

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ АВТОНОМНОГО ПОТРЕБИТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАТРАТ

*К.С. Денисов, В.И. Велькин, А.Н. Тырсин*

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

Статья посвящена решению задачи надежного энергоснабжения автономных потребителей с наименьшими экономическими затратами на производство электрической энергии за период эксплуатации объекта. В данной работе особое внимание уделяется комплексным энергосистемам, которые могут включать в себя различные виды источников энергии, в том числе на основе ВИЭ, и являются в большинстве случаев экономически эффективнее в сравнении с системами, содержащими только топливные генераторы, либо со строительством электрических сетей на большие расстояния. Представлена структурная схема комплексной энергосистемы, которая включает в себя аккумуляторные батареи, фотоэлектрические преобразователи, ветроэнергетические установки, напорную малую гидроэлектростанцию, свободнопоточные МГЭС, инверторы, топливные генераторы и электрическую сеть. Приведено описание математической модели для подбора оптимального состава основного и вспомогательного оборудования на базе ВИЭ с учетом технических и экономических параметров установок, на основе реальных природно-климатических данных выбранного региона. Рассмотрены функциональные возможности программы VizProRES 2019.

*Ключевые слова:* комплексная энергосистема, фотоэлектрический преобразователь, возобновляемые источники энергии, ветроэнергетическая установка, малая гидроэлектростанция, аккумулятор.

### **Введение**

На сегодняшний день энергоснабжение удаленных объектов осуществляется в основном за счет бензиновых и дизельных генераторов, применение которых приводит к большим затратам топлива и негативному воздействию на окружающую среду. Кроме того, при использовании только дизельных и бензиновых генераторов нет возможности оптимизации графика их нагрузки с целью уменьшения расхода топлива. Из этого следует, что автономное энергоснабжение является актуальной задачей в различных регионах России и для ее решения требуются новые технологии, которые направлены на рациональное использование топлива и на улучшение экологической ситуации при выработке электроэнергии и тепла [1].

Одним из методов решения вышеописанных проблем является применение комплексных энергосистем на базе ВИЭ, включающих в себя различные виды установок. При этом для выбора оптимального состава оборудования комплексной энергосистемы целесообразно использование современного программного обеспечения, которое будет удовлетворять таким требованиям, как соответствие математической модели реальному энергетическому объекту, надежность выбранной системы и скорость расчета.

В настоящее время предложен ряд алгоритмов и разработаны программные комплексы для решения задачи автономного энергоснабжения [2–11].

В частности, программный комплекс HOMER, разработанный американской Национальной лабо-

раторией ВИЭ, который на сегодняшний день является наиболее известным и применяемым для решения задач автономного энергообеспечения. HOMER представляет собой программу для проектирования энергосистем и сравнения нескольких вариантов компоновки системы с различным составом оборудования на основе технико-экономического сравнения. В программе HOMER существует возможность моделирования автономной энергетической системы и энергетической системы с подключением сети, включающей любую комбинацию источников энергии, таких как фотоэлектрические панели, гидроэлектростанции, ветроэнергетические установки, дизель генератор, а также водородные топливные элементы. Для поиска оптимального состава оборудования в программе HOMER реализован алгоритм HOMER Optimizer™ – это запатентованный алгоритм оптимизации без использования производных, разработанный специально для работы в HOMER [12].

Стоит также отметить программное обеспечение RETScreen, которое предназначено для исследования систем с использованием возобновляемых источников энергии. Программа RETScreen применяется для анализа потребления электроэнергии, воды и топлива, выработки электроэнергии, возможности энергосбережения и сокращения вредных выбросов, для технико-экономического анализа и оценки энергетической эффективности. Основным недостатком RETScreen является то, что программа не позволяет определить оптимальный состав оборудования системы энергоснабжения,

а лишь провести анализ различных систем подобранных пользователем.

Отметим, что при решении задачи энергоснабжения автономного потребителя, набирают популярность алгоритмы, основанные на методах искусственного интеллекта [13], например, программный комплекс ИНОГА. Программа предназначена для моделирования и оптимизации систем электроснабжения, использующих ВИЭ. Оптимизация достигается путем минимизации суммарных затрат системы на протяжении всего цикла эксплуатации. Математическая модель включает в себя ФЭП, ВЭУ, АБ, ДЭС, микроГЭС, топливные элементы и электролизер. При решении оптимизационной задачи используется генетический алгоритм. К основному преимуществу генетического алгоритма можно отнести возможность решения сложных, в том числе нелинейных задач, при малом времени вычислений. Однако генетический алгоритм не гарантирует нахождения глобального оптимума.

Еще одним подходом к решению задачи энергоснабжения на основе комплексных энергосистем является использование смешанного целочисленного линейного программирования, который в частности был рассмотрен в [14]. К основным преимуществам данного метода можно отнести поиск оптимального решения для задач большой размерности за приемлемое время. Из недостатков стоит отметить невозможность использования нелинейных ограничений или нелинейной целевой функции.

