. Jones и С.Р. Underwood и обеспечивающего хорошее совпадение с результатами экспериментальных исследований [28]:

$$P_{PV} = C_{FF} \cdot N_{FM} \cdot \eta_{conv} \cdot G \cdot \ln(10^6 \cdot G) / T_{FM}, \quad (4)$$

где  $N_{FM}$  – число фотоэлектрических модулей (ФМ) в солнечной батарее;  $C_{FF}$  – постоянный коэффициент;  $\eta_{conv}$  – КПД преобразователя с контроллером максимальной мощности;  $G$  – текущий уровень солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_{FM}$  – текущая температура ФМ, °К.

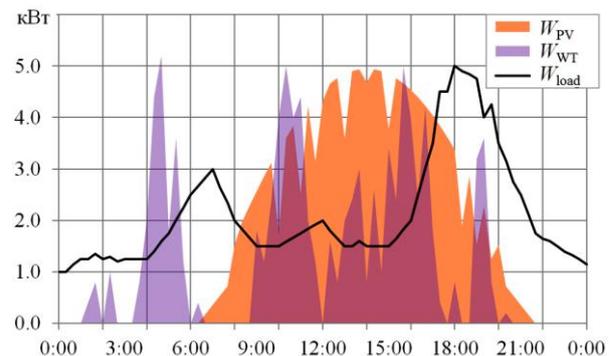
Численные значения переменных в уравнении (4) были определены по данным технической спецификации ФМ [25] с выражениями, приведенными в [29].

Для описания энергетических характеристик ВЭУ использовалась система уравнений, позволяющая определить выходную электрическую мощность по известной рабочей характеристике ВЭУ [30]:

$$P_{WT} = \begin{cases} P_{nom} \cdot \frac{V - V_{min}}{V_{nom} - V_{min}} & \text{if } V_{min} \leq V \leq V_{nom} \\ P_{nom} & \text{if } V_{nom} \leq V \leq V_{max} \\ 0 & \text{if } V < V_{min} \text{ or } V > V_{max} \end{cases} \quad (5)$$

где  $P_{nom}$  – номинальная мощность ВЭУ, заявленная производителем.

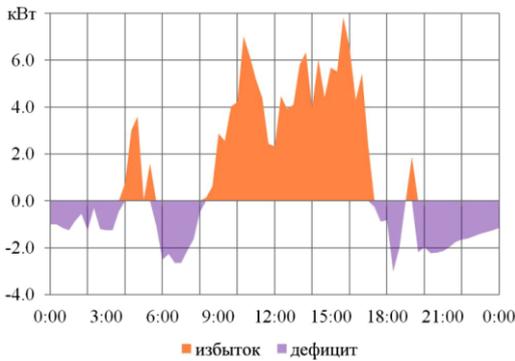
Расчетные зависимости изменения мощностей ВЭУ, ФЭУ и электрической нагрузки в течение рассматриваемого дня показаны на рис. 4.



**Рис. 4** – Расчетные зависимости изменения мощностей ВЭУ, ФЭУ и электрической нагрузки в течение суток  
**Fig. 4** – Predicted dependences of capacity change of the wind power installation, the photopower station, and electric loading within a day

На основании проведенных расчетов установлено, что генерируемая за сутки электроэнергия  $W_{WT} = 31,3$  кВт·ч,  $W_{PV} = 43,8$  кВт·ч, а значение потребленной энергии  $W_{load} = 51,3$  кВт·ч. Однако, несмотря на то что суммарная энергия, генерируемая установками ВИЭ, намного превышает потребляемую энергию, на суточном графике изменения мощностей (рис. 4) отчетливо видны временные интервалы, на которых суммарная мощность установок ВИЭ не обеспечивает полного покрытия электрической нагрузки. Расчетные диаграммы избытка и дефицита мощности электростанции без НЭ для рассматриваемых суток приведены на рис. 5.





**Рис. 5** – Суточные диаграммы избытка и дефицита мощности в гибридной электростанции без накопителя энергии  
**Fig. 5** – Daily charts of surplus and a capacity shortage in a hybrid power plant without the energy store

НЭ для данной электростанции выбирался по заданному суточному значению максимума нагрузки  $P_{\max} = 5$  кВт, при этом типичное для коммунально-бытовых потребителей значение коэффициента максимума нагрузки  $K_{\max}$  принималось равным 2,25. Среднесуточная нагрузка  $P_{\text{ave}}$  (кВт) определялась по выражению:

$$P_{\text{ave}} = \frac{P_{\max}}{K_{\max}} = \frac{5}{2,25} = 2,22. \quad (6)$$

Далее определяли необходимую емкость АБ для данной электростанции  $W_{AB}$  (кВт·ч) из условий, по которым время автономной работы от накопителя должно составлять не менее  $\Delta T = 4$  ч, а его допустимая глубина разряда  $DOD = 50\%$ :

$$W_{AB} \geq \frac{P_{\text{ave}} \cdot \Delta T}{DOD} = \frac{2,22 \cdot 4}{0,5} \geq 17,8. \quad (7)$$

Затем емкость АБ  $W_{AB}$  приняли равной 20 кВт·ч.

