

## Оценка эффективности работы комбинированной энергоустановки в локальном сегменте сети

А.В. Кычкин<sup>a</sup>, А.В. Чудинов<sup>b</sup>

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, пр. Комсомольский 29, Пермь, Россия  
<sup>a</sup>aleksey.kychkin@gmail.com, <sup>b</sup>aleksander.tchudinov@yandex.ru

Статья поступила 11.03.2017, принята 16.04.2017

*В статье рассматривается задача оценки эффективности применения комбинированной электроэнергетической установки в энергетической системе на базе комплекса полунатурного моделирования HIL MicroGrid. Рассмотрен типовой пример локального сегмента энергетической сети, который включает в себя комбинированную установку на базе совмещенных батареи солнечных элементов и ветряного генератора. Рассматривается долгосрочный режим работы комбинированной энергоустановки для обеспечения двух независимых нагрузок сети — электропривода и набора бытовых потребителей, работающих совместно. В параметрах модели использованы климатические условия для выбранного региона, полученные из открытых источников сети Интернет. На основании предложенных математических моделей объектов проведено полунатурное моделирование сети на оборудовании компании National Instruments в режиме реального времени для периода времени, равного одному году. Выполнен анализ показателей эффективности работы батареи солнечных элементов и ветрогенератора по отдельности, а также проведена оценка эффективности комбинированной генерирующей установки. При оценке обеспечения постоянного энергоснабжения заданных нагрузок для климатических условий территории Пермского края выбранная комбинированная энергоустановка показала большую на 20 % эффективность в сравнении с отдельным использованием батареи солнечных элементов и ветрогенератора. Предложено дальнейшее увеличение эффективности установки данного оборудования на 9 % за счет использования аккумуляторных батарей, осуществляющих накопление излишней вырабатываемой энергии в дни с благоприятными климатическими условиями. Приведенная методика расчета комбинированной энергоустановки может быть использована в системах энергетического мониторинга локальных сетей промышленных предприятий, а также для обоснования применения возобновляемых источников энергии удаленных потребителей.*

**Ключевые слова:** энергетическая система; энергетическая установка; полунатурная модель; возобновляемый источник энергии; батарея солнечных элементов; ветрогенератор; комбинированная установка.

## Evaluation of the efficiency of the combined power plant in the local network segment

A.V. Kychkin<sup>a</sup>, A.V. Chudinov<sup>b</sup>

Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky Ave., Perm, Russia  
<sup>a</sup>aleksey.kychkin@gmail.com, <sup>b</sup>aleksander.tchudinov@yandex.ru

Received 11.03.2017, accepted 16.04.2017

*This article considers the problem of evaluation of the effectiveness of combined electrical energy system based on complex HIL MicroGrid simulation. Typical example of the local segment of the power network, which includes a combined power plant on the basis of the combined battery of solar cells and wind turbine, is considered. The long-term operating mode of the combined power plant is considered to provide two independent loads of the network - the electric drive and a set of household consumers working together. The model parameters used the climatic conditions for the selected region, obtained from free sources of the Internet. Based on the proposed mathematical models of objects, a semi-realistic simulation of the network was being performed on the equipment of National Instruments Company for a period of one year in real time mode. The analysis of the performance of the solar cell and wind generator battery has been carried out separately. The efficiency of the combined generating plant has been evaluated. When assessing the provision of constant power supply for specified loads for the climatic conditions of the Perm Territory, the selected combined power plant showed a large 20% efficiency compared to the separate use of a solar cell battery and a wind generator. A further increase in the efficiency of the installation by 9% is possible by installing the batteries accumulating excess energy in days with favorable climatic conditions. The calculation method of the combined power unit can be used in the energy monitoring systems of local networks of industrial enterprises, as well as for justifying the use of renewable energy sources by remote users.*

**Keywords:** energy system; energy unit; HIL model; renewable energy source; battery of solar cells; wind generator; combined power plant.

## Введение

Ведущая роль при модернизации топливно-энергетической системы России на принципах *SmartGrid* и «зеленых» технологий отводится построению интеллектуальной сети, обеспечивающей надежные связи генерации и потребителя с широким применением возобновляемых источников энергии [1; 2].

Развитие возобновляемой энергетики в России обуславливается отдаленностью сетевой энергетической инфраструктуры от ряда промышленных и жилых районов, но не имеет принципиальных стимулов. Ключевые причины — недостаток инвестиций и отсутствие реальной поддержки со стороны государства [3]. В отличие от зарубежного опыта в России наблюдаются более низкий уровень развития законодательной базы и консервативная точка зрения на возможности интеллектуальной «зеленой» энергетики [4]. В большинстве своем это связано с недостаточным количеством реализованных пилотных внедрений, а также отсутствием повсеместной практики корректной оценки полученных экономических эффектов.

