

УДК 621.311.243

Optimization of Structure of Generating Capacities Decentralized Energy System with Photovoltaic Installation

Vladimir A. Tremyasov and Kara-kys V. Candy*

Siberian Federal University

79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia

Received 15.04.2015, received in revised form 20.11.2015, accepted 24.01.2016

A method for optimizing the structure and composition of the generating equipment isolated power grid with photovoltaic modules using a multivariate experiment, and expert assessments. For example, of power supply system of the village of the Republic of Tyva determine the optimal equipment and estimated technical and economic indicators.

Keywords: decentralized power grid, photovoltaic modules, optimization, factorial experiment, expert assessments, the regression equation, the method of Box-Wilson.

Citation: Tremyasov V.A., Candy K. V. Optimization of structure of generating capacities decentralized energy system with photovoltaic installation, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(1), 39-49. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-1-39-49.

Оптимизация структуры генерирующих мощностей децентрализованной энергосистемы с фотоэлектрической установкой

В.А. Тремясов, К.В. Кенден

Сибирский федеральный университет

Россия, 660041, Красноярск, Свободный, 79

Предложен метод оптимизации структуры и состава генерирующего оборудования изолированной энергосистемы с фотоэлектрическими модулями с применением многофакторного эксперимента и экспертных оценок. На примере системы электроснабжения населенного пункта Республики Тыва определен оптимальный состав оборудования и выполнена оценка технико-экономических показателей.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: Kuca08@mail.ru

Ключевые слова: децентрализованная энергосистема, фотоэлектрические модули, оптимизация, факторный эксперимент, экспертные оценки, уравнение регрессии, метод Бокса-Уилсона.

К зонам децентрализованного электроснабжения относится 70 % территории России, где, по разным оценкам, проживают от 10 до 20 млн человек. Высокая стоимость привозного топлива негативно влияет на технико-экономические показатели работы местных дизельных электростанций (ДЭС), однако полноценной замены им пока не существует. Одним из возможных вариантов экономии дизельного топлива может быть использование местных возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Основным препятствием внедрения ВИЭ является недостаточное методическое обоснование проектов использования этих источников совместно с ДЭС [1, 2].

Аналитический обзор в области систем электроснабжения, включающих ВИЭ, позволил сделать вывод об отсутствии эффективных методов оптимизации комбинированной энергосистемы с учетом неопределенности связей между входными и выходными параметрами, реальных климатических условий места ее эксплуатации (солнечной радиации, скорости ветра, параметров водных ресурсов), особенностей графика нагрузки и режимных параметров ДЭС.

Авторами статьи предложен метод многоцелевой оптимизации структуры генерирующих мощностей энергосистемы, состоящей из дизель-генераторов (ДГ), фотоэлектрических модулей (ФЭМ) и аккумуляторных батарей (АБ).

При решении задач многоцелевой оптимизации критерий оптимальности оценивается целевой функцией

$$B(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x)), \quad (1)$$

где $f_i(x)$ ($i=1, 2, \dots, k$) – заданные функции переменного $x=(x_1, x_2, \dots, x_i)$.

На переменные x_i ($i = 1, n$) накладываются ограничения таким образом, что x принадлежит множеству X его возможных значений. Необходимо найти точку $x^* \in X$, обеспечивающую оптимальное значение функций $f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x)$.

Для решения задач многоцелевой оптимизации в системах энергетики наиболее распространенными оказались так называемые итеративные методы: метод наискорейшего спуска (для целочисленных переменных) и метод Бокса-Уилсона (при отсутствии явных аналитических выражений для целевой функции) [3].

Поэтому для начального этапа исследований оптимальных решений по какому-либо объекту энергетики с ВИЭ можно рекомендовать представление целевой функции с помощью аппроксимирующего полинома, коэффициенты которого оцениваются в результате опытов математического эксперимента, поставленных на модели объекта.

