



УДК 620.92

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**© Д.Н. Карамов<sup>1</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,  
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

Представлена математическая модель автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии и аккумуляторные батареи. Описаны принципы распределения нагрузки по агрегатам с определением основных эксплуатационных параметров с заданным шагом дискретизации. Применение разработанной модели демонстрируется на примере оптимизации состава оборудования реальной автономной системы электроснабжения.

*Ключевые слова:* автономные системы электроснабжения; фотоэлектрические преобразователи; ветроэнергетические установки; дизельные электростанции; аккумуляторные батареи; оптимизация состава оборудования; энергетическая эффективность.

**MATHEMATICAL MODELING OF AN AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM USING RENEWABLE ENERGY SOURCES**

D.N. Karamov

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,  
130 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

A mathematical model of the autonomous power supply system using renewable energy sources and storage batteries is introduced. The principles of load dispatching by the units with the determination of key operational parameters with the specified sampling interval are described. The application of the developed model is demonstrated on the example of equipment set optimization at a real autonomous power supply system.

*Keywords:* autonomous power supply system; photovoltaic converter; wind-driven power plants; diesel power plants; rechargeable batteries; equipment set optimization; energy efficiency.

**Введение**

Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) играют заметную роль в электроэнергетике различных стран. Вместе с тем в РФ их доля в выработке электроэнергии в настоящее время незначительна, однако в последнее время наблюдается тенденция к ее росту. К настоящему времени реализованы следующие проекты: фотоэлектрическая станция (ФЭС) – 5000 кВт (с. Кош-Агач, Республика Алтай), ФЭС – 1000 кВт (первая очередь – 4000 кВт) (п. Батагай, Якутия), ветроэнергетическая станция (ВЭС) – 250 кВт (п. Тикси, Якутия), ВЭС – 275 кВт (п. Усть-Камчатск), ВЭС – 550 кВт (о. Беринга) и др. [1, 2]. Значительная часть указанных генерирующих мощностей вводится в автономных системах электроснабжения.

По различным оценкам в ближайшие 5–10 лет ожидается ввод новых генерирующих мощностей на базе ВИЭ до 6–10 ГВт [3].

Сегодня одной из самых актуальных является задача оптимизации автономной системы электроснабжения (АСЭС), использующей ВИЭ и накопителя энергии. Опыт российских и зарубежных исследовательских коллективов показывает, что комбинированное применение ВИЭ и накопителей энергии в АСЭС является экономически эффективным способом энергообеспечения потребителей. В сравнении с дизельными электростанциями комбинированное применение ВИЭ и накопителей энергии в несколько раз уменьшает выбросы углекислого газа, значительно сокращает зависимость от привозного топлива, улучшает экологическую обстановку [4, 5].

Вопросам моделирования и оптимизации АСЭС, использующих ВИЭ и накопителя энергии, посвящено значительное число работ, выполненных как в нашей стране, так и за рубежом. В первую очередь следует отметить работы [6–9], на базе которых созданы программные комплексы, позволяющие решать задачи оптимизации АСЭС. Наиболее распространены следующие оптимизационные комплексы: HOGA – Hybrid optimization by genesis algorithm (Испания), HOMER – Hybrid optimization modeling software (США), HYPORA – Hybrid power optimized for rural/remote areas (США). Среди преимуществ указанных оптимизационных комплексов следует отметить, что они решают задачу оптимизации АСЭС с выбором оптимального соотношения генерирующих мощностей. Также представленные оптимизационные комплексы имеют удобный интерфейс для пользователя, что делает работу более комфортной. Кроме того, имеются открытые бета-версии для ознакомления пользователя с возможностями оптимизационных комплексов, что в свою очередь позволяет наиболее эффективно подобрать программу для решаемой задачи.

В то же время представленные оптимизационные комплексы имеют и недостатки, к которым можно отнести

<sup>1</sup>Карамов Дмитрий Николаевич, аспирант, тел.: 89246096552, e-mail: dmitriy.karamov@mail.ru  
Karamov Dmitriy, Postgraduate, tel.: 89246096552, e-mail: dmitriy.karamov@mail.ru



следующие:

1. Использование в расчетах среднемесячной солнечной радиации.
2. Использование распределения скоростей ветра, построенного на основе среднегодовой скорости ветра, и отсутствие учета случайного характера динамики этой скорости.
3. Применение среднегодовой нагрузки (HYPORA).
4. Отсутствие учета влияния температуры окружающей среды на вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотоэлектрических преобразователей и на выработку электроэнергии ветроэнергетических установок.
5. Отсутствие электрических расчетов мгновенных режимов и учета потерь мощности.
6. Отсутствие возможности (у пользователя) дополнять АСЭС новыми элементами.

В связи с вышеуказанными недостатками зарубежных оптимизационных комплексов возникла задача разработки отечественной модели автономной АСЭС, учитывающей: достаточно детальный график нагрузок потребителя, стохастичность интенсивности солнечного излучения, температуру окружающей среды, электрические потери, основные эксплуатационные параметры АСЭС и более детально учитывающей случайный характер динамики скорости ветра.