Целью данной статьи является описание оптимизационной математической модели надежного энергоснабжения автономных потребителей с наименьшими экономическими затратами на производство электрической энергии, а также ее апробация на реальных данных.

### 1. Постановка задачи

При решении задачи автономного энергоснабжения объекта была рассмотрена структурная схема комплексной энергосистемы, приведенная на рис. 1.

Данная структурная схема включает в себя все основные типы оборудования, применяемых в комплексных системах ВИЭ:

- аккумуляторные батареи (АКБ);
- фотоэлектрические преобразователи (ФЭП);
- ветроэнергетические установки (ВЭУ);
- напорная малая гидроэлектростанция (Напорная МГЭС);
- свободнопоточные МГЭС (Свобод. МГЭС);
- инверторы (ИНВ);
- топливные генераторы (ТГ);
- электрическая сеть (ЭС).

Наличие и количественный состав каждого элемента приведенной схемы зависит от таких факторов, как технические характеристики и экономические параметры каждого типа оборудования, климатические данные выбранного объекта, характеристика энергопотребления и учет возможности использования каждого источника [15–17].

Таким образом, задача энергоснабжения автономного потребителя сводится к поиску оптимального количественного состава основного и вспомогательного оборудования энергосистемы.

## 2. Описание математической модели

### 2.1. Целевая функция

Основным критерием оценки экономической эффективности комплексной энергосистемы являются общие затраты за период эксплуатации системы [14]. Данный экономический параметр учитывает капитальные затраты, ежегодные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание, а также стоимость замены оборудования.

При нахождении оптимального состава оборудования целевой функцией является минимум общих затрат за период эксплуатации:

$$y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_7, x_8, Z_\Sigma, E_\Sigma) = \\ = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + \\ + a_5 \cdot x_5 + a_6 \cdot n_{\text{ИНВ}} + a_7 \cdot x_7 + a_8 \cdot x_8 + \\ + Z_\Sigma \cdot r + E_\Sigma \cdot p \rightarrow y_{\min},$$

где  $x_1$  – количество единиц оборудования ФЭП, ед. (эндогенная переменная);

$x_2$  – количество единиц оборудования ВЭУ, ед. (эндогенная переменная);

$x_3$  – количество единиц оборудования АКБ, ед. (эндогенная переменная);

$x_4$  – количество единиц оборудования ТГ, ед. (эндогенная переменная);

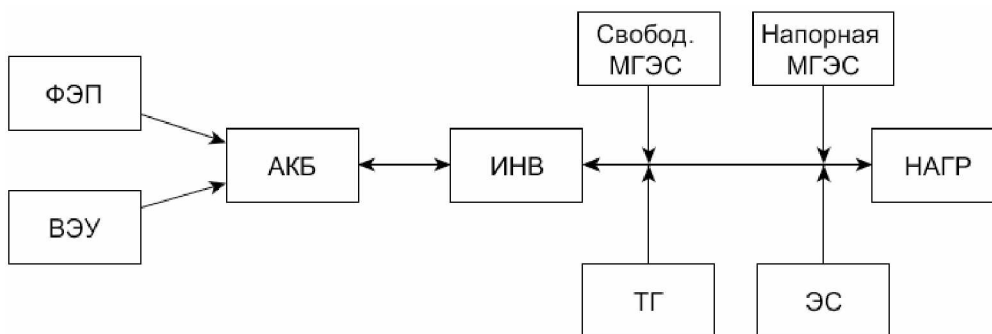


Рис. 1. Структурная схема комплексной энергосистемы

## Альтернативные источники энергии

$x_5$  – наличие электросети ЭС (эндогенная переменная);

$n_{\text{инв}}$  – количество единиц оборудования – Инверторов, ед. (экзогенная переменная);

$x_7$  – наличие напорной малой гидроэлектростанции (Напорная МГЭС) (эндогенная переменная);

$x_8$  – количество единиц оборудования свободнопоточной МГЭС (Свобод. МГЭС), ед. (эндогенная переменная);

$a_1 (C_{\text{ФЭП}})$  – приведенные затраты за период эксплуатации одной установкой ФЭП, руб. (экзогенная переменная) [18, 19];

$a_2 (C_{\text{ВЭУ}})$  – приведенные затраты за период эксплуатации одной установкой ВЭУ, руб. (экзогенная переменная) [20, 21];

$a_3 (C_{\text{АКБ}})$  – приведенные затраты за период эксплуатации одной установкой АКБ, руб. (экзогенная переменная) [22];

$a_4 (C_{\text{ТГ}})$  – приведенные затраты за период эксплуатации одной установкой ТГ, руб. (экзогенная переменная) [11, 23];

$a_5 (C_{\text{ЭС}})$  – приведенные затраты за период эксплуатации электрической сети, руб. (экзогенная переменная);

$a_6 (C_{\text{инв}})$  – приведенные затраты за период эксплуатации одним Инвертором, руб. (экзогенная переменная);