При выполнении оценочных энергетических расчетов для вычисления остаточной емкости АБ (SOC) использовали простую формулу без учета КПД преобразователя и саморазряда АБ:

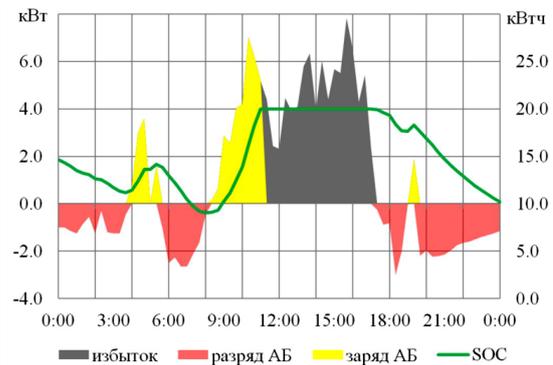
$$SOC(t + \Delta t) = SOC(t) \pm P_{AB} \cdot \Delta t, \quad (8)$$

где  $P_{AB}$  – зарядная (разрядная) мощность АБ (кВт), или мощность, которая забирается (отдается) с шины DC на интервале  $\Delta t$ .

В первом приближении рассматривался энергетический баланс в ГС с ВИЭ, которая укомплектована идеализированной АБ, способной аккумулировать все имеющиеся излишки мощности (рис. 6). Остаточная емкость АБ на начало суток принята равной 75 % от номинальной емкости  $SOC = 15$  кВт·ч.

Анализ энергетического баланса, представленного на рис. 6, показывает, что введение в состав электростанции НЭ обеспечивает повышение ее энергетической эффективности. Коэффициент замещения возобновляемой энергией на рассматриваемом суточном интервале  $K_{RES} = 1,0$ . Это означает, что все потреби-

тели данной электростанции обеспечиваются электроэнергией только за счет ВИЭ (без ДГУ).

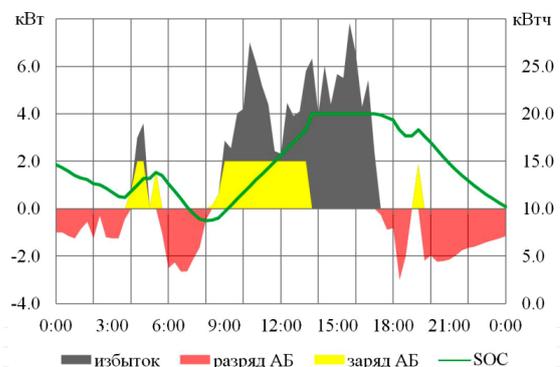


**Рис. 6** – Суточный энергетический баланс в гибридной электростанции с идеализированным накопителем энергии  
**Fig. 6** – Daily power balance in a hybrid power plant with the idealized energy store

Далее оценивались рабочие режимы НЭ с точки зрения требований к его зарядно-разрядным характеристикам. В соответствии с рис. 6 при работе накопителя в составе ГС с ВИЭ режимы заряда чередуются с режимами разряда с меняющимися в широком диапазоне значениями зарядной/разрядной мощности. Максимальная зарядная мощность в рассматриваемом примере составила более 30 % от номинальной емкости АБ, а разрядная мощность во всех режимах не превышала 15 %.

Такие значения разрядной мощности могут обеспечивать практически все типы электрохимических аккумуляторов, однако, способностью к приему относительно высоких значений зарядной мощности без существенной деградации характеристик обладают только определенные типы АБ, например литий-ионные.

Для сравнительной оценки необходимости применения в ГС с ВИЭ накопительных устройств с высокими значениями зарядной мощности следует рассмотреть энергетический баланс в электростанции, где в качестве накопителя используются свинцово-кислотные АБ (рис. 7).



**Рис. 7** – Суточный энергетический баланс в гибридной электростанции с накопителем энергии из свинцово-кислотных аккумуляторов  
**Fig. 7** – Daily power balance in a hybrid power plant with the energy store from the lead-acid accumulators

При проведении расчетов, представленных на рис. 7, максимальная зарядная мощность АБ была ограничена 10 % от их номинальной емкости, что соответствует рекомендациям производителей свинцово-кислотных АБ. В представленном энергетическом балансе (см. рис. 7) накопитель энергии на базе свинцово-кислотных АБ обеспечивает выполнение всех функций идеализированного накопителя, но при этом его стоимость будет гораздо меньшей, как и мощность реверсивного преобразователя. На временном интервале избытка мощности свинцово-кислотный накопитель успевает зарядиться до номинальной емкости, что позволяет ему также эффективно, как и идеализированному накопителю, компенсировать все режимы дефицита мощности. Относительно высокие значения саморазряда свинцово-кислотных АБ также не критичны, поскольку, если они заряжены до полной емкости, в электростанции имеется избыток мощности – в этом случае легко обеспечить для АБ режим поддерживающего заряда.