Реализация подобной модели позволяет решать более качественно следующие задачи:

1. Определение оптимального соотношения генерирующих мощностей.
2. Выбор оптимального типоразмера оборудования.
3. Выбор вспомогательного оборудования.

Актуальность разработки подобной модели состоит в том, что еще на стадии проектирования реальной АСЭС становится возможным не только решить задачу выбора оптимального соотношения генерирующих мощностей, но и выполнить проверку работоспособности АСЭС. Автором была разработана модель АСЭС, использующей ВИЭ и накопители энергии (НЭ). Реализована модель в среде имитационного моделирования Matlab/Simulink, так как это наиболее подходящая графическая среда, позволяющая при помощи блок-диаграмм в виде направленных графов строить модели элементов АСЭС.

#### **Расчетная модель АСЭС**

В математической модели АСЭС реализованы модели устройств генерации, распределения, преобразования и передачи электроэнергии.

В модель генерирующих устройств включены фотоэлектрические преобразователи (ФЭП), ветроэнергетические установки (ВЭУ), дизельные электростанции (ДЭС), аккумуляторные батареи (АБ).

При моделировании основных генерирующих устройств используются модели, разработанные как российскими, так и зарубежными коллективами. Модель ФЭП, описанная в [10], позволяет учитывать влияние внешних погодных условий на ВАХ ФЭП. Моделирование ВЭУ основано на работах [11, 12]. Модель позволяет по мгновенным характеристикам скорости ветра, параметрам окружающей среды и конструктивным характеристикам ВЭУ определить ее моментальную генерируемую мощность. Описание рабочих параметров АБ с учетом мгновенных режимов и электрических потерь выполняется по моделям, представленным в [13, 14], а ДЭС по методике, изложенной в [15].

Поскольку не всегда имеется возможность размещать ВЭУ и ФЭП вблизи потребителя, то в расчетной модели предусмотрены объекты преобразования и передачи электроэнергии. Используемые модели элементов преобразования и передачи электроэнергии выполнены на основе следующих работ: трансформаторы (ТР), воздушные линии (ВЛ) [16], силовые инверторы (СИН), выпрямители (ВП) [17, 18, 19].

В рамках расчетного комплекса разработана программа по определению астрономических параметров Солнца, исходя из координат местности, месяца, числа и часа расчетного периода [20, 21]. В работе для учета случайного характера климатических данных и динамики их изменения используются результаты замеров практически повсеместно расположенных автоматических метеостанций. С использованием результатов указанных замеров климатических данных, представленных в работе [22], создается массив, описывающий с шагом один час следующие параметры окружающей среды: температура наружного воздуха, °С; давление воздуха, кПа; облачность, %; скорость ветра на высоте 10 метров, м/с. Как правило, число лет метеонаблюдений для удаленных населенных пунктов находится в интервале от 5 до 12. На рис. 1 представлен общий вид модели АСЭС, использующей ВИЭ и АБ.

#### **Принципы распределения нагрузки по агрегатам**

Одной из основных задач, решаемых для каждого часа расчетного периода, является распределение нагрузок между генерирующими мощностями. В настоящей работе для решения данной задачи используется следующий подход.

1. Определяется (исходя из климатических условий и астрономических параметров Солнца) потенциально-возможная выработка электроэнергии ФЭП и ВЭУ (при их заданной установленной мощности).
2. Определяются потери активной мощности при передаче потенциально-возможной выработки ФЭП и ВЭУ до потребителя.
3. Если поступающая к потребителю суммарная мощность ФЭП и ВЭУ не меньше нагрузки потребителя, то вся она покрывается за счет ВИЭ.
4. Если наблюдается избыток мощности, то он поступает на зарядку накопителей. В случае, когда накопители уже заряжены полностью, то на соответствующую величину сокращается мощность ВИЭ. Причем первоначально