$a_7 (C_{\text{Напорная МГЭС}})$  – приведенные затраты за период эксплуатации напорной малой гидроэлектростанции, руб. (экзогенная переменная);

$a_8 (C_{\text{Свобод. МГЭС}})$  – приведенные затраты за период эксплуатации одной установкой свободнопоточной МГЭС, руб. (экзогенная переменная);

$Z_{\Sigma}$  – общая выработка энергии, кВт·ч, за весь период эксплуатации от ТГ (эндогенная переменная), которая находится как

$$Z_{\Sigma} = z_1 + z_2 + \dots + z_n,$$

где  $z_1, z_2, z_n$  – энергия, производимая Топливными Генераторами в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно; (эндогенные переменные)

$r (C_{\text{ТГ}})$  – стоимость выработки 1 кВт·ч от ТГ, руб./кВт·ч (экзогенная переменная);

$E_{\Sigma}$  – общая выработка энергии, кВт·ч, за весь период эксплуатации от ЭС (эндогенная переменная), которая находится как

$$E_{\Sigma} = e_1 + e_2 + \dots + e_n,$$

где  $e_1, e_2, e_n$  – энергия, производимая Топливными Генераторами в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно (эндогенные переменные);

$p (C_{\text{ЭС}})$  – стоимость выработки 1 кВт·ч от ЭС, руб./кВт·ч (экзогенная переменная).

### 2.2. Общие ограничения

На количество установок вводятся следующие ограничения:

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_7, x_8 \geq 0;$$

$$x_1, x_2, x_3, x_4, x_8 = \text{int};$$

$$x_5, x_7 = \text{bin}.$$

При этом нужно учитывать, что вырабатываемая системой энергия должна быть больше или равна потребляемой в каждый момент времени за выбранный период. Для этого должно выполняться условие:

$$\begin{cases} b_{11} \cdot x_1 + b_{21} \cdot x_2 + w_1 + b_{71} \cdot x_7 + b_{81} \cdot x_8 + \\ + z_1 + e_1 - E_1; \\ b_{12} \cdot x_1 + b_{22} \cdot x_2 + w_2 + b_{72} \cdot x_7 + b_{82} \cdot x_8 + \\ + z_2 + e_2 - E_2; \\ \dots \\ b_{1n} \cdot x_1 + b_{2n} \cdot x_2 + w_n + b_{7n} \cdot x_7 + b_{8n} \cdot x_8 + \\ + z_n + e_n - E_n, \end{cases} \geq 0,$$

где  $x_1$  – количество единиц оборудования ФЭП, ед. (эндогенная переменная);

$b_{11}, b_{12}, b_{1n} (\mathcal{E}_{\text{ФЭП сут}})$  – энергия, кВт·ч, производимая одной ФЭП в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно (известное значение);

$x_2$  – количество единиц оборудования ВЭУ, ед. (эндогенная переменная);

$b_{21}, b_{22}, b_{2n} (\mathcal{E}_{\text{ВЭУ}})$  – энергия, кВт·ч, производимая одной ВЭУ в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно (экзогенные переменные);

$w_1, w_2, w_n$  – энергия, кВт·ч, от аккумуляторных батарей в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно (эндогенные переменные), которая зависит от граничных условий:

$$\begin{cases} 0 < w_1 < J \cdot x_3; \\ 0 - w_1 < w_2 < J \cdot x_3 - w_1; \\ 0 - w_1 - w_2 < w_3 < J \cdot x_3 - w_1 - w_2; \\ \dots \\ 0 - w_1 - w_2 - \dots - w_{n-1} < w_n < \\ < J \cdot x_3 - w_1 - w_2 - \dots - w_{n-1}, \end{cases}$$

где  $x_3$  – количество единиц оборудования АКБ, ед. (эндогенная переменная);

левая часть – энергия, которую могут запасти все АКБ в определенный день;

правая часть – энергия, которую могут отдать все АКБ в определенный день;

$J (\mathcal{E}_{\text{АКБ}})$  – максимальная энергия, кВт·ч, запасаемая одной АКБ (экзогенная переменная);

$x_7$  – наличие Напорной МГЭС (эндогенная переменная);

$b_{71}, b_{72}, b_{7n} (\mathcal{E}_{\text{Напорная МГЭС сут}})$  – энергия, кВт·ч, производимая Напорной МГЭС в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно (экзогенные переменные);

$x_8$  – количество единиц оборудования Свобод. МГЭС, ед. (эндогенная переменная);

$b_{81}, b_{82}, b_{8n} (\mathcal{E}_{\text{Свобод. МГЭС}})$  – энергия, кВт·ч, производимая одной Свобод. МГЭС в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно (экзогенные переменные);

$z_1, z_2, z_n$  – энергия от топливных генераторов в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно (эндогенные переменные), которая зависит от граничных условий:

$$\begin{cases} z_1 \\ 0 \leq \dots \leq D \cdot x_4, \\ z_n \end{cases}$$

где  $x_4$  – количество единиц оборудования ТГ, ед. (эндогенная переменная);

