

УДК 621.311.26

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И ПАРАМЕТРОВ АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОГЕНЕРИРУЮЩИХ КОМПЛЕКСОВ

Телегин В.В.

ФБГОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет»,
Липецк, e-mail: teleginv.v@yandex.ru

Работа посвящена вопросам проектирования автономных электрогенерирующих комплексов, построенных на базе технологий альтернативной энергетики, в состав которых могут быть включены ветроэнергетические установки, фотоэлектрические преобразователи, мини-ГЭС и модули аккумулирования электроэнергии. Методика расчёта структуры и параметров автономного электрогенерирующего комплекса основывается на методах численной оптимизации его модели, представляющей собой математическое описание энергетических потоков в замкнутой системе комплекса. Задача проектирования комплекса сформулирована как задача поиска значений его параметров, при которых критерии эффективности достигают экстремума. В качестве основных критериев оптимизации рассматриваются мощность генерируемой комплексом электроэнергии и мощность энергии, рассеянной балластным сопротивлением, стоимость электрогенерирующего комплекса. Результатом расчётов является количество каждого из трёх типов генерирующих устройств и аккумулирующих устройств, определяющих структуру комплекса, и их конструкционные параметры.

Ключевые слова: оптимизация автономных энергосистем, автономное электроснабжение, критерии эффективности электроснабжения, ветроэлектрические установки, фотоэлектрические станции, малые ГЭС

OPTIMIZATION OF STRUCTURE AND PARAMETERS FOR AUTONOMOUS ELECTRICITY GENERATING COMPLEXES

Telegin V.V.

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, e-mail: teleginv.v@yandex.ru

Article is devoted to questions of design of the autonomous electrogenerating complexes, constructed on the basis of technologies of alternative power engineering, in structure which can be included wind turbines, photo-electric converters, mini-hydro and modules of accumulation of the electric power. The procedure of calculation of structure and parameters of an autonomous electrogenerating complexes, is based on methods of numerical optimization of its model, representing the mathematical description of power streams in closed system of this complex. The problem of design of a complex is formulated as a problem of search of values of its parameters at which criteria of efficiency reach an extremum. As the main criteria of optimization are considered capacity of the electric power generated by a complex and power energy, disseminated by ballast resistance; the cost of an electrogenerating complex. The result of the calculations is the amount of each of the three types of generating devices and heat-sink devices, determining the structure of the complex, and their design parameters.

Keywords: optimization of autonomous power supply systems, autonomous power supply, criteria of efficiency of power supply, wind turbines, photo-electric converters, mini-hydro

Автономный электрогенерирующий комплекс, построенный на базе возобновляемых источников энергии, рассматриваемый в данной работе, представляет собой систему трёх типов электрогенерирующих установок, преобразующих энергии ветра, солнечного излучения и водяного потока в электрическую энергию, а также устройства её аккумулирования и сброса. Наличие и количество каждого из перечисленных типов установок определяет структуру электрогенерирующего комплекса, конструкционные и экономические характеристики – его параметры.

Эффективность электрогенерирующего комплекса определяют в общем случае целый набор значений показателей, от которых зависит его работоспособность, надёжность, характеристики экономического плана: стоимость, себестоимость электроэнергии, срок окупаемости, а также площадь размещения, удобство обслуживания

и ряд других критериев. Полагая систему электроснабжения автономного потребителя замкнутой, можно утверждать, что сумма мощностей источников электрической энергии должна быть равна сумме мощностей, расходуемых в приёмниках за вычетом потерь вследствие её передачи и различного рода преобразований. Источниками энергии в данной системе являются ветроэнергетические генераторы (ВЭГ), фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) и гидроэнергетические генераторы (ГЭГ). Приёмники – потребитель и балластное сопротивление (БС). Система аккумулирования электроэнергии в зависимости от количественного соотношения вырабатываемой и потребляемой энергии может выступать как в роли её источника, так и приёмника. Задачу проектирования автономного электрогенерирующего комплекса естественно сформулировать как задачу поиска значений его параметров, при которых критерии

эффективности энергетического комплекса достигают экстремумов. Область поиска допустимых значений этих параметров должна удовлетворять уравнению баланса мощностей рассматриваемого автономного электрогенерирующего комплекса, а также конструктивными ограничениями на их минимальные и максимальные значения. Решение поставленной задачи может быть выполнено численно на основе методов оптимизации и имитационного моделирования, опирающихся на современные компьютерные технологии.