Солнечная энергетика имеет большой потенциал лишь в некоторых регионах России, высокой эффективностью отличаются южные регионы, например, Краснодарский край и Ставрополье. Больше 3/4 территории страны относятся к регионам с низкой солнечной активностью. Строительство солнечных электростанций (СЭС) в России только начинается, и на данный момент их недостаточно для комплексной оценки эффективности в рамках страны [5]. Сроки окупаемости сильно зависят от погодных условий. Отмечаются такие недостатки СЭС, как сильная зависимость от погоды и времени суток, а также необходимость периодической очистки от пыли, грязи и снега. Без достаточного на то обоснования принято считать, что применение этих установок в средней полосе России является малоэффективным.

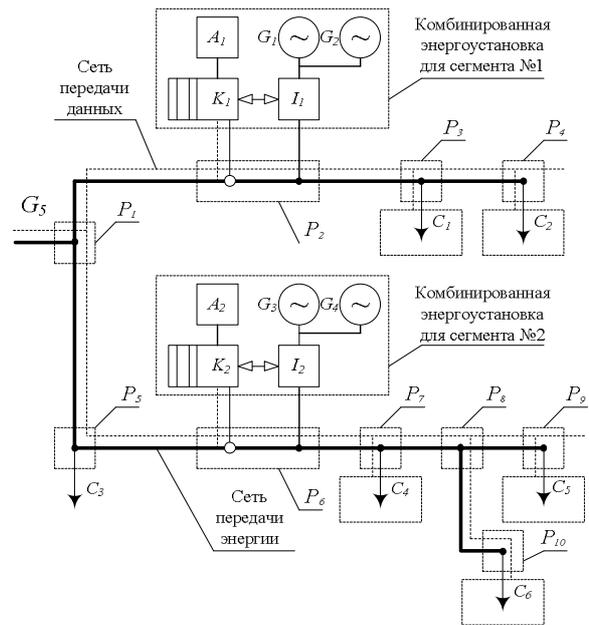
Для распространения сетевых ветрогенераторных энергоустановок (ВЭУ) необходимо улучшение правового обеспечения, а именно: возможность бесплатного подключения ВЭУ к электросети; сбыв излишков электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ; тарификация продаваемой электроэнергии. Отмечается низкая эффективность работы ВЭУ с целью обеспечения постоянного электроснабжения потребителей с фиксированной нагрузкой для ряда территорий [6].

С целью оценки эффективности функционирования энергетических систем с использованием возобновляемых источников энергии активно применяются средства моделирования, из которых наиболее адекватны полунатурные модели. Оценка качества распределения энергии в сложных сегментах сетей может быть реализована с помощью несбалансированной транспортной задачи и эвристических алгоритмов поиска, которые дают приемлемые для практики решения [7–9].

Мировой опыт показывает высокую эффективность комбинации и совместного применения комплексных (гибридных) энергоустановок (КЭУ), однако их использование в условиях климата России исследовано в недостаточном объеме. Анализ применения одного типа источника возобновляемой энергии не является достаточным для комплексного расчета энергообеспе-

чения потребителей, работающих в длительном режиме. В связи с этим актуальным направлением исследований является оценка эффективности КЭУ в локальных сегментах энергетических сетей на основе ВЭУ и СЭС [10–13].

**Модель локального сегмента сети с КЭУ.** Рассмотрим схему сети с использованием нескольких КЭУ, обеспечивающих энергией потребителей в двух локальных сегментах, реализованную на стенде полунатурного моделирования локальной активно-адаптивной сети (рис. 1) [14].



**Рис. 1.** Схема сети с КЭУ:  $G_1, G_3$  — батареи солнечных элементов;  $G_2, G_4$  — ветрогенераторы;  $A_1, A_2$  — аккумуляторы;  $I_1, I_2$  — инверторы;  $K_1, K_2$  — контроллерный блок управления и защитной автоматики;  $C_1 \dots C_6$  — потребители;  $P_1 \dots P_{10}$  — узлы подключения

В качестве распределительной системы электропитания используется трехфазная система с глухозаземленной нейтралью. Подключение КЭУ проводится следующим образом: ветрогенератор и солнечная панель через инвертор коммутируются к сети передачи энергии [15]. Управление передачей энергии осуществляется с помощью контроллерного блока, который соединен с аккумуляторной батареей, где излишки выработанной электроэнергии накапливаются и далее передаются в сеть. Контроллерный блок реализует функции защитной автоматики и имеет подключение к сети передачи данных.

Рассмотрим работу КЭУ на сегменте № 1 трехфазной сети, к которой подключены набор однофазных бытовых потребителей  $C_1$  и электропривод  $C_2$  с соединением «звезда».

Активная мощность, вырабатываемая батареями солнечных элементов  $G_1$ , определяется выражением:

$$P_{G_1} = \varepsilon \eta S \cos \varphi,$$

где  $\varepsilon$  — интенсивность солнца ( $B \cdot A / m^2$ );  $S$  — площадь элементов ( $m^2$ );  $\eta$  — КПД; коэффициент мощности генератора  $\cos \varphi = 0.93$ .