Необходимо отметить, что по окончании рассматриваемого суточного интервала остаточные емкости идеализированного и свинцово-кислотного накопителей практически одинаковы. Это свидетельствует о том, что никаких практических выгод от использования накопителя с большой зарядной мощностью в данной энергосистеме не получают.

Кроме того, нет необходимости применять в гибридных электростанциях с ВИЭ накопительные устройства, характеризующиеся высокими значениями разрядной мощности (например, литий-ионные АБ). В рассмотренных примерах максимальная разрядная мощность накопителя составила не более 15 % от его номинальной емкости, при этом в расчетах использовался накопитель относительно небольшой емкости, рассчитанный всего на 4 часа автономной работы (с увеличением емкости накопителя пропорционально растет и его разрядная мощность). С учетом того что допустимая разрядная мощность свинцово-кислотных АБ, при которой обеспечивается их максимальный жизненный цикл, не должна превышать значений 0,2 ÷ 0,3С, это условие в большинстве практических случаев будет легко выполнимо.

Таким образом, на основании результатов представленных исследований можно сделать вывод о том, что зарядно-разрядные характеристики свинцово-кислотных АБ, как правило, удовлетворяют требованиям ГС с ВИЭ по аккумулярованию и хранению энергии на средних (несколько часов) временных интервалах.

Рассмотренный энергетический баланс выполнен на примере одной конкретной электростанции в течение одних суток, однако с высокой долей уверенности можно утверждать, что он является типичным для большинства подобных энергетических систем.

Весомым аргументом в пользу данного утверждения может служить тот факт, что энергетические потенциалы ветра и солнечного излучения в большинстве случаев имеют выраженную сезонную со-

ставляющую, которая обязательно учитывается при проектировании ГС. Для хороших энергетических характеристик ГС необходимо обеспечить покрытие основной доли потребляемой энергии за счет энергии, генерируемой установками возобновляемой энергетики. В связи с этим выбор основного генерирующего оборудования ГС производят с учетом данного условия в месяце года с наихудшим энергетическим потенциалом ВИЭ, то есть большую часть года в ГС с ВИЭ будет избыток мощности. Кроме того, допустимый уровень DOD для свинцово-кислотных АБ небольшой, и даже для АБ глубокого циклирования уровень DOD обычно принимается не более 40 ÷ 50 %, что обеспечивает их заряд до полной емкости током 0,1 С за 4 ÷ 5 часов.

#### 4.3. Анализ режимов приема и выдачи мощности

Характерной особенностью гибридных электростанций с ВИЭ являются значительные колебания генерируемой мощности на коротких временных интервалах длительностью в несколько секунд. Для анализа подобных режимов использовались фактические данные эксплуатации ВЭУ VDM-2 в г. Санкт-Петербурге, которые представлены на сайте ООО «ВДМ-техника» [24]. На рис. 8 приведены результаты мониторинга рабочего режима ВЭУ, снятые 23 января 2017 г.

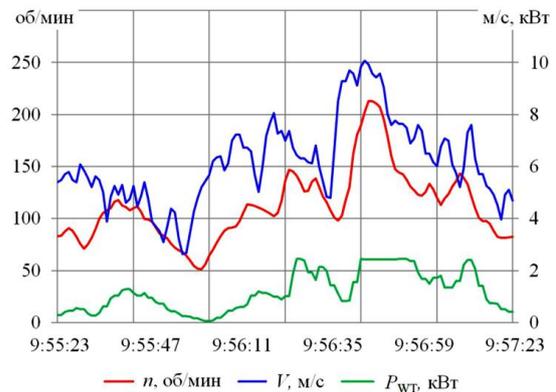


Рис. 8 – Результаты мониторинга рабочего режима ВЭУ VDM-2 23 января 2017 г.

Fig. 8 – Results of monitoring of an operating mode of the wind power installation VDM-2 on January 23, 2017

На рис. 8 на двухминутном временном интервале с односекундной дискретизацией представлены графики изменения следующих величин:  $V$  – скорость ветра, м/с;  $n$  – частота вращения ротора ВЭУ, об/мин;  $P_{вт}$  – выходная электрическая мощность ВЭУ, кВт.

Регистрограмма частоты вращения ВЭУ (рис. 8) показывает, что высокочастотные флуктуации скорости ветра (доли Гц) практически не влияют на ее выходную мощность, так как демпфируются инерционными массами вращающихся частей ВЭУ. При этом колебания скорости ветра с частотами, соизмеримыми с инерционной постоянной ВЭУ, определяют ее выходную мощность.