$D(\text{Э}_{\text{ТГ}})$  – максимальная энергия, кВт·ч, вырабатываемая одним ТГ за день (экзогенная переменная);

$e_1, e_2, e_n$  – энергия от электрической сети в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно (эндогенные переменные), которая зависит от граничных условий:

$$\begin{cases} e_1 \\ 0 \leq \dots \leq Q \cdot x_5, \\ e_n \end{cases}$$

где  $x_5$  – наличие электрической сети (эндогенная переменная);

$Q(\text{Э}_{\text{ЭС}})$  – максимальная энергия, кВт·ч, которая может быть получена от электрической сети с учетом максимальной мощности объекта (экзогенная переменная);

$E_1, E_2, E_n$  – потребляемая энергия в 1, 2 и  $n$ -й день соответственно (экзогенные переменные).

Рассмотренная математическая модель может быть решена методами смешанного целочисленного линейного программирования и была реализована в программе VizProRES 2019.

### 3. Программа VizProRES 2019

Программа VizProRES 2019 предназначена для нахождения оптимального состава основного и вспомогательного оборудования возобновляемых источников энергии с учетом технических и экономических параметров оборудования, на основе реальных природно-климатических данных выбранного региона. К функциональным возможностям программы можно отнести:

1) расчет оптимального состава оборудования на базе ВИЭ с учетом недельного и годового изменения графика потребления электроэнергии для заданного географического района;

2) выполнение графического анализа различных вариантов компоновки системы;

3) моделирование поведения системы за весь расчетный период, учитывая суточные колебания выработки энергии;

4) сохранение рассчитываемого варианта для последующей его загрузки и продолжения работы без потери введенных ранее данных;

5) возможность включения в расчет фотоэлектрических панелей, ветроэнергетических установок, напорных МГЭС, свободнопоточных МГЭС, топливных генераторов, АКБ, инверторов и централизованной электрической сети.

#### 3.1. Расчет комплексной энергосистемы населенного пункта Чумпу-Кытыл

##### Момского улуса Республики Саха (Якутия)

Более 60 % территории России находится в зоне децентрализованного энергоснабжения [24],

поэтому задача энергоснабжения автономных потребителей с наименьшими экономическими затратами на производство электрической энергии является актуальной для многих регионов страны. В частности, согласно Энергетической стратегии Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года применение современных методов энергоснабжения, в том числе с использованием ВИЭ, с целью уменьшения экономических затрат на производство электроэнергии от существующих локальных дизельных электростанций является актуальной задачей для Республики Саха (Якутия), так как более 60 % территории находится в зоне децентрализованного энергоснабжения [25].

В качестве примера был выбран населенный пункт Чумпу-Кытыл Момского улуса Республики Саха (Якутия). По данным последней переписи в поселке проживает примерно 198 человек. Износ существующей дизельной электростанции составляет более 80 %, максимум электрической нагрузки – 94 кВт, годовое энергопотребление – 415 тыс. кВт·ч. Для расчета системы энергоснабжения в программе VizProRES 2019 был выбран максимально возможный состав оборудования. Выбранный состав системы представлен на рис. 2.

Для выполнения расчета комплексной энергосистемы на базе ВИЭ данные солнечной радиации и скорости ветра для с. Чумпу-Кытыл за период с 1 января 2010 по 31 декабря 2017 г. были получены с помощью климатического портала NASA [26]. Населенный пункт Чумпу-Кытыл расположен на берегу р. Индигирка, также рядом протекает небольшая река Аллара. В связи с этим для расчета свободнопоточной МГЭС была выбрана р. Индигирка, а для напорной МГЭС – р. Аллара. Характеристики р. Индигирка взяты на основе данных гидрологического поста Индигирский. Характеристики р. Аллара получены на основе площади водосборного бассейна и режима реки Индигирка.

Результат расчета и анализ поведения системы в период с 1 января по 31 декабря 2010 года представлен на рис. 3. Оптимальный состав энергосистемы включает в себя ФЭП, напорную МГЭС, АКБ, топливный генератор и инвертор. Суммарные затраты за период эксплуатации для данной системы составили 124 788 037 руб. и суммарная стоимость электроэнергии равна 11,6 руб./кВт·ч. В то время как стоимость одноставочного тарифа на электрическую энергию, поставляемую ПАО «Якутскэнерго» в селе Чумпу-Кытыл Момского муниципального района, составляет 85,47 руб./кВт·ч [27], что значительно выше рассчитанного варианта.

Из графика видно, что зимой ТГ вносят основной вклад энергоснабжения потребителя, а летом, наоборот, производят мало. Летом большая часть нагрузки покрывается солнечными панелями и напорной МГЭС, а в период с октября по февраль доля выработки ФЭП и МГЭС незначительна.