Активная мощность, вырабатываемая ветрогенератором  $G_2$ , определяется выражением:

$$P_{G_2} = k\rho R^2 V^3 \cos\varphi,$$

где  $k$  — коэффициент генератора,  $k = 0.5$  ( $B \cdot A \cdot \text{сек} / \text{кг}$ );  $\rho$  — плотность воздуха ( $\text{кг} / \text{м}^3$ );  $R$  — радиус лопастей ( $\text{м}$ );  $V$  — скорость ветра ( $\text{м} / \text{сек}$ ); коэффициент мощности генератора  $\cos\varphi = 0.93$ .

Генераторы работают в симметричном режиме (симметричная система токов и напряжений). Бытовая нагрузка работает в несимметричном режиме, поэтому необходимо наличие нейтрального провода, служащего для выравнивания значений фазных напряжений на нагрузке. В случае нехватки электроэнергии от КЭУ потребители могут получать ее из внешней сети  $G_5$ . В табл. 1 приведены показатели энергопотребления объектов  $C_1$  и  $C_2$  при полунатурном моделировании сети.

Таблица 1  
Показатели энергопотребления

Потребитель	$P, \text{Вт}$	$\cos\varphi$	$S, \text{ВА}$	$I, \text{А}$
$C_{1A}$	900	0,95	949	4,31
$C_{1B}$	1 250	0,95	1316	2,16
$C_{1C}$	2 107	0,97	2172	9,87
$C_2$	1 130	0,90	1255	3,30

В табл. 2 приведены результаты расчетов активной, реактивной и полной мощностей, потребляемых нагрузками  $C_1$ ,  $C_2$  и рассчитанных в соответствии с выражениями:

$$P = \sqrt{3}U_{cp} I_{cp} \cos\varphi_{cp}$$

$$Q = \sqrt{3}U_{cp} I_{cp} \sin\varphi_{cp}$$

$$S = \sqrt{3}U_{cp} I_{cp}$$

где  $U_{cp}$  — среднее значение напряжения в фазах нагрузки ( $\text{В}$ );  $I_{cp}$  — среднее значение тока в фазах нагрузки ( $\text{А}$ );  $\cos\varphi_{cp}$  — среднее значение коэффициента мощности нагрузки.

Таблица 2  
Результаты расчета мощности потребителей

	$I_{cp}, \text{А}$	$\cos\varphi_{cp}$	$P, \text{кВт}$	$Q, \text{кВар}$	$S, \text{кВА}$
$C_1$	5,45	0,956	1,983	0,601	2,072
$C_2$	3,30	0,900	1,130	0,547	1,255

**Климатические характеристики региона.** Существуют различные методы представления климатологической информации в гелиотехнических расчетах. Наиболее популярны следующие:

1. По средним суткам, представляющим месяц. Метеоданные усредняются за месяц, и расчет ведется по 15-му числу каждого месяца. В течение суток каждый час изменяется интенсивность солнца, которая зависит от угла падения солнечных лучей к поверхности земли.

2. По среднемесячным значениям, т. е. вычисляется одна среднемесячная величина параметра (плотность воздуха, скорость ветра), которая используется для суток месяца (колебание для плотности воздуха — 10 % и для скорости ветра — 30 % относительно среднего значения).

3. По «типичному» году расчет выполняется по реальным данным каждого часа дней месяца, имеющего статистические характеристики, совпадающие со средним и многолетним [16].

Функцию распределения интенсивности солнечных лучей можно записать:

$$D = C_I \sin\alpha,$$

где  $C_I$ , ( $\text{Вт} / \text{м}^2$ ) — солнечная постоянная;  $\alpha$  — угол падения солнечных лучей (от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ ).

Чем больше угол падения солнечных лучей, тем больше энергии передается на земную поверхность. В северном направлении с каждым градусом широты градус полуденной высоты солнца над горизонтом уменьшается.

Зная географические координаты Перми ( $56.285^\circ$  восточной долготы и  $58.017^\circ$  северной широты (в десятичных градусах)), получим значения полуденной высоты солнца: весной —  $32^\circ$ ; летом —  $55.5^\circ$ ; осенью —  $32^\circ$ ; зимой —  $8.5^\circ$ . Используя табличные значения, произведем расчеты  $\epsilon$  по преобладающему дню в каждом месяце: с мая по август — по солнечному дню, с сентября по апрель — по пасмурному дню. В расчетах приняты поправочные коэффициенты  $k_1$  облачного дня и  $k_2$  пасмурного дня для каждого из месяцев. Коэффициенты принимают большие значения в летний период и меньшие — в зимний с целью учета изменения угла падения солнечных лучей. Солнечная постоянная  $C_I$  изменяется во времени, поскольку изменяется расстояние между Землей и Солнцем в течение года (годовая вариация 6,9 % — от  $1,412 \text{ кВт} / \text{м}^2$  в начале января до  $1,321 \text{ кВт} / \text{м}^2$  в начале июля). Изменяется также сама солнечная активность.