Пользуясь методами теории факторного эксперимента и математической статистики, можно определить значения коэффициентов полинома как коэффициентов регрессии и степень адекватности полиномиальной модели по результатам эксперимента.

Для решения задачи многоцелевой оптимизации предполагается использовать метод многофакторного эксперимента. В условиях проектирования эксперимент проводится не в натуральном виде, а средствами вычислительной техники.

Входные параметры варьируются по плану активного многофакторного эксперимента, а выходные параметры определяются экспертной оценкой.

Автономная энергосистема ДГ-ФЭМ-АБ представляется в виде аппроксимирующего полинома, поиск оптимума при этом производится на основе определения направления скорейшего подъема (максимального градиента) [4, 5].

В случае применения полиномиальной модели для оценки целевой функции B поиск оптимума осуществляется в два этапа: выход в район максимума B и нахождение полинома $\hat{B} = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ вблизи оптимума.

На первом этапе решения задачи движения к оптимуму осуществляется с помощью линейной формы от точки с меньшим значением \hat{B} к точкам с большим значением:

$$\hat{B} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (2)$$

где x_i – значения факторов; b_0 – среднее значение показателя при среднем уровне всех факторов и b_i – коэффициенты функции.

Коэффициенты b_0, b_1, \dots, b_n определяются с помощью дробного факторного эксперимента в окрестностях некоторой начальной точки. Факторы варьируются в возможных пределах изменения их в данной задаче. Пределы варьирования устанавливаются экспертным путем.

В качестве факторов, варьируемых в ходе оптимизации состава и мощности источников системы ДГ-ФЭМ-АБ, принимаются уровни мощности энергоисточников различного вида и накопителей электроэнергии. Например, для системы электроснабжения одного из населенных пунктов Республики Тыва с учетом величины нагрузки приняты следующие значения факторов:

- x_1 – система ДГ с единичной мощностью 4 кВт;
- x_2 – система ДГ с единичной мощностью 6 кВт;
- x_3 – комплекс ФЭМ с мощностью панели 160 Вт;
- x_4 – комплекс ФЭМ, оснащенных трекерами, с мощностью панели 160 Вт;
- x_5 – банк АБ с емкостью элемента 55 А·ч;
- x_6 – банк АБ с емкостью элемента 100 А·ч.

Количество экспериментов, необходимое для определения коэффициентов b_0, b_i , связано с числом факторов [6]. Для получения математической модели процесса достаточно осуществить дробную реплику полного факторного эксперимента, положив $x_1x_2 = x_4$, $x_1x_3 = x_5$, $x_2x_3 = x_6$, что значительно сокращает объем расчетов, так как уменьшает число вычислительных экспериментов до 8. План факторного эксперимента при выборе состава оборудования системы для шести факторов определяется дробной 1/8 репликой (табл. 1), в которой значения факторов «+1» отвечают верхним уровням, «-1» – нижним, а «0» соответствует среднему уровню.

По условию линейности зависимостей \hat{B} и x максимум функции \hat{B} будет иметь место при таком сочетании граничных значений параметров x , при котором все члены уравнения регрессии положительны, а незначимые равны нулю.

Применение факторного эксперимента дает возможность численно оценивать степень влияния каждого фактора на исследуемый выходной параметр \hat{B} .

Таблица 1. План факторного эксперимента

Вариант энергосистемы	Факторы					
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1
Уровни факторов, кВт/кВт·ч:						
Верхний +1	3x4=12	2x6=12	6,4	12,8	19,8	18
Нижний -1	1x4=4	1x6=6	3,2	6,4	9,9	0

Если в результате первой серии экспериментов удалось определить состав оборудования, удовлетворяющий требованиям изолированной энергосистемы, дальнейшую оптимизацию можно не проводить.