В результате исследований, выполненных автором [4], были установлены две группы критериев, определяющих эффективность энергокомплекса: экономические и энергетические. В качестве единственного критерия экономической эффективности, логично принять стоимость генерирующих и преобразующих устройств, включающую их доставку, монтаж и ввод в эксплуатацию (C_{Σ}). Затраты при использовании возобновляемых источников энергии связаны только с обслуживанием генерирующих и аккумулирующих устройств, не требуют каких-либо дополнительных вложений, например, на закупку и доставку топлива. При сравнительно небольших объёмах генерируемой электроэнергии такие общепринятые критерии экономической эффективности, как приведенные годовые затраты на один киловатт установленной мощности и себестоимость электроэнергии пропорциональны C_{Σ} .

Суммарную стоимость оборудования автономной системы электроснабжения с учётом его установки можно найти из выражения:

$$C_{\Sigma} = C_{\text{в}} \cdot N_{\text{в}} + C_{\text{с}} \cdot N_{\text{с}} + C_{\text{г}} \cdot N_{\text{г}} + C_{\text{а}} \cdot N_{\text{а}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{в}}$, $C_{\text{с}}$, $C_{\text{г}}$ и $C_{\text{а}}$ – стоимость ветро-, фото-, гидроэнергетического и аккумулирующего оборудования с учётом его установки, а $N_{\text{в}}$, $N_{\text{с}}$, $N_{\text{г}}$ и $N_{\text{а}}$, соответственно, их количество.

Значения параметров $N_{\text{в}}$, $N_{\text{с}}$, $N_{\text{г}}$ и $N_{\text{а}}$ определяют структуру электрогенерирующего комплекса, то есть наличие или отсутствие генерирующих устройств.

Между конструктивными параметрами генерирующих установок и их мощностью существуют зависимости. Формулы для расчёта суммарной мощности ВЭГ ($P_{\text{в}}$) с горизонтальным и вертикальным расположением осей [5]:

$$P_{\text{в}} = \frac{\pi V_0^3}{8 h_0^{3k}} \rho_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{вд}}^{\Gamma} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot K_{\text{ВЭУ}}^{\Gamma} \cdot N_{\text{в}}; \quad (2)$$

$$P_{\text{в}} = \frac{V_0^3}{2 h_0^{3k}} \rho_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{вд}}^{\text{В}} \cdot \eta_{\text{в}} \cdot K_{\text{ВЭУ}}^{\text{В}} \cdot N_{\text{в}}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³; V_0 – скорость ветра на высоте флюгера, м/с; h_0 –

высота флюгера, м; k – коэффициент характеризующий тип ландшафта и земной поверхности; $\eta_{\text{вд}}^{\Gamma}$, $\eta_{\text{вд}}^{\text{В}}$ – к.п.д. ветродвигателей с горизонтальной и вертикальной осями; $\eta_{\text{в}}$ – к.п.д. линий электропередач, систем коммуникации, стабилизации и др. для ветроустановок.

В формулах (2) и (3) функций $K_{\text{ВЭУ}}^{\Gamma}$, $K_{\text{ВЭУ}}^{\text{В}}$ коэффициенты, связывающие изменения конструктивные параметры ВЭГ с горизонтальной и вертикальной осями. Для ВЭГ с горизонтальной осью и вертикальной осью будем соответственно иметь:

$$K_{\text{ВЭУ}}^{\Gamma} = D^2 \cdot h_1^{3k},$$

$$h_1 \geq 0,75 \cdot D;$$

$$K_{\text{ВЭУ}}^{\text{В}} = D \cdot H \cdot \left(h_1 + \frac{H}{2} \right)^{3k};$$

$$h_1 \leq m \left(\frac{D}{H} \right) \cdot D; \quad m \left(\frac{D}{H} \right) = \frac{5}{28} \frac{D}{H} + \frac{4}{7}.$$

Минимальную высоту мачты ВЭГ (h_1) ограничим значением h_{min} (5 метров), максимальную – h_{max} (50 метров). Тогда значения диаметров ветроколеса для ВЭГ с горизонтальной осью будет изменяться от 7,5 до 75, а с вертикальной осью, при $D=H$, – от 3,75 до 37,5 метров. Функции $K_{\text{ВЭУ}}^{\Gamma}$, $K_{\text{ВЭУ}}^{\text{В}}$, представленные на рис. 1, являются гладкими, без явно выраженных экстремумов. Другими словами, говорить о каких-либо оптимальных соотношениях параметров D (или H) и h_1 , при которых мощность $P_{\text{в}}$ достигает максимума, не имеет смысла. С другой стороны, если учесть, что размеры ветроколеса определяют, как правило, мощность ветрогенератора и соответственно его стоимость, которая растёт как с высотой мачты, так и с габаритами ветродвигателя, то с экономической точки зрения, вариацией параметров, определяющих количество и габариты ВЭГ, можно получить довольно интересные решения, позволяющие минимизировать стоимость ветропарка.