Для каждого из месяцев определена длительность светового дня, в течение которого на поверхность земли в Перми попадает прямая солнечная радиация, необходимая для работы батарей солнечных элементов. В случае облачного и пасмурного дня на поверхность приходит рассеянная (ослабленная) солнечная радиация. Значения рассеянной радиации были получены путем умножения значения прямой солнечной радиации на коэффициент облачного дня в час, когда наблюдалась слабая облачность, и для пасмурного дня — путем умножения на коэффициент пасмурного дня для каждого из часов, когда наблюдалась высокая облачность. Расчет  $N_0$  (числа солнечных дней),  $N_1$  (облачных) и  $N_2$  (пасмурных дней) по месяцам проведен за 2015 г. [17]. Также использованы данные по скорости ветра, температуре окружающей среды и плотности воздуха. Видно, что при увеличении температуры воздуха его плотность уменьшается [18]. В табл. 3 приведены климатические параметры для исследуемого региона.

Климатические параметры региона за 2015 г. с исследуемой сетью

№ месяца	$C_1, \text{Вт/м}^2$	$V, \text{м/с}$	$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$k_1$	$k_2$	$N_0$	$N_1$	$N_2$	$\varepsilon, \text{ВА/м}^2$
1	1 412	2,7	-14,55	1,370	0,40	0,60	3	5	23	158,19
2	1 397	2,7	-11,05	1,348	0,40	0,60	2	4	21	233,91
3	1 382	3,1	-6,30	1,315	0,45	0,65	1	3	27	312,93
4	1 367	3,3	3,25	1,285	0,45	0,65	4	7	19	453,15
5	1 352	3,1	12,35	1,240	0,50	0,70	16	9	6	786,31
6	1 337	3,0	17,55	1,218	0,50	0,70	15	9	6	816,65
7	1 321	2,9	17,55	1,218	0,50	0,70	15	11	4	817,69
8	1 337	2,7	16,25	1,225	0,50	0,70	15	10	5	809,45
9	1 352	2,7	10,15	1,248	0,45	0,65	8	8	14	329,03
10	1 367	3,3	1,20	1,285	0,45	0,65	4	4	23	255,59
11	1 382	3,2	-3,70	1,304	0,40	0,60	2	5	23	180,08
12	1 397	2,9	-10,70	1,345	0,40	0,60	1	2	28	144,77

**Полунатурное моделирование работы КЭУ с установленными климатическими параметрами региона.** В качестве параметров СЭС использованы значения модели от компании «Светон»: номинальная мощность — 3 кВт, площадь солнечных панелей — 36 м<sup>2</sup>, КПД — 15 %,  $\cos\varphi = 0.93$ .

Параметры модели ветрогенератора аналогичны параметрам ВЭУ для слабых ветров ООО «Ветрострой»: радиус лопастей — 7 м, мощность номинальная — 3 кВт при ветре 6 м/с. При среднегодовой скорости ветра 3 м/с (Пермский край) установка в среднем вырабатывает 2,3 кВт,  $\cos\varphi = 0.93$ .

На стенде полунатурного моделирования проведены экспериментальные расчеты среднего значения интенсивности солнечной радиации по каждому дню, исходя из климатических условий Пермского края.

Для исследования эффективности работы ветрогенератора и солнечной батареи введены расчетные показатели:

$E_1 = P_{G1} - (P_{C1} + P_{C2})$  — баланс активной мощности, генерируемой солнечной панелью и потребленной в сети;

$E_2 = P_{G2} - (P_{C1} + P_{C2})$  — баланс активной мощности, генерируемой ветрогенератором и потребленной в сети;

$E_3 = P_{G1} + P_{G2} - (P_{C1} + P_{C2})$  — баланс активной мощности, генерируемой КЭУ и потребленной в сети;

$E_4 = \frac{P_{G1} + P_{G2}}{P_{C1} + P_{C2}}$  — относительный показатель, характеризующий соотношение генерируемой КЭУ и потребленной активной мощности в локальном сегменте.

Батарея солнечных элементов наиболее эффективна с конца апреля по середину августа, с 10 до 17 часов.

Расчеты показали, что электроэнергии, произведенной солнечной станцией за 119 дней года, достаточно для электроснабжения потребителей  $C_1$  и  $C_2$ .

Экспериментальные расчеты проведены с использованием показателей скорости ветра для каждого дня. Установлено, что скорость ветра ниже в солнечную погоду и может изменяться до 30 % от своего среднего значения в течение месяца, плотность воздуха может меняться в пределах 10 %. Электроэнергии, произведенной ветрогенератором, достаточно для электроснабжения потребителей 156 дней в году. Для территории Пермского края ветрогенератор показал большую эффективность по сравнению с батареей солнечных элементов в силу низкого значения средней солнечной активности.

При работе комбинированной системы наблюдается синергетический эффект от совместного использования двух разнородных источников возобновляемой энергии (рис. 2).

На рис. 3 показано распределение показателей  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  за год, при этом прямоугольниками отмечены области с положительным балансом. Видно, что поведение  $E_1$  описывается экспоненциальным распределением случайной величины (кроме крайнего правого значения, вызванного резким увеличением солнечной активности летом),  $E_2$  — нормальным распределением,  $E_3$  близко к равномерному распределению.