# Альтернативные источники энергии



Рис 2. Окно страницы «Главная». Состав оборудования

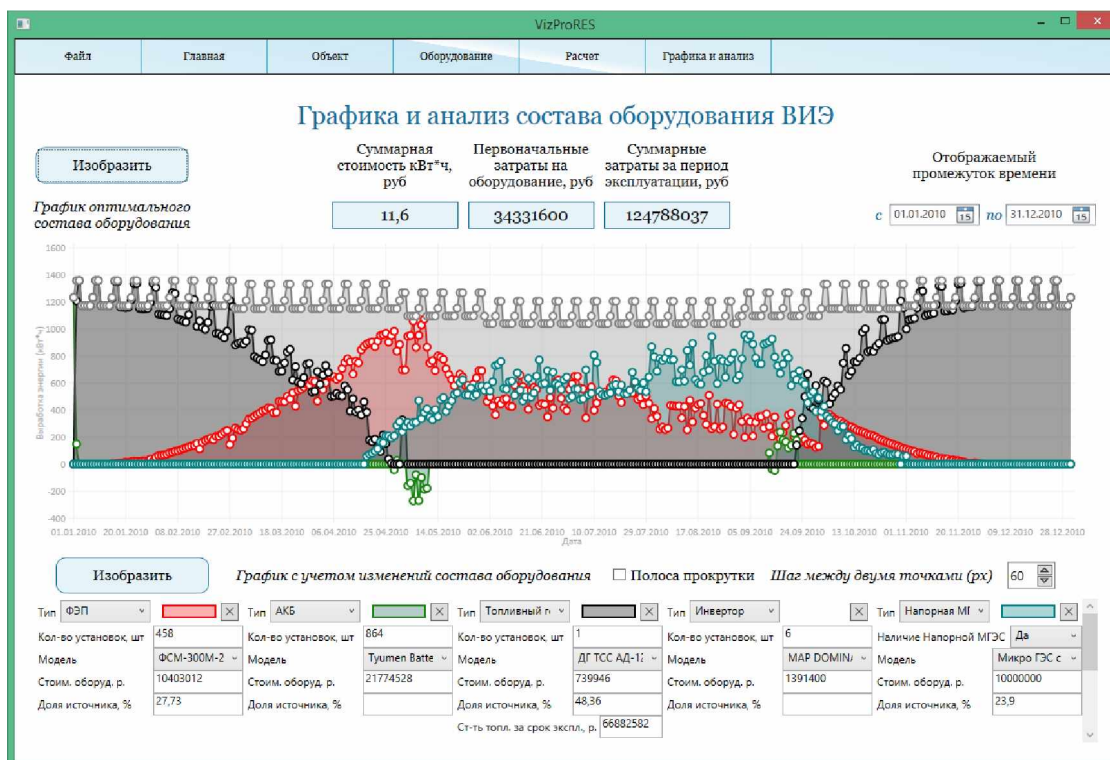


Рис. 3. Окно страницы «Графика и анализ состава оборудования ВИЭ»

## Заключение

На сегодняшний день энергоснабжение автономных потребителей с наименьшими экономическими затратами на производство электрической энергии является актуальной задачей для многих

регионов страны. В ходе выполнения данной работы представлена математическая модель, которая позволяет решить данную задачу. Описанная в работе математическая модель реализована в программном комплексе VizProRES 2019.

С использованием компьютерной программы VizProRES 2019 был выполнен расчет, на основании которого можно сделать вывод о том, что для энергоснабжения удаленных объектов целесообразно использование комплексных энергосистем на основе ВИЭ. Такие системы позволяют существенно снизить стоимость производства электрической энергии в сравнении с применением только топливных генераторов либо со строительством электрических сетей на большие расстояния, как видно на примере населенного пункта Чумпу-Кытыл Момского улуса Республики Саха (Якутия).