Инерционная постоянная ВЭУ VDM-2 равна 7 сек., и, соответственно, выходная электрическая мощность на близких к этому значению отрезках времени может изменяться в очень широком диапазоне, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными на рис. 8.

Таким образом, при наличии ВЭУ в составе автономных электростанций высока вероятность появления режимов избытка и дефицита мощности не только на относительно продолжительных (минуты, часы), но и

очень коротких интервалах времени (секунды). На этом этапе следует выполнить анализ данных режимов на примере электростанции, в составе которой есть одна ВЭУ VDM-2, работающая в режиме, представленном на рис. 8. Для удобства сопоставления новых данных с результатами представленных выше исследований, осуществим масштабирование основных параметров генерирующих источников и накопителя. Принятые для исследования параметры электростанций приведены в табл. 2.

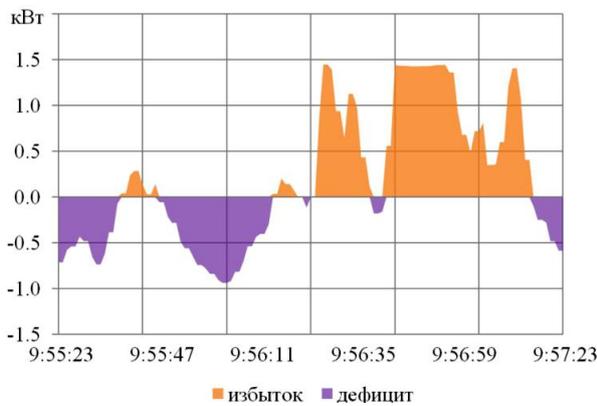
Таблица 2

Параметры гибридных электростанций, принятые в исследованиях

Table 2

The parameters of hybrid power plants accepted in the researches

Наименование параметра	Электростанция на базе 5 ВЭУ VDM-2	Электростанция на базе 1 ВЭУ VDM-2
Номинальная мощность ВЭУ, $P_{WT}$	10 кВт	2 кВт
Максимум электрической нагрузки, $P_{max}$	5 кВт	1 кВт
Номинальная емкость накопителя, $W_{AB}$	20 кВт·ч	4 кВт·ч



**Рис. 9** – Гистограммы избытка и дефицита мощности в гибридной электростанции без накопителя энергии  
**Fig. 9** – Histograms of surplus and shortage of capacity in a hybrid power plant without the energy store

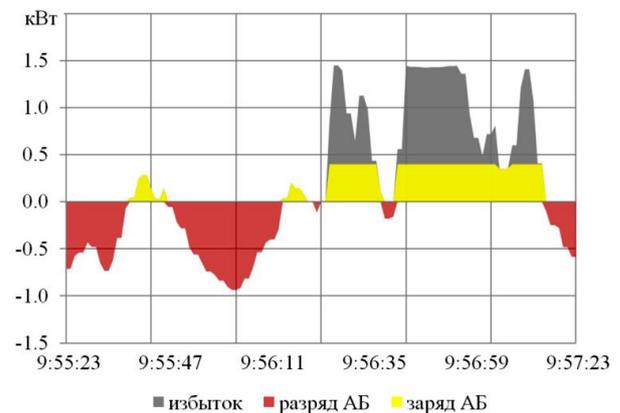
Расчетные гистограммы избытка и дефицита мощности в гибридной электростанции, единственным генерирующим источником которой является ВЭУ VDM-2 (электрическая нагрузка  $P_{load}$  принята неизменной и равной 1 кВт), на двухминутном временном интервале представлены на рис. 9.

Анализ гистограмм (рис. 9) показал, что и по относительным значениям колебаний мощности, и характеру их изменения они подобны суточным гистограммам на рис. 5.

Результаты расчета энергетического баланса в ГС с НЭ емкостью  $W_{AB} = 4$  кВт·ч и зарядным током 0,1 С представлены на рис. 10.

Результаты расчета энергетического баланса показали, что НЭ на базе АБ позволяет компенсировать режимы дефицита мощности, возникающие в системе, при этом разрядная мощность НЭ не превышает допустимых значений. Однако, зарядная мощность, как на суточных графиках (рис. 7), остается переменной, и режимы заряда чередуются с режимами разряда. Необходимо отметить, что чередование режимов заряда/разряда накопителя, построенного на базе АБ, на

коротких временных интервалах является особенно губительным для эксплуатационного ресурса аккумуляторов. Как известно, ресурс АБ определяется числом зарядно/разрядных циклов, а на рис. 10 видно, что всего за 120 сек. накопитель энергии подвергается 4 неполным зарядно/разрядным циклам, что приведет к заметному сокращению его ресурса.