На рис. 4 показано распределение  $E_3$  за год.

Расчеты показали, что энергии, произведенной КЭУ, хватает для электроснабжения потребителей на номинальной мощности в среднем 330 дней в году, что больше суммы числа дней для отдельно подключенных батареи солнечных элементов и ветрогенератора (275 дней). Расчетный прирост эффективности по показателям баланса активной мощности составил 15 %.

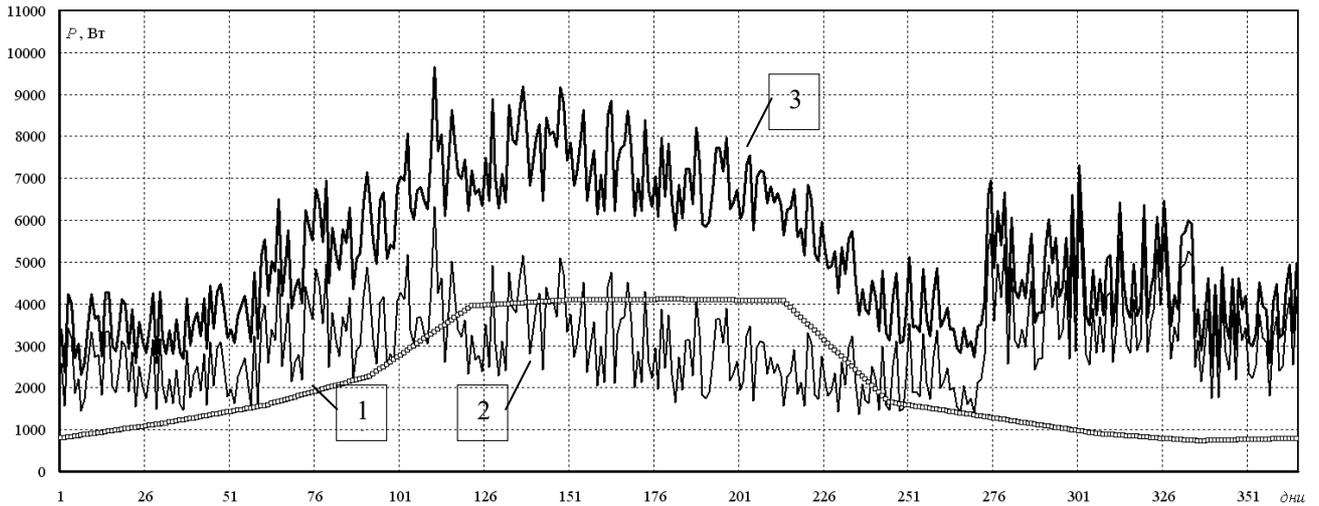


Рис. 2. График выработки энергии батареями солнечных элементов (1), ветрогенератором (2), КЭУ (3)