### Литература

1. Безруких, П.П. Системы гарантированного электроснабжения автономных потребителей на основе возобновляемых источников энергии / П.П. Безруких, А.К. Сокольский, В.П. Харитонов // Тезисы докладов 3-й научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве», 14–15 мая 2003 г. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2003. – С. 70–71.
2. Lambert, T. Micropower system modeling with HOMER, in *Integration of Alternative Sources of Energy*, FA Farret and MG Simoes / T. Lambert, P. Gilman, P. Lilienthal // Wiley-IEEE Press. – 2006. – P. 379–418. DOI: 10.1002/0471755621.ch15
3. Lilienthal, P.D. Computer Modeling of Renewable Power Systems / P.D. Lilienthal, T.W. Lambert, P. Gilman // *Encyclopedia of Energy*. – 2004. – Vol. 1. – P. 633–647. DOI: 10.1016/b0-12-176480-x/00522-2
4. HOMER Energy. – <http://www.homerenergy.com/> (дата обращения: 8.02.2019).
5. RETScreen // *Natural Resources Canada*. – <http://www.etscreen.net/ru/home.php> (дата обращения: 18.03.2019).
6. Велькин, В.И. Разработка отечественного комплекса «VIZPO-RES» на основе анализа зарубежных программ расчета ВИЭ / В.И. Велькин, К.С. Денисов, А.С. Завьялов // Неделя науки СПбГПУ. – СПб., 2014. – С. 60–63.
7. Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016610783 Российская Федерация. Программа расчета и визуализации оптимальной комплексной системы возобновляемых источников энергии (RES) «VizProRES» / В.И. Велькин, К.С. Денисов; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Зарегистрировано 19.01.2016.
8. Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613097 Российская Федерация. Программа Автоматизированного расчета кластера ВИЭ «АРК-ВИЭ» / В.И. Велькин, М.И. Логинов, Е.В. Чернобай; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Зарегистрировано 25 марта 2013 г.
9. Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614024 Российская Федерация. Программа Визуализации поиска оптимального кластера возобновляемых источников энергии (RES) «VIZPO-RES» / В.И. Велькин, К.С. Денисов, Е.В. Чернобай; заявитель и патентообладатель Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. – Зарегистрировано 14 апреля 2014 г.
10. Сибгатуллин, А.Р. Оптимизация состава оборудования на основе возобновляемых источников энергии в системах электроснабжения автономных потребителей небольшой мощности / А.Р. Сибгатуллин, В.В. Елистратов // *Альтернативная энергетика и экология (ISJAE)*. – 2016. – № 23–24. – С. 51–67. DOI: 10.15518/isjaee.2016.23-24.051-067
11. Карамов, Д.Н. Математическое моделирование автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии / Д.Н. Карамов // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. – 2015. – № 9 (104). – С. 133–140.
12. Walker, M. HOMER Optimizer™, a Faster Path to Finding Least-Cost Microgrid Options / M. Walker. – <https://microgridnews.com/homer-optimizer-a-faster-path-to-finding-least-cost-microgrid-options/> (дата обращения: 27.03.2019).
13. Al-Falahi, M.D.A. A review on recent size optimization methodologies for standalone solar and wind hybrid renewable energy system / M.D.A. Al-Falahi, S.D.G. Jayasinghe, H. Enshaei // *Energy Conversion and Management*. – 2017. – Vol. 143. – P. 252–274.
14. Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems / A. Malheiro, P.M. Castro, R.M. Lima, A. Estanteiro // *Renewable Energy*. – 2015. – Vol. 83. – P. 646–657. DOI: 10.1016/j.renene.2015.04.066
15. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review / Binayak Bhandari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee [et al.] // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. – 2015. – Vol. 2, iss. 1. – P. 99–112. – <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-015-0013-z>.
16. Nasir El Bassam. *Integrated Renewable Energy for Rural Communities. Planning Guidelines, Technologies and Applications* / Nasir El Bassam, Preben Maegaard. – Mumbai: Elsevier, 2004. – 315 p. DOI: 10.1016/B978-0-444-51014-3.X5026-1
17. Deshmukh, M.K. Modeling of hybrid renewable energy systems / M.K. Deshmukh, S.S. Deshmukh // *Renewable & Sustainable energy reviews*. – 2008. – Vol. 12, iss. 1. – P. 235–249. – [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-18336-2\\_16.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-18336-2_16.pdf) DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.011

18. Велькин, В.И. Расчет автономной фотоэлектрической системы электроснабжения для резервирования собственных нужд АЭС: методические указания к выполнению курсового проекта / В.И. Велькин, А.С. Завьялов, Е.В. Стариков. – Екатеринбург: ФГАОУ ВПО УРФУ, 2014. – 25 с.

19. Солнечные фотоэлектрические системы: учеб. пособие / Е.В. Стариков, В.И. Велькин, К.С. Денисов, Л.Р. Хайретдинова. – Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, 2016. – 125 с.

20. Ветро дизельная установка для электроснабжения фермерского хозяйства / И.И. Артюхов, С.Ф. Степанов, С.В. Молот, Р.Т. Ербаев // Вестник аграрной науки Дона. – 2016. – Т. 1, № 33. – С. 41–48.

21. Квитко, А.В. Характеристики ветра, особенности расчёта ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики / А.В. Квитко, А.О. Хицкова // Научный журнал КубГАУ – Scientific Journal of KubSAU. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – № 97. – <http://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-vetra-osobennosti-raschyota-resursa-i-ekonomicheskoy-effektivnosti-vetrovoy-energetiki> (дата обращения: 23.03.2019).

22. Шепелев, А. О. Расчет емкости аккумуляторных батарей / А.О. Шепелев, Е.Ю. Артамонова // Молодой ученый. – 2016. – № 17. – С. 99–101.

23. Гринько, Д.В. Выбор типа комбинированной установки для электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / Д.В. Гринько // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2014. – № 2. – С. 70–73.

24. Суслов, К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии / К.В. Суслов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – № 5 (124). – С. 131–142. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-131-142

25. Энергетическая стратегия Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года, утвержденная постановлением Правительства Республики Саха (Якутия) от 29.10.2009 № 441.

26. Surface meteorology and Solar Energy // Atmospheric science data center. – <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (дата обращения: 4.03.2019).