**Рис. 10** – Энергетический баланс в гибридной электростанции с накопителем энергии  
**Fig. 10** – Power balance in a hybrid power plant with the energy store

Кроме того, на рис. 10 видно, что ввиду ограничений максимального зарядного тока накопитель энергии на базе АБ не может принять все избытки мощности, имеющиеся в системе, на коротких интервалах времени. Это приводит к снижению коэффициента замещения возобновляемой энергии в ГС и, соответственно, к ухудшению общей энергетической эффективности электростанции.

Аналогичные результаты можно получить и для ГС, основным генерирующим источником которой является ФЭУ, так как значения солнечной радиации, как и скорость ветра, могут изменяться в широком диапазоне за небольшие интервалы времени. А



поскольку стандартная ФЭУ, в отличие от ВЭУ, не имеет инерционных механических элементов, ее выходная электрическая мощность будет изменяться практически мгновенно и пропорционально солнечной инсоляции.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что накопители энергии на базе АБ плохо удовлетворяют требованиям ГС с ВИЭ по приему и выдаче мощности на коротких временных интервалах длительностью до нескольких минут.

## 5. Результаты и их обсуждение

Анализ режимов работы ГС с ВИЭ показал, что они характеризуются значительными колебаниями потребляемой и генерируемой мощности на продолжительных (месяцы, год), средних (часы, сутки) и коротких (секунды, минуты) интервалах времени.

Наиболее значительные изменения мощности характерны для продолжительных временных интервалов и обусловлены ярко выраженной зависимостью энергетического потенциала ВИЭ от сезонов года. Для компенсации сезонных колебаний мощности в ГС с ВИЭ требуются накопительные устройства емкостью на десятки МВт·ч, способные обеспечивать хранение энергии длительностью до полугода.

Среди накопительных устройств данным требованиям отвечают только гидро- и пневмоаккумуляторы, размеры и стоимость которых для автономных энергетических систем небольшой мощности будут несоизмеримо большими. Относительно невысокая плотность энергии всех других известных типов НЭ [22, 23] и неизбежные потери при ее длительном хранении обуславливают техническую и экономическую нецелесообразность применения накопительных устройств для сглаживания сезонных колебаний энергетического баланса в ГС с ВИЭ, по крайней мере, на современном этапе развития технологий.

Требуемый уровень надежности электроснабжения потребителей в ГС с ВИЭ должен обеспечиваться основными генерирующими источниками, при выборе которых необходим учет сезонной составляющей изменения энергетического баланса. Основными факторами, определяющими вырабатываемую мощность (энергию) установками ВИЭ на длительных временных интервалах являются географические координаты и климатические условия месторасположения ГС. Так как большинство метеорологических факторов имеют стохастическую природу, достоверный прогноз их изменения на продолжительных временных отрезках может быть получен только на основе статистической обработки фактических данных метеонаблюдений длительностью не менее 10 лет.

Для компенсации колебаний мощности на средних интервалах времени требуются накопители, обеспечивающие запас энергии в несколько десятков кВт·ч со сроком хранения около суток. Этим требованиям наилучшим образом отвечают накопители энергии на основе электрохимических АБ. Проведенный анализ

режимов работы НЭ в составе ГС с ВИЭ показал, что для запаса и выдачи энергии на временных интервалах продолжительностью в несколько часов не требуются АБ с относительно высокими значениями зарядной и разрядной мощности. Это позволяет использовать свинцово-кислотные АБ глубокого разряда серий Gel и AGM в целях сглаживания суточных пиков избытка и дефицита мощности.

Для компенсации кратковременных, но частых колебаний режимов ГС, вызванных порывом ветра или затенением части СБ налетевшим облаком, требуются НЭ, способные обеспечить быстрый прием и отдачу меняющихся в широких пределах значений мощности. Из известных типов накопителей энергии данным требованиям соответствуют суперконденсаторы (СК) [31]. Высокая удельная мощность, широкий диапазон рабочих температур, большое допустимое число циклов заряда/разряда, герметичность и экологичность конструкции определяют хорошую перспективу применения СК в самых различных областях техники, в том числе в энергетических системах с ВИЭ [31, 32]. Существенным недостатком, ограничивающим практическое применение СК в качестве основного накопителя энергии в ГС с ВИЭ, является низкая удельная плотность энергии.

## 6. Заключение

Проведенный анализ режимов работы накопителей в составе ГС с ВИЭ показал, что в зарядно/разрядных токах АБ неизбежны низкочастотные и высокочастотные пульсации большой амплитуды, обусловленные изменениями величины выходной мощности установок ВИЭ и нагрузки. И если низкочастотные пульсации (период десятки минут) могут частично демпфироваться за счет ограничения максимального зарядного тока АБ с помощью преобразователя, то устранить высокочастотные пульсации (период десятки секунд) в ГС с единственным накопителем энергии принципиально невозможно. В силу инерционности протекания химических реакций АБ плохо приспособлены для работы с импульсными токами. Наличие пульсаций в зарядно/разрядных токах АБ приводит к повышению их температуры, выкипанию электролита и коррозии электродов [33, 34]. Для обеспечения гарантированного срока службы АБ большинство производителей рекомендуют использовать двухуровневый режим заряда «постоянный ток – напряжение» и осуществлять перевод АБ в режим разряда только после ее полной зарядки. Однако с помощью накопителя энергии на базе АБ невозможно устранить чередование неполных режимов заряда с режимами разряда, особенно пагубных для АБ на коротких интервалах времени.