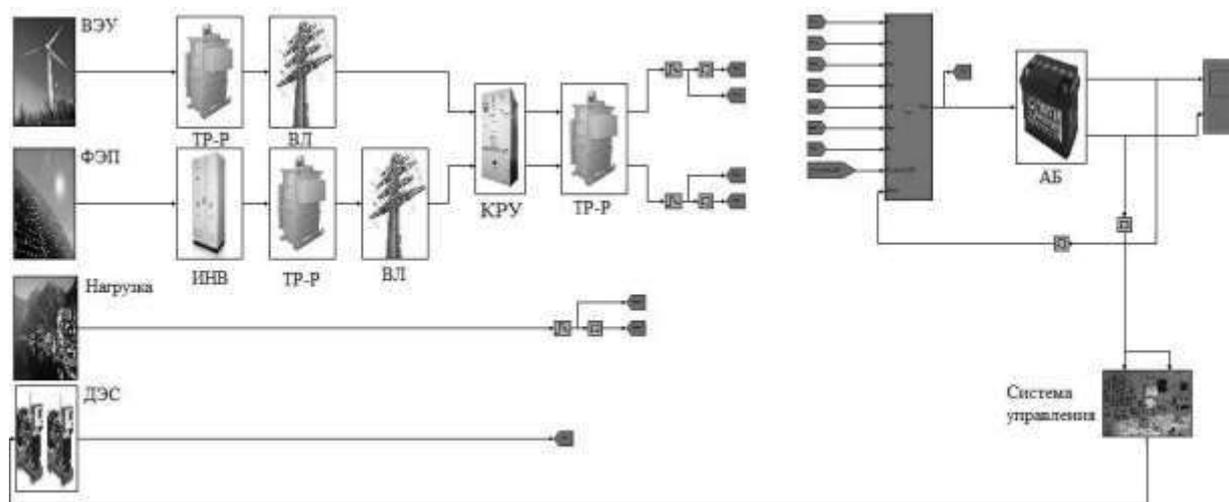


чально регулируются ВЭУ (как наиболее изнашивающиеся), а затем ФЭП.

5. Если суммарная мощность ВИЭ меньше нагрузки потребителей, то недостаток мощности покрывается за счет накопителей.

6. Если накопители разряжены (заряд 30% от номинального), то включается ДЭС. Он включается на полную мощность и отключается при достижении зарядом накопителя некоторого порогового значения (50% от номинального).

7. Если мощность ДЭС совместно с ВИЭ при разряженном накопителе меньше нагрузки потребителя, то имеет место недоотпуск электроэнергии.



**Рис. 1. Общий вид модели АСЭС, использующей ВИЭ и АБ\***

\*ВЭУ, ФЭП, НАГРУЗКА, ДЭС, ТР-Р, ВЛ, КРУ, АБ, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ – блок расчета ветроэнергетических установок, фотоэлектрических преобразователей, нагрузки, дизельной электростанции, трансформаторов, воздушных линий, комплектных распределительных устройств, аккумуляторных батарей, системы управления.

Математическое описание представленного принципа распределения нагрузок по элементам АСЭС имеет следующий вид.

Максимально возможная выработка электроэнергии ВЭУ и ФЭП:

$$P_{ВЭУ}(t) = \frac{\rho(t)}{2} \cdot F_{ВЭУ} \cdot V_B^3(t) \cdot C_p, \tag{1}$$

где  $\rho(t)$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $V_B(t)$  – скорость ветра на высоте установки ветроколеса, м/с;  $F_{ВЭУ}$  – ометаемая площадь ВЭУ, м<sup>2</sup>;  $C_p$  – коэффициент мощности ВЭУ, о.е.;  $(t)$  – текущий момент времени.

$$P_{ФЭП}^{max}(t) = I_c(t) \cdot S \cdot k_p \cdot \eta, \tag{2}$$

где  $I_c(t)$  – интенсивность солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $S$  – площадь фотоэлемента, м<sup>2</sup>;  $k_p$  – коэффициент, учитывающий влияние температуры для мощности, о.е.;  $\eta$  – номинальный КПД солнечного элемента, о.е.;  $(t)$  – текущий момент времени.

Функция мощности находится как:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{ВЭУ}^{max}(t) + P_{ФЭП}^{max}(t) - \sum \Delta P(t) - P_H(t), \tag{3}$$

где  $P_H(t)$  – нагрузка потребителя, кВт.

$\sum \Delta P(t)$  – суммарные электрические потери СЭС.

$$\begin{aligned} \sum \Delta P(t) = & \Delta P_{ТР-ФЭП}(t) + \Delta P_{ТР-ВЭУ}(t) + \Delta P_{ИНВ}(t) + \Delta P_{ВЛ-ФЭП} + \Delta P_{ВЛ-ВЭУ}(t) + \\ & + \Delta P_{ТР-общ}(t) + \Delta P_{АБ}(t) + \Delta P_{СН}(t) + \Delta P_{ИНВ1}(t), \end{aligned} \tag{4}$$

где  $\Delta P_{ТР-ФЭП}$ ,  $\Delta P_{ТР-ВЭУ}(t)$ ,  $\Delta P_{ТР-общ}(t)$  – электрические потери в трансформаторах, кВт;  $\Delta P_{ВЛ-ФЭП}$ ,  $\Delta P_{ВЛ-ВЭУ}$  – электрические потери в воздушных линиях, кВт;  $\Delta P_{ИНВ}(t)$ ,  $\Delta P_{ИНВ1}(t)$  – электрические потери в инверторах, кВт;  $\Delta P_{АБ}(t)$  – электрические потери в аккумуляторных батареях, кВт;  $\Delta P_{СН}(t)$  – электрические потери в стабилизаторе напряжения, кВт.