27. Постановление «Об установлении постанционных тарифов на электрическую энергию, вырабатываемую АО «Сахаэнерго» на 2018 год» / Правление государственного комитета по ценовой политике республики Саха (Якутия). 26.12.2017. № 716/1.

**Денисов Константин Сергеевич**, аспирант, кафедра «Прикладная математика», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; [denser93@mail.ru](mailto:denser93@mail.ru).

**Велькин Владимир Иванович**, д-р техн. наук, доцент, кафедра «Атомные станции и возобновляемая энергетика», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; [v.i.velkin@urfu.ru](mailto:v.i.velkin@urfu.ru).

**Тырсин Александр Николаевич**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Прикладная математика», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; [at2001@yandex.ru](mailto:at2001@yandex.ru).

Поступила в редакцию 15 мая 2019 г.

DOI: 10.14529/power190309

## INTEGRATED COST-EFFECTIVE POWER SUPPLY TO OFF-GRID CONSUMERS

**K.S. Denisov**, [denser93@mail.ru](mailto:denser93@mail.ru),

**V.I. Velkin**, [v.i.velkin@urfu.ru](mailto:v.i.velkin@urfu.ru),

**A.N. Tyrsin**, [at2001@yandex.ru](mailto:at2001@yandex.ru)

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russian Federation

The paper dwells upon reliable power supply to off-grid consumers and presents a solution that minimizes the costs of electricity generation over the lifetime of a generator set. Emphasis is made on integrated systems comprising a variety of sources, including renewable energy, which in most cases is more cost-effective than fuel-fired generators alone or constructing long-distance power grids. The paper presents the structural diagram

of an integrated system comprising energy storage, photovoltaic converters, wind farms, a small high-pressure hydroelectric power plant, free-flow SHPs, inverters, fuel-fired generators, and a grid. It further describes a mathematical model for optimizing the layout and structural makeup of primary and secondary renewable energy equipment, which helps tailor the technical and economic performance of generator sets to the actual climate of the selected region. The paper also briefly presents VizProRES application.

*Keywords:* integrated power system, photovoltaic converter, renewable energy sources, wind farm, small hydroelectric power plant, energy storage.

## References

1. Bezrukikh P.P., Sokolskiy A.K., Kharitonov V.P. [Renewable Energy-Based Systems for Guaranteed Power Supply to Off-Grid Consumers]. *Tezisy doklada 3-j nauchno-tehnicheskoy konferencii "Jenergoobespechenie i jenergosberezhenie v sel'skom hozjajstve"* [Abstracts of the 3rd Research Conference Energy Supply and Energy Saving in Agriculture], 2003, pp. 70–71. (in Russ.)
2. Lambert T., Gilman P., Lilienthal P. Micropower System Modeling with HOMER, in *Integration of Alternative Sources of Energy*, FA Farret and MG Simoes. *Wiley-IEEE Press*, 2006, pp. 379–418. DOI: 10.1002/0471755621.ch15
3. Lilienthal P.D., Lambert T.W., Gilman P. Computer Modeling of Renewable Power Systems. *Encyclopedia of Energy*, 2004, vol. 1, pp. 633–647. DOI: 10.1016/b0-12-176480-x/00522-2
4. HOMER Energy. Available at: <http://www.homerenergy.com/> (accessed 8.02.2019).
5. RETScreen. *Natural Resources Canada*. Available at: <http://www.etscreen.net/ru/home.php> (accessed 18.03.2019).
6. Velkin V.I., Denisov K.S., Zavialov A.S. [International RES Computing Experience and Its Use in VIZPO-RES, an Russian-Developed Application]. *Nedelja nauki SPbGPU* [Week of Science of St. Petersburg Polytechnic University], 2014, St. Petersburg, pp. 60–63. (in Russ.)
7. Velkin V.I., Denisov K.S. *Programma rascheta i vizualizacii optimal'noj kompleksnoj sistemy vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии (RES) "VizProRES"* [VizProRES Application for Computing and Visualizing an Optimal Integrated System of Renewable Energy Sources (RES)]. Certificate of State Registration of Computer Programs RF, no. 2016610783, 19.01.2016.
8. Velkin V.I., Loginov M.I., Chernobaj E.V. *Programma Avtomatizirovannogo rascheta klastera VIJe "ARK-VIJe"* [ARK-RES, an Application for Computer-Aided RES Cluster Design]. Certificate of State Registration of Computer Programs RF, no. 2013613097, 25.03.2013.
9. Velkin V.I., Loginov M.I., Chernobaj E.V. *Programma Vizualizacii poiska optimal'nogo klastera vozobnovljaemyh istochnikov jenerгии (RES) "VIZPO-RES"* [VIZRO-RES, an Application for Visualized Search for Optimal Renewable Energy Source (RES) Cluster]. Certificate of State Registration of Computer Programs RF, no. 2014614024, 14.04.2014.
10. Sibgatullin A.R., Elistratov V.V. [Optimization of Equipment Composition Based on Renewable Energy Sources in Electric Supply Systems for Low Power Autonomous Consumers]. *Alternativnaja jenergetika i jekologija* [Alternative Energy and Ecology (ISJAE)], 2016, no. 23–24, pp. 51–67. (in Russ.) DOI: 10.15518/isjaee.2016.23-24.051-067
11. Karamov D.N. [Mathematical Modeling of Autonomous Power Supply System Using Renewable Energy Sources]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 9 (104), pp. 133–140. (in Russ.)
12. Walker M. HOMER Optimizer™, a Faster Path to Finding Least-Cost Microgrid Options. Available at: <https://microgridnews.com/homer-optimizer-a-faster-path-to-finding-least-cost-microgrid-options/> (accessed 27.03.2019).
13. Al-Falahi M.D.A., Jayasinghe S.D.G., Enshaei H. A Review on Recent Size Optimization Methodologies for Standalone Solar and Wind Hybrid Renewable Energy System. *Energy Conversion and Management*, 2017, vol. 143, pp. 252–274.
14. Malheiro A., Castro P.M., Lima R.M., Estanqueiro A. Integrated sizing and scheduling of wind/PV/diesel/battery isolated systems. *Renewable Energy*, 2015, vol. 83, pp. 646–657. DOI: 10.1016/j.renene.2015.04.066
15. Binayak Bhandari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee et al. Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2015, vol. 2, iss. 1, pp. 99–112. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-015-0013-z>.
16. Nasir El Bassam, Preben Maegaard. *Integrated Renewable Energy for Rural Communities. Planning Guidelines, Technologies and Applications*. Mumbai, Elsevier Publ., 2004. 315 p. DOI: 10.1016/B978-0-444-51014-3.X5026-1
17. Deshmukh M.K., Deshmukh S.S. Modeling of Hybrid Renewable Energy Systems. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, iss. 1, pp. 235–249. Available at: [https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-18336-2\\_16.pdf](https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-18336-2_16.pdf). DOI: 10.1016/j.rser.2006.07.011