Среднесуточная мощность фотоэлектрических установок:

$$P_{\text{с}} = R_{\text{с}}^{\Gamma} \cdot \eta_{\text{сп}} \cdot \eta_{\text{с}} \cdot (K_{\text{с}}(\beta) \cdot N_{\text{с}}) \cdot S_{\text{с}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{с}}^{\Gamma} = \mathcal{E}^{\Gamma} / 24$ – среднесуточная полная мощность солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность единичной площади, кВт/м²; $\eta_{\text{сп}}$ – к.п.д. солнечных панелей; $\eta_{\text{с}}$ – к.п.д. линий электропередач, систем коммуникации, стабилизации и др. для ФЭП; $S_{\text{с}}$ – площадь поверхности одной солнечной панели, м².

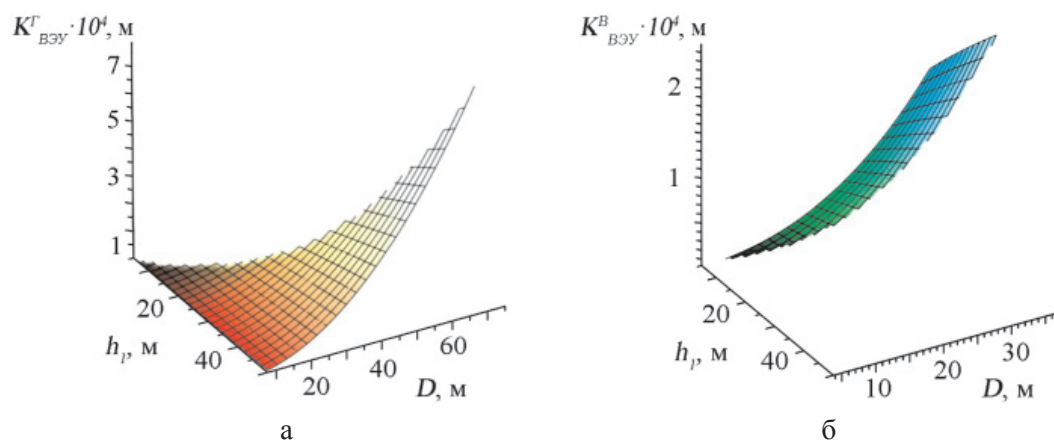


Рис. 1. Влияние конструктивных параметров ВЭУ с горизонтальной (а) и вертикальной (б) осью на её мощность

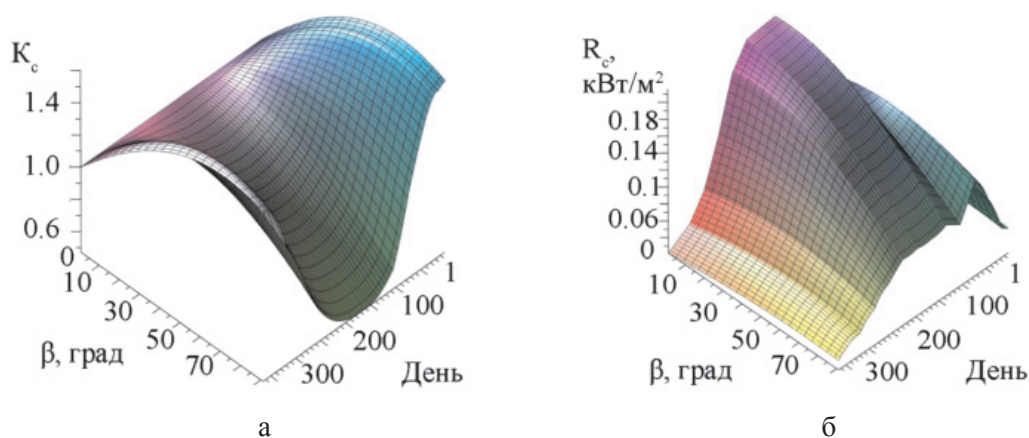


Рис. 2. Характеристики солнечной инсоляции в географической точке с координатами 52.98°N, 38.967°E: изменение коэффициента K_c (а), полная инсоляция в течение года (б) в зависимости от угла наклона β приёмной площадки к уровню горизонта