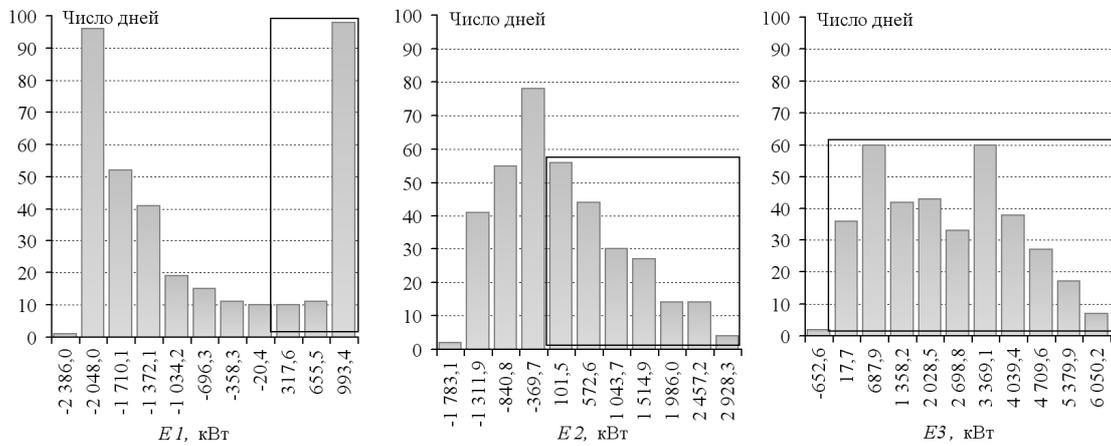


Рис. 3. Гистограммы распределения  $E_1$ ,  $E_2$  и  $E_3$  за год

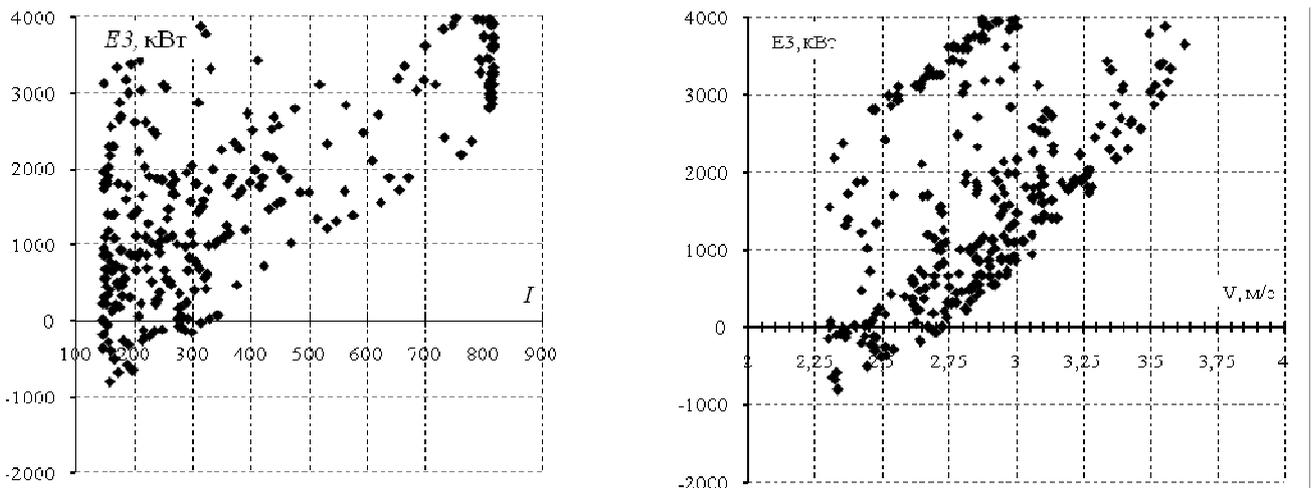
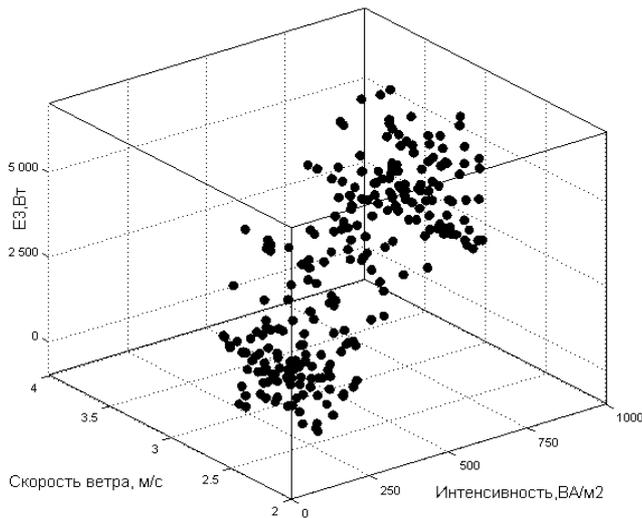


Рис. 4. Распределение  $E_3$  при случайных интенсивности солнечной радиации и скорости ветра за год

На рис. 3 видно, что при своей работе батарея солнечных элементов и ветрогенератор имеют пики выработки энергии при определенных климатических условиях. КЭУ будет эффективна при сочетании этих условий большее число дней в году (рис. 5).

Очевидно, что ветрогенераторы и солнечные батареи дополняют друг друга при совместной работе в

КЭУ. Для практики это может интерпретироваться таким образом, что в летний период максимально эффективна батарея солнечных элементов, а ветрогенератор — в пасмурную погоду, межсезонье, когда облачность значительна и ветер имеет наибольшую скорость.

Рис. 5. Распределение  $E_3$  за год

**Увеличение эффективности работы КЭУ за счет установки аккумуляторных батарей.** Для повышения эффективности работы КЭУ необходимо запастись излишки энергии в аккумуляторных батареях, чтобы в дальнейшем выдавать ее в сеть при слабом ветре или низкой солнечной активности.

Выберем оптимальную емкость аккумуляторной батареи. Для примера возможных вариантов воспользу-

емся справочно-технической информацией компании ООО «Санвэйс» — поставщика солнечных батарей, панелей, аккумуляторных батарей, элементов марки Sunways. Аккумуляторы Sunways выполнены по технологии AGM (*Absorbed Glass Mat*) и предназначены для работы как в циклическом, так и буферном режиме. Можно отметить следующие преимущества: продолжительный срок службы (10–12 лет при 50%-ной глубине разряда), улучшенные зарядные характеристики, абсолютная герметизация корпуса, доступная цена.

Объем сохраняемой в аккумуляторной батарее энергии определяется по выражению:

$$E = U_n C_A (Втч),$$

где  $C_A$  (Ач) — номинальная емкость аккумуляторной батареи;  $U_n$  (В) — номинальное напряжение аккумулятора; примем  $U_n = 12$  В.