Функция мощности  $P_{\Sigma}(t)$  является знакопеременной функцией. Если  $P_{\Sigma}(t)$  имеет положительный знак, следовательно, генерируемой мощности от источников, использующих ВИЭ, достаточно для прямого снабжения потребителя и заряда АБ.

$$P_{\Sigma}(t)^+ = \begin{cases} P_{\Sigma}(t); (P_{\Sigma}(t) > 0) \wedge (Q_{AB}^{\max} - Q_{AB}^{TM}(t)) \geq \eta_{AB} \cdot \eta_{ВЫП} \cdot P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t \\ \frac{Q_{AB}^{\max} - Q_{AB}^{TM}(t)}{\Delta t}; (P_{\Sigma}(t) > 0) \wedge (Q_{AB}^{\max} - Q_{AB}^{TM}(t)) < \eta_{AB} \cdot P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t, \\ 0; (P_{\Sigma}(t) < 0). \end{cases} \quad (5)$$

Если же  $P_{\Sigma}(t)$  имеет отрицательный знак, то генерируемой мощности не достаточно для потребителя, и остаток недостающей мощности извлекается из АБ.

$$P_{\Sigma}(t)^- = \begin{cases} P_{\Sigma}(t); (P_{\Sigma}(t) < 0) \wedge (Q_{AB}^{\min} - Q_{AB}^{TM}(t)) \geq \frac{P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{ИНВ}} \\ \frac{Q_{AB}^{\min} - Q_{AB}^{TM}(t)}{\Delta t} \cdot \eta_{ИНВ}; (P_{\Sigma}(t) < 0) \wedge (Q_{AB}^{\min} - Q_{AB}^{TM}(t)) < \frac{P_{\Sigma}(t) \cdot \Delta t}{\eta_{ИНВ}}, \\ 0; (P_{\Sigma}(t) > 0), \end{cases} \quad (6)$$

где выражение фактической емкости АБ:

$$Q_{AB}(t) = Q_{AB}(t-1) + (P_{\Sigma}(t)^+ + P_{\Sigma}(t)^-) \Delta t. \quad (7)$$

Выходная мощность ДЭС при выполнении (8) и (9) равна максимальной мощности ДЭС до тех пор, пока (5) и (9) не выполняются.

*Выходная мощность ВЭУ и ФЭП с учетом регулирования мощности*

В случае недостатка мощности от источников, использующих ВИЭ и АБ, в работу включается ДЭС. Для определения момента включения ДЭС и регулирования выходной мощности ВЭУ и ФЭП вводится понятие «балансовой мощности системы (БМС)».

$$P_{БМС}(t) = P_H(t) + \sum \Delta P(t) - P_{ВЭУ}^{\max}(t) - P_{ФЭП}^{\max}(t) - (P_{\Sigma}(t)^+ + P_{\Sigma}(t)^-). \quad (8)$$

В зависимости от «балансовой мощности системы» генерируемые мощности ВЭУ, ФЭП и ДЭС определяются из выражений:

$$P_{ДЭС}(t) = \begin{cases} 0; P_{БМС}(t) \leq 0 \\ P_{БМС}(t); (P_{БМС}(t) > 0) \wedge (P_{БМС}(t) \leq P_{ДЭС}^{УСТ}) \\ P_{ДЭС}^{УСТ}; (P_{БМС}(t) > 0) \wedge (P_{БМС}(t) > P_{ДЭС}^{УСТ}), \end{cases} \quad (9)$$

$$P_{ВЭУ}(t) = \begin{cases} P_{ВЭУ}^{\max}(t); P_{БМС}(t) \geq 0 \\ P_{ВЭУ}^{\max}(t) + P_{БМС}(t); (P_{БМС}(t) < 0) \wedge ((P_{ВЭУ}^{\max}(t) + P_{БМС}(t)) \geq 0) \\ 0; (P_{БМС}(t) < 0) \wedge ((P_{ВЭУ}^{\max}(t) + P_{БМС}(t)) < 0), \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{ФЭП}(t) = \begin{cases} P_{ФЭП}^{\max}(t); (P_{ВЭУ}(t) > 0) \\ (-P_{БМС}(t) - P_{ВЭУ}^{\max}(t)); (P_{ВЭУ}^{\max}(t) = 0). \end{cases} \quad (11)$$

По генерируемой мощности ДЭС определяется его часовой расход топлива. Представленные расчеты проводятся для каждого часа расчетного периода, для которого имеются замеры автоматическими метеостанциями. Затем определяются среднегодовые показатели (расход топлива, выработка электроэнергии ДЭС, ВЭУ и ФЭП). На их основе проводятся расчеты критерия экономической эффективности.

#### **Определение состава оборудования АЭС**

Цель – нахождение оптимального соотношения генерирующих мощностей и вспомогательного оборудования при минимальной стоимости кВт\*ч. Для сравнения вариантов применяется методика уравниваемой стоимости электроэнергии (Levelized cost of electricity; LCOE) [23, 24]. LCOE – это стоимость электроэнергии, отпускаемой непосредственно с электростанции, использующей ВИЭ.

Целевая функция имеет вид:



$$LCOE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{K_i + M_i + F_i}{(1+r)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{(1+r)^i}},$$

где  $K_i$  – капиталовложения;  $M_i$  – эксплуатационные расходы;  $F_i$  – топливные издержки;  $E_i$  – производство электроэнергии, кВт\*ч;  $r$  – коэффициент дисконтирования;  $n$  – число лет расчетного периода,  $g$ ; подстрочным индексом  $i$  обозначены величины, относящиеся к  $i$  году расчетного периода.