В выражении (4) действительно варьируемым параметром является общая площадь фотоэлектрических панелей (ФЭП). Здесь значение площади одной панели считается заданным. Значение общей площади всех панелей определяется их количеством. Значение $K_c(\beta)$ зависит не только от угла наклона панели β , но и от целого ряда параметров, определяющих географическое положение места установки солнечной панели, текущей даты и может быть найдено в соответствии с методикой, предложенной в работе [1]. На рис. 2 показана зависимость изменения коэффициента K_c и полной солнечной инсоляции на наклонную поверхность R_c для географической точки местности с координатами: 52.98°N, 38.967°E (село Троекурово, Липецкая область, Россия). Анализ приведённых зависимостей позволяет сделать однозначное утверждение о целесообразности поиска оптимального угла наклона панели для заданной точки местности и временного периода.

Мощность ГЭС, генерируемая в системе автономного электроснабжения:

$$P_r = \rho_v \cdot g \cdot \eta_r \cdot \eta_{гр} \cdot (Q \cdot H_r \cdot N_r), \quad (5)$$

где ρ_v – плотность воды, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; H_r – напор гидротурбины, м; Q – расход воды, м³/с; $\eta_{гр}$ – к.п.д. гидрогенератора; η_r – к.п.д. линий электропередач, систем коммуникации, стабилизации и др. для МГЭС.

Параметры Q , H_r и η_r взаимосвязаны друг с другом. Характер этой взаимосвязи определяется конструкцией гидротурбины, её размерами и целым рядом других характеристик [2]. Как следует из представленных на рис. 3 графиков, зависимость мощности малых гидроэлектростанций (МГЭС) при заданном текущем расходе реки предполагает при определённых сочетаниях её характеристик (модель, напор, диаметр рабочего колеса) наличие особых зон (экстремумов, перегибов). В этой связи постановка задачи поиска оптимальных характеристик МГЭС представляет несомненный интерес.

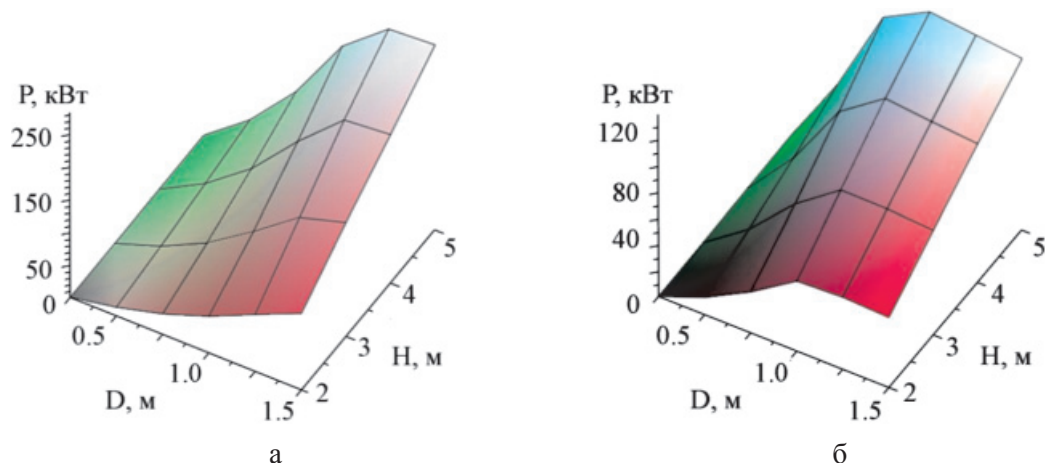


Рис. 3. Зависимость изменения мощности турбины модели ПЛ10 от диаметра её рабочего колеса и величины напора при расходе реки 6.4 (а) и 3.2 (б) м³/с

В качестве критериев энергетической эффективности будем рассматривать:

- максимальную суммарную мощность генерирующих устройств комплекса (P_{Σ}), расположенного на заданной территории;
- минимальное значение суммарной мощности, рассеянной балластным сопротивлением ($P_{\Sigma 6}$), при выполнении условия работоспособности электрогенерирующего комплекса.

Выбор в качестве показателя эффективности первого из энергетических кри-

териев может быть использован на этапе выполнения работ, связанных с принятием решений по созданию автономных предприятий (потребителей) на заданной территории в той или иной географической точке местности. Применение второго критерия целесообразно в ситуациях, когда параметры энергетических затрат потребителя определены.