В том случае, если $\hat{B} \ll 1$ и состав оборудования не удовлетворяет требованиям системы, необходимо производить дальнейшее продвижение к оптимуму с уменьшением шага варьирования. Дальнейшее продвижение к оптимуму по методу Бокса-Уилсона производится с опыта варьирования, где средние уровни x равны полученным промежуточным оптимальным [5].

Для этого наиболее значимый фактор принимают за базовый x_i и шаги варьирования остальных факторов принимают равными

$$\lambda_{iB} = \frac{b_i \lambda_i}{b_j \lambda_j} \cdot \lambda_{jB}, \quad (3)$$

где λ_{iB} – новый шаг i -го фактора; λ_{jB} – шаг базового фактора.

Шаг варьирования не может быть меньше единичной мощности генерирующего и аккумулирующего оборудования.

Движение от начальной точки осуществляется последовательными шагами λ_{iB} , λ_{jB} до тех пор, пока оценки \hat{B} по уравнению (2) не превысят в 1–2 раза максимально возможный уровень. После этого следует провести новый факторный эксперимент в области новой базовой точки с помощью нового дробного факторного эксперимента, выбрать новое направление движения и так далее до достижения оптимума [3]. Признаком оптимума по какому-либо фактору будет являться не значимость соответствующих коэффициентов полинома. Использование метода Бокса-Уилсона позволяет совершать движение к оптимуму по поверхности отклика с меньшим числом опытов за счет уменьшения шага варьирования.

С помощью описанной выше методики можно выполнить оптимизацию состава оборудования и мощности энергосистемы ДГ-ФЭМ-АБ для электроснабжения изолированных потребителей по алгоритму, представленному на рис. 1.



Рис. 1. Алгоритм оптимизации состава и мощности энергосистемы ДГ-ФЭМ-АБ для электроснабжения изолированных потребителей

Рассмотрим применение предложенного метода для оптимизации структуры децентрализованной системы электроснабжения населенного пункта Качык Республики Тыва.

Село Качык – одно из 12 населенных пунктов, получающих электроэнергию от ДЭС. Проведенные исследования показали, что место его расположения обладает значительным уровнем солнечной радиации [7].

Электричество жители получают от одного ДГ с установленной мощностью 30 кВт с 6 ч утра до 24 ч ночи, после чего ее отключают. По полученным данным были построены графики суточных нагрузок села в зимнее и летнее время (рис. 2). Максимальная потребляемая мощность 10 кВт приходится на 17–18 ч в зимнее время, минимальная 2,4 кВт – на 14–15 ч летом.

При выборе варианта исполнения и оптимизации состава агрегатов для автономной энергосистемы предлагается использовать обобщенный (комплексный) критерий эффективности B :

$$B = \sum_i v_i f_i(x), \quad (4)$$

где $f_i(x)$ – значение переменной x по шкале i -го критерия; v_i – весовой коэффициент (весомость).



Рис. 2. Графики суточных нагрузок села Качык

Авторами статьи на основании анализа литературных данных, обобщения имеющегося опыта и опроса специалистов был определен предварительный перечень наиболее важных шести целей O_i , требующих ранжирования (табл. 2). В группу экспертов вошли шесть компетентных в данной области специалистов: экономист-энергетик, специалисты по эксплуатации электростанций, специалист по фотоэлектрическим модулям, специалист-проектировщик электроустановок с ВИЭ. Число экспертов должно быть не меньше числа целей, учитываемых при сравнении вариантов системы ДГ-ФЭМ-АБ.

Для оценки весомостей целей использован метод ранговой корреляции [8]. При этом определялся коэффициент конкордации, показывающий степень согласованности мнений экспертов с ранжированием целей.