Капиталовложения по элементам АСЭС имеют следующий вид:

$$K_i = K_{ФЭП_i} + K_{ВЭУ_i} + K_{ДГ_i} + K_{АБ_i} + K_{СИН_i} + K_{ТР-ФЭП_i} + K_{ВЛ-ФЭП_i} + K_{ТР-ВЭУ_i} + K_{ВЛ-ВЭУ_i} + K_{ТР-ОБЩ_i} + K_{ВП_i} + K_{ИН_i},$$

где  $K_{ФЭП_i}$ ,  $K_{ВЭУ_i}$ ,  $K_{ДГ_i}$ ,  $K_{АБ_i}$ ,  $K_{СИН_i}$ ,  $K_{ТР_i}$ ,  $K_{ВЛ_i}$ ,  $K_{ВП_i}$ ,  $K_{ИН_i}$  – соответственно капиталовложения в фотоэлектрические преобразователи, ветроэнергетические установки, дизель-генераторы, аккумуляторные батареи, силовые инверторы, трансформатор, воздушные линии, выпрямители, инверторы.

Эксплуатационные расходы по элементам АСЭС имеют вид:

$$M_i = M_{ФЭП_i} + M_{ВЭУ_i} + M_{ДГ_i} + M_{АБ_i} + M_{СИН_i} + M_{ТР-ФЭП_i} + M_{ВЛ-ФЭП_i} + M_{ТР-ВЭУ_i} + M_{ВЛ-ВЭУ_i} + M_{ТР-ОБЩ_i} + M_{ВП_i} + M_{ИН_i},$$

где  $M_{ФЭП_i}$ ,  $M_{ВЭУ_i}$ ,  $M_{ДГ_i}$ ,  $M_{АБ_i}$ ,  $M_{СИН_i}$ ,  $M_{ВП_i}$ ,  $M_{ИН_i}$  – соответственно эксплуатационные расходы на фотоэлектрические преобразователи, ветроэнергетические установки, дизель-генераторы, аккумуляторные батареи, силовые инверторы, трансформаторы, воздушные линии, выпрямители, инверторы.

Производство электроэнергии по элементам АСЭС имеет следующий вид:

$$E_i = E_{ФЭП_i} + E_{ВЭУ_i} + E_{ДГ_i} + E_{АБ_i},$$

где  $E_{ФЭП_i}$ ,  $E_{ВЭУ_i}$ ,  $E_{ДГ_i}$ ,  $E_{АБ_i}$  – производство электроэнергии фотоэлектрическими преобразователями, кВт\*ч; ветроэнергетическими установками, кВт\*ч; дизель-генераторами, кВт\*ч; аккумуляторными батареями, кВт\*ч.

В качестве примера рассмотрим АСЭС «Усть-Миль» Усть-Майского района Республики Саха (Якутия).

При оптимизации АСЭС предлагается рассмотреть следующее оборудование (табл. 1).

Таблица 1

Параметры элементов генерации АСЭС\*

ФЭП	$P_{уст}$ , кВт	$U_{опт}$ , В	КПД
ТСМ-250А	0,250	31	0,20
ВЭУ	$P_{уст}$ , кВт	$V_{стр}$ , м/сек	–
Sokol Air Vertica-10	10	1,8	0,4
АБ	$Q_{уст}$ , А*ч	$U_{АБ}$ , В	–
DT(Delta-12-200)	200	12	0,95
ДГ	$P_{уст}$ , кВт	$Q_{ном}$ , л/кВт*ч	–
ЯМЗ-238-200	200	0,350	0,35

\*где  $P_{уст}$  – единичная установленная мощность агрегата;  $Q_{уст}$  – установленная емкость АБ;  $U_{опт}$  – напряжение ФЭП в точке максимального отбора мощности;  $U_{АБ}$  – номинальное напряжение АБ;  $V_{стр}$  – скорость страгивания ВЭУ;  $Q_{ном}$  – номинальный расход дизельного топлива на производство, кВт\*ч.

Технико-экономические показатели основного генерирующего оборудования представлены в табл. 2.

Экономические и эксплуатационные параметры элементов АСЭС вносятся в расчетную модель. Для оптимизации вариантов разработана программа, использующая метод покоординатного спуска, в соответствии с которым все оптимизируемые параметры (кроме одного) фиксируются, а один оптимизируется. Затем оптимизируется второй параметр, а первый фиксируется на ранее найденном оптимальном значении. Такой процесс повторяется до тех пор, пока ни один параметр не может быть улучшен. При определении LCOE коэффициент дисконтирования принимался равным 0,09.

На рис. 2 показано поведение целевой функции на шагах покоординатного спуска.

1 шаг – оптимизируется установленная мощность ФЭП при установленной мощности ВЭУ равной нулю и емкости АБ – 2400 кВт\*ч;

2 шаг – оптимизируется установленная мощность ВЭУ при установленной мощности ФЭП 250 кВт и емкостью АБ – 2400 кВт\*ч;

3 шаг – оптимизируется установленная емкость АБ при установленной мощности ФЭП 250 кВт и ВЭУ равной



нулю соответственно.