Для ГС с ВИЭ требуется накопитель энергии, имеющий характеристики аккумулятора в режимах приема и выдачи мощности на суточных временных интервалах и в то же время обладающий свойствами СК в режимах приема и отдачи импульсов мощности



на секундных отрезках времени. Такой тип накопителя можно создать только искусственным путем, объединив с помощью преобразователей в одном накопительном устройстве АБ и СК.

Комбинированный НЭ данного типа обеспечивает реализацию целого ряда важных функций: сглаживание пульсаций зарядно/разрядных токов АБ, оптимизацию режима заряда и остаточной емкости АБ, повышение эффективности использования энергии, генерируемой установками ВИЭ и др.

В конечном итоге применение комбинированных НЭ в ГС с ВИЭ позволяет добиться следующих положительных результатов: повышение надежности и энергетической эффективности электростанции, снижение эксплуатационных затрат и уменьшение себестоимости генерируемой электроэнергии.

#### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Уникальный идентификатор работ – RFMEFI57617X0098 (соглашение № 14.576.21.0098 о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 года).

#### Acknowledgments

The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation. The unique identifier is RFMEFI57617X0098 (agreement No. 14.576.21.0098 dated 26 September 2017).

#### Список литературы

- [1] Shivarama, K.K. A review on hybrid renewable energy systems [Text] / K.K. Shivarama, K.K. Sathish // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 52. – P. 907–916.
- [2] Chauhan, A. A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control [Text] / A. Chauhan, R.P. Saini // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 99–120.
- [3] Chong, L.W. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems [Text] / L.W. Chong [et al.] // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – Vol. 66. – P. 174–189.
- [4] Jing, W. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review [Text] / W. Jing [et al.] // IET Renewable Power Generation. – 2017. – Vol. 11. – No. 4. – P. 461–469.
- [5] Rahman, M.M. A hybrid renewable energy system for a North American off-grid community [Text] / M.M. Rahman [et al.] // Energy. – 2016. – Vol. 97. – P. 151–160.
- [6] Upadhyay, S. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems [Text] / S. Upadhyay, M.P. Sharma // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol. 38. – P. 47–63.
- [7] Rubio-Maya, C. Design optimization of a polygeneration plant fuelled by natural gas and renewable energy sources [Text] / C. Rubio-Maya [et al.] // Applied Energy. – 2011. – Vol. 88. – No. 2. – P. 449–457.
- [8] Kaabeche, A. Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system [Text] / A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen // Energy. – 2011. – Vol. 36(2). – P. 1214–1222.
- [9] Koutroulis, E. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms [Text] / E. Koutroulis [et al.] // Solar Energy. – 2006. – Vol. 80(9). – P. 1072–1088.
- [10] Senjyu, T. Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy [Text] / T. Senjyu [et al.] // Renewable Energy. – 2007. – Vol. 32. – P. 1917–1933.
- [11] Askarzadeh, A. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: a case study of Iran [Text] / A. Askarzadeh, L. Coelho // Solar Energy. – 2015. – Vol. 112. – P. 83–96.
- [12] Clarke, D.P. Multi-objective optimisation of renewable hybrid energy systems with desalination [Text] / D.P. Clarke, Y.M. Al-Abdeli, G. Kothapalli // Energy. – 2015. – Vol. 88. – P. 457–468.
- [13] Tezera, T. Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems [Text] / T. Tezera, R. Yaman, G. Yaman // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 73. – P. 840–863.
- [14] Barton, J.P. Energy storage and its use with intermittent renewable energy [Text] / J.P. Barton, D.G. Infield // Transactions on energy conversion. – 2004. – Vol. 19. – P. 441–448.
- [15] Gan, L.K. Hybrid wind-photovoltaic-diesel-battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland [Text] / L.K. Gan, J.K.H. Shek, M.A. Mueller // Energy Conversion and Management. – 2015. – Vol. 106. – P. 479–494.
- [16] Bianchini, A. Optimization of a PV-wind-diesel hybrid system for a remote stand-alone application [Text] / A. Bianchini [et al.] // Energy Procedia. – 2015. – Vol. 81. – P. 133–145.
- [17] Ani, V. Design of a reliable hybrid (PV/Diesel) power system with energy storage in batteries for remote residential home [Text] / V. Ani // Journal of Energy. – 2016, article ID 6278138, 16 pages.
- [18] Обухов, С.Г. Прогнозирование режимов потребления электрической энергии автономными энергетическими системами [Текст] / С.Г. Обухов, З.П. Хошна // Электрические станции. – 2012. – № 11. – С. 43–47.
- [19] The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> – (Дата обращения: 21.04.2018).
- [20] Каргиев, В.М. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности / В.М. Каргиев, С.Н. Мартиросов и др. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://windturbines.ru/attachments/article/76/Wind\\_energy.pdf](http://windturbines.ru/attachments/article/76/Wind_energy.pdf) – (Дата обращения: 21.04.2018).