Каждой цели каждый эксперт присваивает оценочный ранг, определяющий, по мнению эксперта, весомость цели. Наиболее важная цель получает первый ранг ($a=1$). Если какие-либо две или три цели невозможно различить по важности, то каждая из них получает ранг, равный среднему арифметическому присвоенных рангов. Обработка матрицы рангов $[a_{ik}]$, где i – номер цели по перечню, k – номер эксперта, дает возможность оценки весомости каждой цели по формулам

$$A_i = \sum_{k=1}^N a_{ik}; \quad w_i = 1 - A_i(nN)^{-1} + n^{-1}, \quad v_i = w_i(\sum_{i=1}^n w_i)^{-1}, \quad (5)$$

где N – число экспертов; n – число целей в перечне; A_i – сумма рангов i -й цели.

Для оценки эффективности обеспечения целей в каждом варианте эксперимента был произведен расчет абсолютных значений показателей обеспечения целей по методике, описанной в [9]. Абсолютные оценки показателей обеспечения целей по вариантам приведены в табл. 3.

Для оценки эффективности обеспечения цели O_4 в вариантах использовалась величина стоимости сэкономленного дизельного топлива в системе ДГ-ФЭМ-АБ. Показатели эффективности для цели O_6 определялись по значениям чистой приведенной стоимости вариантов проекта системы.

Таблица 2. Перечень и оценки весомости целей в относительных единицах

Цели		Оценка весомости v_i
O_1	Минимум капитальных затрат на строительство системы ДГ-ФЭМ-АБ	0,205
O_2	Минимум себестоимости электроэнергии, вырабатываемой системой ДГ-ФЭМ-АБ	0,051
O_3	Максимум удельной выработки электроэнергии ФЭМ на 1 кВт установленной мощности	0,308
O_4	Минимум расхода дизельного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии ДГ	0,308
O_5	Минимальный срок окупаемости проекта ДГ-ФЭМ-АБ	0,103
O_6	Максимум привлекательности проекта ДГ-ФЭМ-АБ для инвестора	0,026

Таблица 3. Абсолютные оценки обеспечения целей по вариантам энергосистемы

Показатели	Варианты							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Кап.вложения в систему ДГ-ФЭМ-АБ, тыс. руб.	5537	3665	3683	5401	5401	4107	4170	6474
2. Себестоимость электроэнергии, производимой ДГ и ФЭМ, руб/кВт·ч	15,38	25,02	25,05	15,18	11,18	21,68	21,78	12,78
3. Удельная выработка электроэнергии ФЭМ, кВт·ч /1 кВт	270	154	154	270	307	191	191	307
4. Денежный эквивалент вытесненному дизтопливу, тыс. руб.	1561	1481	1481	1561	1481	1381	1381	1481
5. Срок окупаемости системы, лет	20,65	24,01	24,13	20,14	17,66	21,64	21,97	21,21
6. Чистая приведенная стоимость проекта, млн руб.	11,67	6,11	6,09	11,81	14,24	8,07	8,00	13,11

Нормированные относительные оценки эффективности обеспечения целей могут быть получены на основе линейного преобразования для прямой и инверсной зависимости этих оценок от абсолютной величины технико-экономического показателя по одной из формул

$$f_i = \frac{y_i - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}; \quad f_i = \frac{y_{\max} - y_i}{y_{\max} - y_{\min}}; \quad (6)$$

где y_{\max} , y_{\min} – верхнее и нижнее значения абсолютных величин технико-экономических показателей; y_i – значение показателя для рассматриваемого варианта.

Результаты расчета относительных оценок обеспечения целей f_{ij} и общей эффективности B представлены в табл. 4.

В табл. 4 даны оценки эффективности вариантов: B – по комплексному критерию эффективности, \hat{B} – по уравнению регрессии.

Условие ортогональности плана факторного эксперимента означает, что скалярные произведения для всех векторов столбцов матрицы планирования (табл. 1) равны нулю и все коэффициенты регрессии определяются независимо друг от друга, так как все ковариации $\text{cov}\{b_i, b_j\}$ равны нулю.