Из табл. 4 видно, что при наибольшем приросте числа дней с положительным балансом энергии  $N_{G2}$  для  $G_2$  и  $N_{КЭУ}$  для КЭУ оптимальной является установка аккумулятора емкостью 100 Ач с 50%-ным циклом разряда. Если брать 100%-ный цикл разряда, то возможна установка аккумуляторной батареи емкостью 50 Ач, но это приведет к более раннему выходу батареи из строя, поскольку скорость ветра постоянно меняется вблизи среднего значения, и при этом часто образуется избышек и дефицит энергии.

Таблица 4

Определение количества дней  $N$  с положительным использованием аккумуляторной батареи

Параметры	Емкость аккумуляторной батареи, Ач							
	0	50	100	200	400	600	800	1 000
Цена, тыс. р.	–	7,5	10,3	26,3	38,6	50,3	63,4	75
$E$ , Втч	–	600	1 200	2 400	4 800	7 200	9 600	12 000
$N_{G1}$	119	122	124	126	129	132	134	136
$N_{G2}$	156	188	212	229	239	244	247	250
$N_{КЭУ}$	330	358	362	365	365	365	365	365

### Заключение

Использование ветровой и солнечной энергии по отдельности на территории Пермского края не распространено по причине низкой скорости ветров и низкой солнечной активности, обусловленной географической широтой и климатическими условиями региона.

Анализ гистограмм распределения параметра  $E_3$  за год с учетом результатов моделирования показал, что КЭУ для заданных условий будет на 20 % эффективнее в сравнении с работой ветрогенератора и батареи солнечных элементов отдельно друг от друга.

Увеличение эффективности работы КЭУ не менее чем на 9 % возможно путем установки аккумуляторных батарей, емкость которых определяется их аналитической и экономической целесообразностью. Приведенная методика расчета КЭУ может быть использована в системах энергетического мониторинга локальных сетей промышленных предприятий [19; 20], а также при обосновании применения возобновляемых источников энергии для удаленных потребителей.

*Работа выполнена при поддержке внутривузовского гранта ПНИПУ, соглашение № 2016/ПИ-2 «Разработка методологии мониторинга и утилизации тепловых потоков как низкопотенциального ресурса предприятия».*

### Литература

1. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 15-20.
2. Егоров А.А. Активно-адаптивные энергосети (Smart-Grid) на базе технологии National Instruments // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2012. № 5 (34). С. 12-21.
3. Соломенцев К.Ю., Белый О.Ю., Севостьянова Е.П. Организационно-экономические проблемы и перспективы развития ветроэнергетики в России // Вестн. ЮРГПУ. 2011. № 2. С. 104-111.
4. Франк Т., Кычкин А.В., Мусихина К.Г. Государственное управление проектами в области энергосбережения как база для эффективного внедрения «лучших практик» // Менеджмент в России и за рубежом. 2014. № 3. С. 98-104.
5. Терещенко А.Е. Альтернативные источники энергии: солнечная энергия // Социосфера: сб. конф. НИЦ. 2016. № 35. С. 22-25.