Дальнейшее повторение оптимизации ФЭП не дало улучшения целевой функции.

Таблица 2

Экономические показатели элементов АСЭС\*

ФЭП	К, руб	М, % от $K_i$	$M_{уст}$ , % от $K_i$	$K_{прк}$
ТСМ-250А	16950	2	25	1,7
ВЭУ	—	—	—	—
Sokol Air Vertica-10	560000	2	25	1,7
АБ	—	—	—	—
DT(Delta-12-200)	17530	1	25	1,7
ДГ	—	—	—	—
ЯМЗ-238-200	1860000	7	10	1,7

\* где К – капиталовложения; М – доля годовых издержек от капиталовложений;  $M_{уст}$  – доля затрат от капиталовложений на доставку и установку оборудования;  $K_{прк}$  – повышающий районный коэффициент.

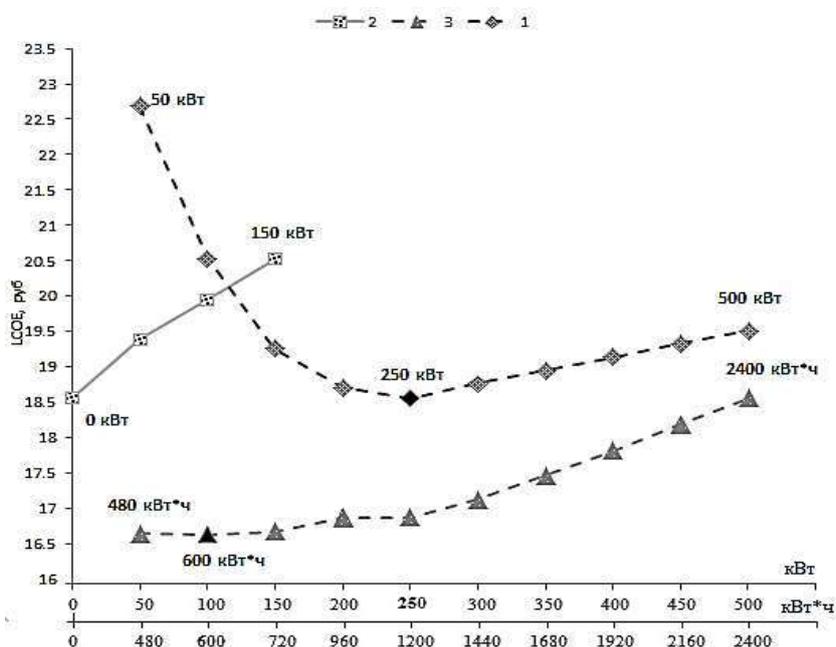


Рис. 2. Поведение целевой функции АСЭС

Согласно полученным результатам, оптимальной технологией производства электроэнергии для АСЭС «Усть-Миль» является фото-дизельный комплекс с аккумуляторными батареями (ФЭП-ДЭС-АБ). На рис. 3 представлена генерируемая мощность ФЭП.

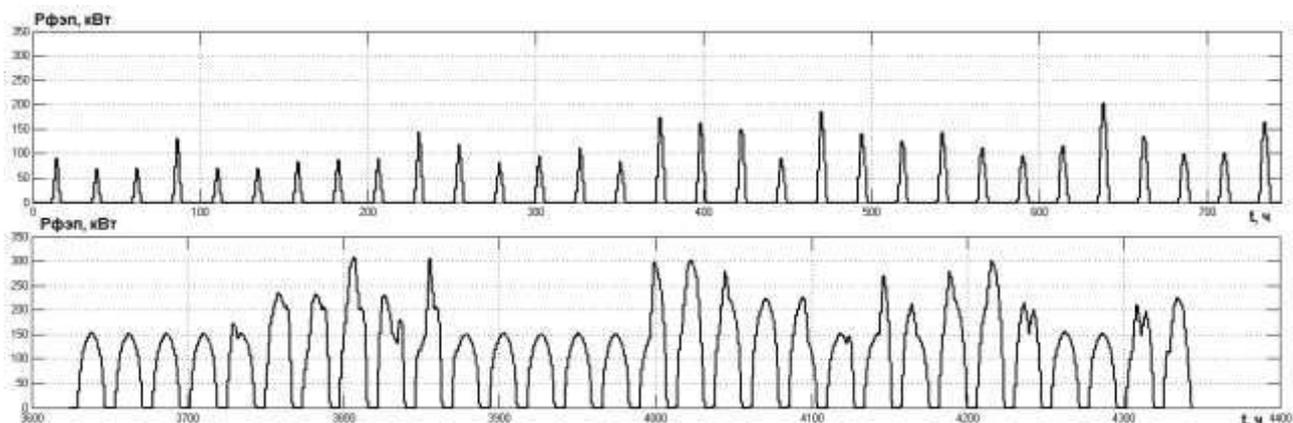


Рис. 3. Генерируемая мощность ФЭП в январе (вверху) и июне (внизу) первого года расчетного периода



На рис. 4 показано изменение состояния заряда АБ. По результатам видно, что в зимний период значение заряда АБ существенно меньше, чем в летний.