[21] Mohamed, M.A. Sizing and techno-economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery power generation systems [Text] / M.A. Mohamed, A.M. Eltamaly, A.I. Alolah // *Journal of Renewable and Sustainable Energy*. – 2015. – Vol. 7. – P. 1–18.

[22] Oberhofer, A. Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration / A. Oberhofer – Global Energy Network Institute (GENI), July, 2012. – 42 p.

[23] Akinyele, D.O. Review of energy storage technologies for sustainable power networks [Text] / D.O. Akinyele, R.K. Rayudu // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. – 2014. – Vol. 8. – P. 74–91.

[24] Сайт ООО «ВДМ-техника». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vdmtech.ru/> – (Дата обращения: 21.04.2018).

[25] Сайт компании «JA SOLAR». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.jasolar.com/> – (Дата обращения: 21.04.2018).

[26] Российский метеорологический сайт «Расписание погоды». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.rp5.ru/> – (Дата обращения: 21.04.2018).

[27] Обухов, С.Г. Математическая модель прихода солнечной радиации на произвольно-ориентированную поверхность для любого региона России [Текст] / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE)*. – 2017. – № 16–18. – С. 43–56.

[28] Jones, A.D. A thermal model for photovoltaic systems [Text] / A.D. Jones, C.P. Underwood // *Solar Energy*. – 2001. – Vol. 70. – No. 4. – P. 349–359.

[29] Обухов, С.Г. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации [Текст] / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2017. – Т. 328. – № 6. – С. 38–51.

[30] Bhandari, B. Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review [Text] / B.Bhandari, K.Lee, G.Lee [et al.] // *International Journal of precision engineering and manufacturing-green technology*. – 2015. – Vol. 2. – No. 1. – P. 99–112.

[31] Guerrero, M.A. Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems [Text] / M.A. Guerrero [et al.] // *Wydawca Wydawnictwo SIGMA-NOT, Czasopismo Przegląd Elektrotechniczny, Rocznik*. – 2009. – Vol. 85. – No. 10. – P. 188–195.

[32] Wang, Z. Distributed storage capacity reservations for residential PV generation utilization and LV network operation [Text] / Z. Wan [et al.] // *Zhimin Power & Energy Society General Meeting, 2015 IEEE Year: 2015 Pages: 1–5*.

[33] Hu, X. Charging, power management, and battery degradation mitigation in plug-in hybrid electric vehicles: a unified cost-optimal approach [Text] / X. Hu, C.M. Martinez, Y. Yang // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2017. – Vol. 87. – No. 15. – P. 4–16.

[34] Kan, S.Y. The use of battery-capacitor combinations in photovoltaic powered products [Text] / S.Y. Kan, M. Verwaal, H. Broekhuizen // *Journal of Power Sources*. – 2006. – Vol. 162. – No. 2. – P. 971–974.

## References

[1] Shivarama K.K., Sathish K.K. A review on hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015;52:907–916.

[2] 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.

[3] Chong L.W., Wong Y.W., Rajkumar R.K., Rajkumar R.K., Isa D. Hybrid energy storage systems and control strategies for stand-alone renewable energy power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016;66:174–189.

[4] Jing W., Lai C.H., Wong W.S.H., Wong M.L.D. Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review. *IET Renewable Power Generation*, 2017;11(4):461–469.

[5] Rahman M.M., Khan M.M., Ullah M.A., Zhang X., Kumar A. A hybrid renewable energy system for a North American off-grid community. *Energy*, 2016;97:151–160.

[6] Upadhyay S., Sharma M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014;38:47–63.

[7] Rubio-Maya C., Uche-Marcuello J., Martínez-Gracia A., Bayod-Rújula A.A. Design optimization of a polygeneration plant fuelled by natural gas and renewable energy sources. *Applied Energy*, 2011;88(2):449–457.

[8] Kaabeche A., Belhmel M., Ibtouen R. Sizing optimization of grid-independent hybrid photovoltaic/wind power generation system. *Energy*, 2011;36(2):1214–1222.

[9] Koutroulis E., Kolokotsa D., Potirakis A., Kalaitzakis K. Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-generator systems using genetic algorithms. *Solar Energy*, 2006;80(9):1072–1088.