6. Кычкин А.В., Чудинов А.В. Исследование полунатурной модели локального сегмента активно-адаптивной сети с ветрогенератором // Системы. Методы. Технологии. 2015. №1. С. 107-112.
7. Yang P.-C., Yang H.-T., Huang C.-L. Solving the unit commitment problem with a genetic algorithm through a constraint satisfaction technique // Electric Power Systems Research. 1996. Vol. 37, № 1. P. 55-65.
8. Кычкин А.В., Чудинов А.В. Эвристический алгоритм оптимизации мощности в активно-адаптивной сети // Вестн. Перм. национал. исслед. политехн. ун-та. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2015. № 15. С. 97-107.
9. Aytug H., Khouja M., Vergara F.E. Use of genetic algorithms to solve production and operations management problems // A review, International Journal of Production Research. 2003. Vol. 41, № 17. P. 3955-4009.
10. Diab F., Lan H., Zhang L., AliS. An environmentally friendly factory in Egypt based on hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery system // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 5, № 112. P. 3884-3894.
11. Fadaeenejad M., Radzi M.A.M., Abkadir M.Z.A., Hizam H. Assessment of hybrid renewable power sources for rural electrification in Malaysia // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. № 30. P. 124-129.
12. Basir Khan M.R., Jidin R., Pasupuleti J., Shaaya S.A. Optimal combination of solar, wind, micro-hydro and diesel systems based on actual seasonal load profiles for a resort island in the South China Sea // Energy. 2015. № 82. P. 80-97.
13. Godson J., Karthick M., MuthukrishnanT., Sivagamasundari M.S. Solar PV-wind hybrid power generation system // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016. Vol. 5, № 5.
14. Petrochenkov A.B., Frank T., Romodin A.V., Kychkin A.V. Hardware-in-the-loop simulation of an active-adaptive power grid // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84, № 11. P. 652-658.
15. Комбинированные системы с солнечными батареями и ветрогенераторами [Электронный ресурс] // Solarb.ru: сайт. URL: <http://solarb.ru/kombinirovannye-sistemy-s-solnechnymi-batareyami-i-vetrogeneratorami> (дата обращения: 25.11.2016).
16. Бутузов В.А. Анализ опыта разработок и эксплуатации гелиоустановок в Краснодарском крае // Энергетическая эффективность. 2002. № 34. С. 17-21.
17. Погода в Перми по месяцам [Электронный ресурс] // Pogoda360: сайт. URL: <http://russia.pogoda360.ru/240357/avg/> (дата обращения: 5.12.2016).
18. Физические свойства воздуха [Электронный ресурс]: плотность, вязкость, энтропия, теплоемкость // Thermalinfo.ru: сайт URL:<http://thermalinfo.ru> (дата обращения: 5.12.2016).
19. Кычкин А.В. Синтез системы удаленного энергетического мониторинга производства // Metallurg. 2015. № 9. С. 20-27.
20. Koutroulis E., Kalaitzakis K. Development of an integrated data acquisition system for renewable energy sources systems monitoring // Renewable Energy. 2003. № 28 (1). С. 139-152.
3. Solomentsev K.Yu., Belyi O.Yu., Sevost'yanova E.P. Organizational and Economic Problems and Prospects for Development of Wind-Power Engineering in Russia // The Bulletin of the South-Russian State Technical University (NPI). 2011. № 2. P. 104-111.
4. Frank T., Kychkin A.V., Musikhina K.G. State management of energy efficient projects as a basic of effective implementation of «best practices» // Management in Russia and Abroad. 2014. № 3. P. 98-104.
5. Tereshchenko A.E. Alternative energy sources: solar energy // Sotsiosfera: sb. konf. NITs. 2016. № 35. P. 22-25.
6. Kychkin A.V., Chudinov A.V. Research HIL local segment model is active-adaptive grid with wind generator // Systems. Methods. Technologies. 2015. № 1. P. 107-112.
7. Yang R.-S., Yang N.-T., Huang S.-L. Solving the unit commitment problem with a genetic algorithm through a constraint satisfaction technique // Electric Power Systems Research. 1996. Vol. 37, № 1. P. 55-65.
8. Kychkin A.V., Chudinov A.V. Heuristic Algorithm for the Microgrid Power Optimization // PNRPU Bulletin. Electrotechnics, Informational Technologies, Control Systems. 2015. № 15. P. 97-107.
9. Aytug H., Khouja M., Vergara F.E. Use of genetic algorithms to solve production and operations management problems // A review, International Journal of Production Research. 2003. Vol. 41, № 17. P. 3955-4009.
10. Diab F., Lan H., Zhang L., AliS. An environmentally friendly factory in Egypt based on hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery system // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 5, № 112. P. 3884-3894.
11. Fadaeenejad M., Radzi M.A.M., Abkadir M.Z.A., Hizam H. Assessment of hybrid renewable power sources for rural electrification in Malaysia // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. № 30. P. 124-129.
12. Basir Khan M.R., Jidin R., Pasupuleti J., Shaaya S.A. Optimal combination of solar, wind, micro-hydro and diesel systems based on actual seasonal load profiles for a resort island in the South China Sea // Energy. 2015. № 82. P. 80-97.
13. Godson J., Karthick M., MuthukrishnanT., Sivagamasundari M.S. Solar PV-wind hybrid power generation system // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016. Vol. 5, № 5.
14. Petrochenkov A.B., Frank T., Romodin A.V., Kychkin A.V. Hardware-in-the-loop simulation of an active-adaptive power grid // Russian Electrical Engineering. 2013. Vol. 84, № 11. P. 652-658.
15. Combined systems with solar panels and wind generators [Elektronnyi resurs] // Solarb.ru: сайт. URL: <http://solarb.ru/kombinirovannye-sistemy-s-solnechnymi-batareyami-i-vetrogeneratorami> (дата обращения: 25.11.2016).
16. Butuzov V.A. Analysis of experience in development and operation of solar plants in the Krasnodar region // Energeticheskaya effektivnost'. 2002. № 34. P. 17-21.
17. Weather in Perm by month [Elektronnyi resurs] // Pogoda360: сайт. URL: <http://russia.pogoda360.ru/240357/avg/> (дата обращения: 5.12.2016).
18. Physical properties of air [Elektronnyi resurs]: plotnost', vyazkost', entropiya, teploemkost' // Thermalinfo.ru: сайт URL:<http://thermalinfo.ru> (дата обращения: 5.12.2016).
19. Kychkin A.V. Sintez sistemy udalennogo energeticheskogo monitoringa proizvodstva // Metallurg. 2015. № 9. P. 20-27.
20. Koutroulis E., Kalaitzakis K. Development of an integrated data acquisition system for renewable energy sources systems monitoring // Renewable Energy. 2003. № 28 (1). P.139-152.

#### References

1. Dorofeev V.V., Makarov A.A. Active-adaptive network - a new quality of UES of Russia // Energoekspert. 2009. № 4. P. 15-20.
2. Egorov A.A. Active-adaptive grid (Smart Grid) on the basis of National Instruments technology // Avtomatizatsiya i IT v energetike. 2012. № 5 (34). P. 12-21.