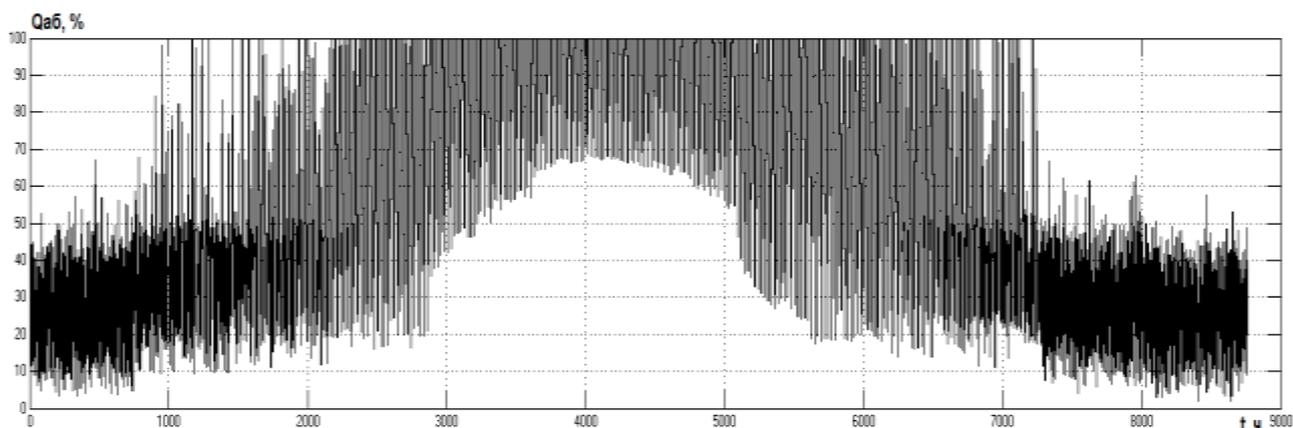


Рис. 4. Изменение емкости аккумуляторной батареи\*

\*Представлен результат расчета первого года эксплуатации.

В табл. 3 представлены установленные мощности и экономические показатели полученного оптимального варианта и существующей компоновки АСЭС «Усть-Миль».

Таблица 3

**Установленные мощности и экономические показатели вариантов АСЭС «Усть-Миль»**

ВЭУ	ФЭП	АБ*	ДГ	Капитальные вложения, млн руб.	Годовой расход топлива, л	Годовая выработка по элементам, млн кВт*ч	Стоимость кВт*ч, руб.
Вариант 1 (Существующий вариант электроснабжения от ДЭС)						ДЭС	22,34
0	0	0	200	3,72	224523	641494,2	
Вариант 2 (Оптимальный вариант ФЭП-ДЭС-АБ)						ФЭП	16,63
0	250	50000 (600)	200	30,42	112910	318915	
						ДЭС	322600

\* Суммарная емкость АБ, А\*ч (кВт\*ч).

**Выводы**

1. Представлена методика оптимизации АСЭС, использующей ВИЭ и АБ. На основании описанной методики реализована математическая модель АСЭС. Разработанная модель позволяет решать задачи оптимизации, а именно, нахождение оптимального соотношения генерирующих мощностей, выбора оптимального единичного типоразмера оборудования и установленных мощностей вспомогательного оборудования.

2. Применение методики демонстрируется на примере АСЭС «Усть-Миль». Итоговые результаты показывают, что комбинированное применение ФЭП-ДЭС-АБ (вариант 2) обеспечивает получение наиболее дешевой электроэнергии за счет сокращения расхода дизельного топлива по сравнению с существующим чисто дизельным вариантом.

Статья поступила 16.06.2015 г.

**Библиографический список**

1. Крупнейшая в России Кош-Агачская солнечная электростанция мощностью 5 МВт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.akm.ru> (15.06.2015).
2. Программа инновационного развития Холдинга ОАО «РАО Энергетические системы Востока» на период до 2015 года с перспективой до 2020 года [Электронный ресурс]. URL: <http://rao-esv.ru/upload/medialibrary/d95/> (15.06.2015).
3. Государственная программа РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики»: постановление Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 321 [Электронный ресурс]. URL: <http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/b6b/b6b29df2dcbb578dc1073b4fb18f9412.pdf> (14.06.2015).
4. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. М.: Энергоатомиздат, 2008. 231 с.
5. Карамов Д.Н. Актуальность применения возобновляемых источников энергии в децентрализованных населенных пунктах России на примере Ленского района Республики Саха (Якутия) // Вестник ИргТУ. 2013. № 11 (82). С. 279–283.
6. Minna Ranjeva, Anil K. Kulkarni. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote // Rural Areas. Energy Procedia. 2012. V. 20. P. 258–270.
7. Experimental analysis of a solar PV/diesel hybrid system without storage: Focus on its dynamic behavior / D. Yamegueu, Y. Azoumah, X. Py, H. Kottin. // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2013. V. 44. P. 267–274.
8. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV–wind–diesel systems with batteries storage /



- Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Agustín, José M. Yusta-Loyo, José A. Domínguez-Navarro, Ignacio J. Ramírez-Rosado, Juan Lujano, Ismael Aso // *Applied Energy*. 2011. V. 88. P. 4033–4041.
9. Сурков М.А., Пупасов-Максимов А.М., Чернов Д.Е. Применение экспериментального программного комплекса «Power System Simulation» и оценка возможности укрупненного зонирования территории Российской Федерации на оптимальные структуры комплексов с участием возобновляемых энергоресурсов // Интернет-журнал «Науковедение». 2012. Т. 3. С. 1–10.
10. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
11. Стычинский З.А., Воропай Н.И. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика. Магдебург – Иркутск, 2010. 215 с.
12. *Wind Energy*. Peter Musgrove // Cambridge university press, 2010. 323 p.
13. Thomachan A. Kattakayam, K. Srinivasan. Lead acid batteries in solar refrigeration systems // *Renewable Energy*. 2004. V. 29. P. 1243–1250.
14. Tremblay O., Dessaint L. Experimental validation of a battery dynamic model for EV application // *World Electric Vehicle Journal*. 2009. I 3. P. 1–10.
15. Erkan Dursun, Osman Kilic. Comparative evaluation of different power management strategies of a stand-alone PV/Wind/PEMFC hybrid power system // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2012. 34. P. 81–89.
16. Карапетян И.Г., Файбисович Д.Л., Шапиро И.М. Справочник по проектированию электрических сетей. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во «Энас». 2012. 376 с.
17. Salas V., Alonso-Abella M., Chenlo F., Olias E. Analysis of the maximum power point tracking in the photovoltaic grid inverters of 5kW // *Renewable Energy*. 2009. V. 37. P. 2366–2372.
18. Salas V., Olias E. Overview of the state of technique for PV inverters used in low voltage grid-connected PV systems: Inverters above 10kW // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. V. 15. P. 1250–1257.
19. Salas V., Olias E. Overview of the state of technique for PV inverters used in low voltage grid-connected PV systems: Inverters below 10kW // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. V. 13. P. 1541–1550.
20. Cooper P.I. The absorption of radiation in solar stills // *Solar Energy*. 1969. V. 12. P. 333–346.
21. Meinel A.B., Meinel M.P. *Applied solar energy* // Addison Wesley Publishing Co. 1976.
22. Архив климатических данных [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rp5.ru> (14.06.2015).
23. Branker K., Pathak M.J.M., Pearce J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. V. 15. P. 4470–4482.
24. Levelized cost of electricity renewable energy technologies / C. Kost, J.N. Mayer, J. Thomsen, N. Hartman, C. Senkpiel, S. Philips, S. Nold, S. Lude, N. Saad, T. Schlegl // Fraunhofer institute for solar energy system (FISE). 2013. P. 27–33.

УДК 621.311.1+622.69.019.3+620.9.338.9

## КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ НАДЕЖНОГО СНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ГАЗОМ

© Г.Ф. Ковалев<sup>1</sup>, Д.С. Крупнев<sup>2</sup>, Т.В. Дзюбина<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,

664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

<sup>2,3</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Обоснована необходимость разработки взаимосвязанного моделирования надежности электроэнергетической и газоснабжающей систем. Предложены методические подходы для оценки балансовой надежности электроэнергетических систем с учетом надежного снабжения газом электрических станций, а именно – «поузловой» и «системный» подходы. Суть «поузлового» подхода заключается в учете надежности функционирования магистраль-

<sup>1</sup>Ковалев Геннадий Федорович, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) с позиций энергетической безопасности, тел.: 89149193551, e-mail: kovalev@isem.irk.ru  
Kovalev Gennady, Doctor of technical sciences, Leading Researcher of the Laboratory for Energy Security-Based Development of the Energy Sector, tel.: 89149193551, e-mail: kovalev@isem.sei.irk.ru

<sup>2</sup>Крупнев Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения и электротехники ИРНИТУ, старший научный сотрудник лаборатории развития ТЭК с позиций энергетической безопасности ИСЭМ СО РАН, тел.: 89246087827, e-mail: krupnev@isem.irk.ru

Krupnev Dmitry, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering INRTU, Senior Researcher of the Laboratory for Energy Security-Based Development of the Energy Sector of the Energy Systems Institute SB RAS, tel.: 89246087827, e-mail: krupnev@isem.irk.ru

<sup>3</sup>Дзюбина Татьяна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры городского хозяйства и строительства ИРНИТУ, старший научный сотрудник лаборатории развития систем газоснабжения ИСЭМ СО РАН, тел.: 89041506053, e-mail: tvleo@isem.irk.ru

Dzyubina Tatiana, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Municipal Economy and Construction INRTU, Senior Researcher of the Laboratory for Gas Supply Systems Development of the Energy Systems Institute SB RAS, tel.: 89041506053, e-mail: tvleo@isem.irk.ru