Суммарная мощность P_{Σ} на временном отрезке T :

$$P_{\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T (0,5 N_{\text{в}} \rho_{\text{в}} S_{\text{в}} V_{\text{в}}^3 \eta_{\text{вд}} \eta_{\text{в}} + R_{\text{с}} N_{\text{с}} S_{\text{с}} \eta_{\text{сп}} \eta_{\text{с}} + 0,5 N_{\text{г}} \rho_{\text{г}} S_{\text{г}} V_{\text{г}}^3 \eta_{\text{гт}} \eta_{\text{г}}) dt. \quad (6)$$

Суммарная мощность, рассеянная балластным сопротивлением мощностью P_{σ} на временном отрезке T , определяется зависимостью:

$$P_{\Sigma 6} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{\sigma} dt. \quad (7)$$

Работоспособность автономного электрогенерирующего комплекса на базе тех-

нологий альтернативной энергетики связана с применением не всегда стабильных источников энергии, для оценки безопасности электроснабжения потребителя автор предлагает ввести коэффициент безопасности K_6 , значение которого определяет вероятность ситуации, когда энергообеспечение потребителя в полном объёме оказывается невозможным. Значение K_6 рассчитывается по следующей формуле:

$$K_6 = 1 - \int_0^T \frac{\Delta P}{P_{\Sigma} + P_a} dt; \quad (8)$$

$$\Delta P = \begin{cases} P_{\Sigma} + P_a - P_{\text{п}} & \text{при } P_{\Sigma} + P_a - P_{\text{п}} < 0 \\ 0 & \text{при } P_{\Sigma} + P_a - P_{\text{п}} \geq 0. \end{cases}$$

В выражении (8) P_a – мощность аккумулирующей системы, $P_{\text{п}}$ – мощность потребителя. Точность расчётов по формулам (6)–(8) будет зависеть от рассматриваемого временного отрезка T . Существующие в настоящее время базы данных метеороло-

гических наблюдений охватывают период в несколько десятилетий, что гарантирует достаточно высокую точность.

Проектирование системы автономного электроснабжения сформулируем как задачу минимизации n целевых функций

(критериев) $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$, являющихся компонентами n -мерного вектора $\{\Phi\}$, значение которого зависит от m варьируемых параметров X_1, X_2, \dots, X_m или вектора $\{X\}$ и достигает минимума при $X = X^*$. Область допустимых значений U_x вектора X – совокупность уравнений и неравенств, связывающих между собой его компоненты. Таким образом, в общем случае для определения структуры и параметров электрогенерирующего комплекса имеем многокритериальную задачу оптимизации, которую запишем в виде

$$\min_{X \in U_x} \Phi(X) = \Phi(X^*). \quad (9)$$

На данном этапе исследований будем рассматривать следующие два варианта задачи расчёта параметров и структуры электрогенерирующего комплекса:

1. Имеем территорию с заданной конфигурацией, площадью, ландшафтом и географическим расположением. Требуется опреде-

лить структуру и параметры автономного электрогенерирующего комплекса, позволяющего при минимальной его стоимости сгенерировать за определённый отрезок времени максимальное количество энергии.

2. Определена конфигурация, площадь, ландшафт, географическое расположение территории генерирующего комплекса и характеристики потребления вырабатываемой им энергии. Требуется определить структуру и параметры автономного электрогенерирующего комплекса, позволяющего при минимальной его стоимости в течение определённого отрезка времени обеспечить выработку достаточного количества электроэнергии.

Таким образом, в (9) имеем вектор $\{\Phi\}$ размерностью 2, компоненты которого в соответствии с (1):

$$\Phi_1 = C_b \cdot N_b + C_c \cdot N_c + C_r \cdot N_r + C_a \cdot N_a, \quad (10)$$

а Φ_2 для 1-го варианта в соответствии с (6):

$$\Phi_2 = \frac{T}{\int_0^T (0,5 N_b \rho_b S_b V_b^3 \eta_{вд} \eta_b + R_c N_c S_c \eta_{сп} \eta_c + 0,5 N_r \rho_r S_r V_r^3 \eta_{гр} \eta_r) dt} \quad (11)$$

и Φ_2 для 2-го варианта в соответствии с (7):

$$\Phi_2 = \frac{T}{\int_0^T P_0 dt} \quad (12)$$

Варьируемыми параметрами, компонентами вектора $\{X\}$ в общем случае будут являться:

– для ВЭГ – N_b, D, h_1 и H , если ВЭУ с вертикальной осью (2), (3);

– для ФЭП – N_c (4); угол установки ФЭП, как было показано выше, может быть оптимизирован (рис. 3) вне решения задачи (9);

– для плотинных ГЭС – N_r, D, H_r (5) и свободнопоточных ГЭС – N_r, S_r, V_r ;

– для систем аккумулирования электроэнергии это количество аккумуляторных батарей, соединённых параллельно.