Таблица 4. Результаты расчета относительных оценок обеспечения целей и общей эффективности вариантов системы ДГ-ФЭМ-АБ

Варианты	Цели (коэффициенты весомости) v_i и оценки эффективности f_{ij}						Общая эффективность варианта	
	1	2	3	4	5	6	$B = \sum_i v_i f_{ij}$	$\hat{B} = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n$
	0,205	0,051	0,308	0,308	0,103	0,026		
1	0,334	0,697	0,757	1	0,538	0,685	0,718	0,707
2	1	0,002	0	0,556	0,018	0,002	0,378	0,352
3	0,994	0	0	0,556	0	0	0,375	0,377
4	0,382	0,712	0,757	1	0,617	0,703	0,737	0,735
5	0,382	1	1	0,556	1	1	0,737	0,700
6	0,843	0,242	0,243	0	0,385	0,242	0,306	0,343
7	0,82	0,236	0,243	0	0,333	0,234	0,295	0,265
8	0	0,885	1	0,556	0,452	0,862	0,593	0,623

Из условия нормирования следует, что все диагональные элементы ковариационной матрицы равны $1/N$ и значения коэффициентов уравнения регрессии определяются по формулам, приведенным в [6]:

$$b_0 = 1/N \sum_{k=1}^N B_k; \quad b_j = 1/N \sum_{k=1}^N x_{jk} B_k, \tag{7}$$

где N – число реализованных опытов k ; B_k – значение выходного параметра, полученное на основе комплексного критерия эффективности с использованием экспертных оценок вышеуказанных компетентных специалистов.

Симметричные нормированные ортогональные планы дают минимальную дисперсию оценок по уравнению регрессии.

Коэффициенты проверяются на значимость по критерию Стьюдента. Коэффициент b_j считается значимым, если выполняется условие

$$|b_j| > t_s S(b_j), \tag{8}$$

где $S(b_j)$ – среднеквадратическая ошибка в оценке коэффициента b_j ; t_s – коэффициент Стьюдента с числом степеней свободы $s = N - 1$.

В нашем случае в уравнении все коэффициенты, кроме b_1 , являются значимыми, тогда уравнение регрессии примет вид

$$\hat{B} = 0,517 - 0,017 x_2 - 0,035 x_3 + 0,179 x_4 - 0,02 x_5 - 0,021 x_6.$$

Проверка адекватности полученного уравнения производится с помощью критерия Фишера по выражению

$$F_{\text{расч}} = \frac{S^2(B)_{\text{ад}}}{S^2(\hat{B})} \leq F_{\text{табл}} [(N - m - 1), (m - 1)] \tag{9}$$

где

$$S^2(B)_{об} = \frac{\sum_{k=1}^N (B_k - \hat{B}_k)^2}{N - (m + 1)}, \quad (10)$$

где B_k – значение выходного параметра, полученное из опыта на основе комплексного критерия эффективности; \hat{B}_k – значение выходного параметра, полученного по уравнению регрессии.

В нашем случае $1,218 < 6,94$, значит, условие (9) соблюдено.

По условию линейности зависимостей B и x при экспертных оценках максимум \hat{B} будет иметь место при таком сочетании граничных значений параметров x , при котором все члены уравнения регрессии положительны, а незначимые равны нулю:

$x_1 = 0$, т. е. мощность ДГ равна 8 кВт;

$x_2 = -1$, т. е. мощность ДГ равна 6 кВт;

$x_3 = -1$, т. е. суммарная мощность установленных ФЭМ равна 3,2 кВт;

$x_4 = +1$, т. е. суммарная мощность установленных ФЭМ с трекером будет равна 12,8 кВт;

$x_5 = -1$, т. е. суммарная энергия, запасенная в банке АБ емкостью 55 А·ч, равна 9,9 кВт·ч;

$x_6 = -1$, т. е. суммарная энергия, запасенная в банке АБ емкостью 100 А·ч, равна нулю.