[10] Senjyu T., Hayashi D., Yona A., Urasaki N., Funabashi T. Optimal configuration of power generating systems in isolated island with renewable energy. *Renewable Energy*, 2007;32:1917–1933.

[11] Askarzadeh A., Coelho L. A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: a case study of Iran. *Solar Energy*, 2015;112:83–96.

[12] Clarke D.P., Al-Abdeli Y.M., Kothapalli G. Multi-objective optimisation of renewable hybrid energy systems with desalination. *Energy*, 2015;88:457–468.

[13] Tezera T., Yaman R., Yaman G. Evaluation of approaches used for optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017; 73:840–863.



- [14] Barton J.P., Infield D.G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy. *Transactions on energy conversion*, 2004;19:441–448.
- [15] Gan L.K., Shek J.K.H., Mueller M.A. Hybrid wind–photovoltaic–diesel–battery system sizing tool development using empirical approach, life-cycle cost and performance analysis: A case study in Scotland. *Energy Conversion and Management*, 2015;106:479–494.
- [16] Bianchini A., Magnelli N., Ferrara G., Carnevale E.A., Ferrari L. Optimization of a PV-wind-diesel hybrid system for a remote stand-alone application. *Energy Procedia*, 2015;81:133–145.
- [17] Ani V. Design of a reliable hybrid (PV/Diesel) power system with energy storage in batteries for remote residential home. *Journal of Energy*, 2016, article ID 6278138, 16 pages.
- [18] Obukhov S.G., Hochnau Z.P. Forecasting modes of electric energy consumption by autonomous power systems (Prognozirovanie rezhimov potrebleniya ehlektricheskoy ehnergii avtonomnymi ehnergeticheskimi sistemami). *Ehlektricheskie stancii*, 2012;11:43–47 (in Russ.).
- [19] The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set. Available on: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (21.04.2018).
- [20] Kargiev V.M., Martirosov S.N. et al. Wind power. Guidance on the application of small and medium-sized wind turbines (Vetroehnergetika. Rukovodstvo po primeneniyu vetroustanovok maloj i srednej moshchnosti). Available on: [http://windturbines.ru/attachments/article/76/Wind\\_energi.pdf/](http://windturbines.ru/attachments/article/76/Wind_energi.pdf/) (21.04.2018) (in Russ.).
- [21] Mohamed M.A., Eltamaly A.M., Alolah A.I. Sizing and techno-economic analysis of stand-alone hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery power generation systems. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2015;7:1–18.
- [22] Oberhofer A. Energy Storage Technologies & Their Role in Renewable Integration. Global Energy Network Institute (GENI), 2012, 42 p.
- [23] Akinyele D.O., Rayudu R.K. Review of energy storage technologies for sustainable power networks. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2014;8:74–91.
- [24] Web site “VDM-tehnika” LLC. Available on: <http://vdmtech.ru/> (21.04.2018) (in Russ.).
- [25] Web site “JA SOLAR”. Available on: <http://www.jasolar.com/> (21.04.2018).
- [26] Web site Weather Schedule. Available on: <http://www.rp5.ru/> (21.04.2018) (in Russ.).
- [27] Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Mathematical model of the arrival of solar radiation on an arbitrary-oriented surface for any region of Russia (Matematicheskaya model' prihoda solnechnoj radiacii na proizvol'no-orientirovannuyu poverhnost' dlya lyubogo regiona Rossii). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2017;(16–18):43–56 (in Russ.).
- [28] Jones A.D., Underwood C.P. A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy*, 2001;70(4):349–359.
- [29] Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Simulation model of modes of operation of an autonomous photovoltaic station taking into account actual operating conditions (Imitacionnaya model rezhimov raboty avtonomnoj fotoehlektricheskoy stancii s uchetom realnyh uslovij ehkspluatatsii). *Proceedings of Tomsk Polytechnic University. Engineering of geo-resources*, 2017;328(6):38–51 (in Russ.).
- [30] Bhandari B., Lee K., Lee G. et al. Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review. *International Journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, 2015;2(1):99–112.
- [31] Guerrero M.A., Romero E., Barrero F., Milanés M.I., González E. Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2009;85(10):188–195.
- [32] Wang Z., Qin L., Gu C., Li F. Distributed storage capacity reservations for residential PV generation utilization and LV network operation. *Power & Energy Society General Meeting*, 2015, doi: 10.1109/PESGM.2015.7286114.
- [33] Hu X., Martinez C.M., Yang Y. Charging, power management, and battery degradation mitigation in plug-in hybrid electric vehicles: a unified cost-optimal approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017;87(15):4–16.
- [34] Kan S.Y., Verwaal M., Broekhuizen H. The use of battery-capacitor combinations in photovoltaic powered products. *Journal of Power Sources*, 2006;162(2):971–974.

Транслитерация по BSI