Изменение значений варьируемых параметров возможно лишь в определённых пределах, установленными характеристиками территории расположения электрогенерирующего комплекса, а также с учётом их взаимосвязи.

Таким образом, работоспособность автономного энергетического комплекса зависит от количественного соотношения ветроэлектрических генераторов, фотоэлек-

трических преобразователей, гидроэлектрических генераторов и аккумулирующих устройств, определяющих его структуру и их характеристик. Параметры структуры автономного энергокомплекса, характеристики генерирующих устройств и свойства функции использования потребителем энергии взаимосвязаны между собой. Эффективность системы автономного электроснабжения, как показали исследования, определяется значениями двух основных критериев: стоимости и мощности энергокомплекса, а также значением вспомогательной характеристики – коэффициентом безопасности. В соответствии с выражением (9) расчёт автономного комплекса энергоснабжения – это задача многокритериальной оптимизации, целью которой является определение его структуры, характеристик генерирующих устройств и, возможно, параметров функции использования потребителем вырабатываемой энергии в рамках рационального соотношения стоимости и энергетических показателей генерирующих мощностей.

Для реализации возможностей компьютерного моделирования автономных энергетических комплексов (АЭК), построенных на базе возобновляемых источников энергии, разработана программа для ЭВМ

«Технологии альтернативной энергетики (ТАЭ)» [3, 4], позволяющая как решать задачи имитационного моделирования этих комплексов, так и выполнять оптимизацию их структуры и параметров в соответствии с (9)–(12).

Список литературы

1. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К., Солнечная энергетика: учебное пособие для вузов / под ред. В.И. Виссарионова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 317 с.
2. Кривченко Г.И. Гидравлические машины: Турбины и насосы: учебник для вузов. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.
3. Свид. 2012660892 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Технологии альтернативной энергетики (ТАЭ) / В.В. Телегин; заявитель и правообладатель Телегин Валерий Викторович (RU). – № 2012660892; заявл. 22.10.12; опубл. 30.11.12, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
4. Телегин В.В. Компьютерное моделирование эффективности использования систем альтернативной энергетики // Естественные и технические науки. – 2012 – № 5(61). – С. 309–312.
5. Харитонов В.П. Автономные ветроэнергетические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

References

1. Vissarionov V.I., Derjugina G.V., Kuznecova V.A., Malinin N.K., Solnechnaja jenergetika: Uchebnoe posobie dlja vuzov [Solar power: Manual for higher education institutions]. Moscow, Publishing house MEI, 2008, 317 p.

zov Solnechnaja jenergetika: Uchebnoe posobie dlja vuzov [Solar power: Manual for higher education institutions]. Moscow, Publishing house MEI, 2008, 317 p.

2. Krivchenko G.I. Gidravlicheskie mashiny: Turbiny i nasosy. Uchebnik dlja vuzov [Hydraulic machines: Turbines and pumps. The textbook for higher education institutions]. Moscow. Energy. 1978, 320 p.

3. Certificate 2012660892 Russian Federation. Certificate on the state registration of the computer program. Technologies of alternative energy (TAE). author V.V. Telegin; applicant and owner Telegin Valery Viktorovich (RU). – No. 2012660892; it is declared 22.10.12; it is published 30.11.12, Registry of the computer programs. 1 p.

4. Telegin V.V. Komp'yuternoe modelirovanie jeffektivnosti ispol'zovanija sistem al'ternativnoj jenergetiki [Computer modeling of efficient use of alternative energy systems]. Natural and technical science. 2012, no. 5(61), pp. 309–312.

5. Haritonov V.P. Avtonomnye vetrojenergeticheskie ustanovki [Autonomous wind power installations]. Moscow. GNU VIESKH. 2006, 280 p.

Рецензенты:

Шпиганович А.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрооборудования, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк;

Мещеряков В.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электропривода, Липецкий государственный технический университет, г. Липецк.

Работа поступила в редакцию 01.07.2013.