Уравнение регрессии примет следующий вид:

$$\hat{B}_{\max} = 0,517 + 0,017 + 0,035 + 0,179 + 0,02 + 0,021 = 0,789 .$$

Полученная структура системы ДГ-ФЭМ-АБ отвечает оптимальному решению. Генерирующая мощность изолированной энергосистемы для села Качык включает 14 кВт мощности ДГ и 16 кВт от панелей ФЭМ, кроме того, имеется 9,9 кВт·ч электроэнергии, накопленной в АБ. Полученный вариант установленной мощности источников генерации, аккумулированной электроэнергии и состава энергосистемы полностью удовлетворяет требованиям для покрытия графика нагрузки потребителей.

На рис. 3, 4 показано распределение генерирующих мощностей и использование энергии АБ в изолированной энергосистеме ДГ-ФЭМ-АБ для покрытия суточных летнего и зимнего графиков нагрузки.

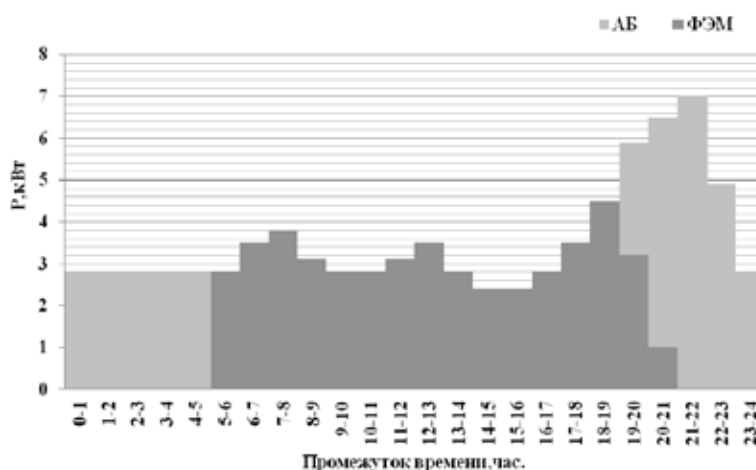


Рис. 3. Распределение генерирующих мощностей в графике нагрузки летом

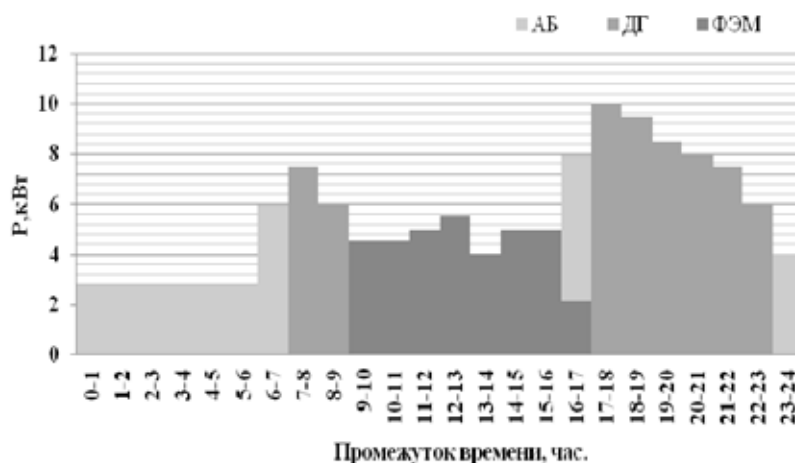


Рис. 4. Распределение генерирующих мощностей в графике нагрузки зимой

Результаты, достигаемые после создания энергосистемы ДГ-ФЭМ-АБ:

- график подачи электроэнергии изменен с 18 до 24 ч в сутки;
- будет снижено на 70 % потребление дизельного топлива по отношению к потреблению при 18-часовом графике подачи электроэнергии;
- уменьшено время работы ДГ с 18 до 3–5 ч в сутки в среднем в году, что позволит почти в 2 раза увеличить межсервисные интервалы для ДГ;
- улучшится качество электроэнергии;
- ФЭМ в составе системы будет вырабатывать от 55 до 100 % электроэнергии, потребляемой поселком в сутки.

Выводы

1. Разработана методика оптимизации состава и мощности энергосистемы ДГ-ФЭМ-АБ для электроснабжения изолированных потребителей с учетом солнечного потенциала местности, технических характеристик дизельных и солнечных установок, аккумуляторных батарей и параметров нагрузки потребителей.

2. Применение метода факторного эксперимента при оптимизации состава энергосистемы ДГ-ФЭМ-АБ позволяет учитывать в совокупности факторы, не зависящие друг от друга, а также показатели эффективности системы электроснабжения.

3. На примере системы электроснабжения населенного пункта Республики Тыва определен оптимальный состав генерирующих и аккумулирующих установок с использованием фотоэлектрических модулей.

Список литературы

- [1] Лукутин Б.В., Суржикова О.А., Шандарова Е.Б. *Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении*. М.: Энергоатомиздат, 2008, 231 с. [Lukutin B.V., Surzhikova O.A., Shandrova E.B. *Renewable energy in a decentralized supply*, Moscow, Energoatomizdat, 2008, 231 p. (in Russian)]

[2] Сурков М.А., Пупасов-Максимов А.М., Чернов Д.Е. *Наукоедение*, 2012, 1–11 [Surkov M.A., Pupasov-Maksimov A.M., Chernov D.E. *Naukovedenie*, 2012, 1-11 (in Russian)]

[3] Щавелев Д.С., Гук Ю.Б., Федоров М.П. и др. *Основы выбора оптимальных решений в системах энергетики и водного хозяйства*; Л.: ЛПИИ М.И. Калинина, 1977, 83 с. [Shchavelev D.S., Guk Yu.B., Fedorov M.P. at al. *Foundations of optimum solutions in systems of energy and water management*, Leningrad Polytechnic Institute, 1977, 83 p. (in Russian)]

[4] Асатурян В.И. *Теория планирования эксперимента*. М.: Радио и связь, 1983, 248 с. [Asaturian V.I. *Theory of experiment planning*, Moscow, Radio I sviaz', 1983, 248 p. (in Russian)]

[5] Гук Ю.Б., Долгов П.П., Окорочков В.Р. и др. *Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике*; ред. В.Р. Окорочков и Д.С. Щавелев. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд., 1985, 176 с. [Guk Yu.B., Dolgov P.P., Okorokov V.R. at al. *Comprehensive analysis of the effectiveness of technical solutions in the energy sector*, ed. by V.R. Okorokov and D.S.Shchavelev, Leningrad, Energoatomizdat, 1985, 176 p. (in Russian)]

[6] Налимов В.В. *Теория эксперимента*. М.: Наука, 1971, 207 с. [Nalimov V.V. *The theory of the experiment*, Moscow, Nauka, 1971, 207 p. (in Russian)]

[7] Кенден К.В., Тремясов В.А. Оценка мощности фотоэлектрических преобразователей в системах автономного электроснабжения Республики Тыва. *Журнал СВУ. Техника и технология*, 2014, 7(8), 966-975 [Kenden K.V., Tremyasov V.A. Article Describes the Features of Electrical Supply System Settlements of the Republic of Tyva, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2014 7(8), 966-975 (in Russian)]

[8] Черчмен У., Акоф Р., Арнов Л. *Введение в исследование операций*. М.: Наука, 1968, 486 с. [Cherchmen U., Akof R., Arnov L. *Introduction to operations research*, Moscow, Nauka, 1968, 486 p. (in Russian)]

[9] Безруких П.П., Арбузов Ю.Д., Борисов Г.А. и др. *Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России*. СПб.: Наука, 2002, 314 с. [Bezrukikh P.P., Arbuzov Yu.D., Borisov G.A. at al. *Resources and the efficient use of renewable energy sources in Russia*, St. Petersburg, Nauka, 2002, 314 p. (in Russian)]