18. Velkin V.I., Starikov E.V., Zavyalov A.S. *Raschet avtonomnoj fotoelektricheskoy sistemy jelektr snabzhenija dlja rezervirovaniya sobstvennyh nuzhd AJeS: metodicheskie ukazaniya k vypolneniju kursovogo proekta* [Computing Off-Grid Photovoltaic Power Supply Systems as Backups for NPPs: Guidelines for the Implementation of the Course Project]. Ekaterinburg, Ural Federal University, 2014. 25 p.
19. Starikov E.V., Velkin V.I., Denisov K.S., Khairtdinova L.R. *Solnechnye fotoelektricheskie sistemy: uchebnoe posobie* [Solar Photovoltaic Systems: Training Manual]. Ekaterinburg, UMTS UPI, 2016. 125 p.
20. Artyukhov I.I., Stepanov S.F., Molot S.V., Erbayev R.T. [Arbaev Wind Power Plant for Farm Power Supply]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* [Bulletin of Agricultural Science of Don], 2016, vol. 33, pp. 41–48. (in Russ.)
21. Kvitko A.V., Hickova A.O. [Characteristics of Wind, Features of Calculation of Resource and Economic Efficiency of Wind Energy]. *Nauchnyj zhurnal KubGAU*. [Scientific Journal of KubSAU]. Krasnodar, Kuban State Agrarian University. 2014, no. 97. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/harakteristiki-vetra-osobennosti-raschyota-resursa-i-ekonomicheskoy-effektivnosti-vetrovoy-energetiki> (accessed 23.03.2019). (in Russ.)
22. Shepelev A.O., Artamonova E.Ju. [Calculation of Battery Capacity]. *Molodoj uchenyj* [Young Scientist]. 2016, no. 17, pp. 99–101. (in Russ.)
23. Grinko D.V. [Selection of the Type of Combined Installation for Power Supply of Agricultural Consumers]. *Izvestija Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [News of Orenburg State Agrarian University]. 2014, no. 2, pp. 70–73. (in Russ.)
24. Suslov K.V. [Development of Power Supply Systems in Isolated Areas of Russia Using Renewable Energy Sources]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Irkutsk State Technical University], 2017, no. 5 (124), pp. 131–142. (in Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2017-5-131-142
25. *Energeticheskaya strategiya Respubliki Sakha (Yakutiya) na period do 2030 goda, utverzhennaya postanovleniem Pravitel'stva Respubliki Sakha (Yakutiya)* [The Energy Strategy of the Republic of Sakha (Yakutia) for Until 2030, Approved by the Government of the Republic of Sakha (Yakutia)]. 2009, no. 441.
26. Surface Meteorology and Solar Energy. *Atmospheric Science Data Center*. Available at: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/> (accessed 4.03.2019)
27. *Postanovlenie ob ustanovlenii postantsionnykh tarifov na elektricheskuyu energiyu, vyrabatyvaemuyu AO "Sakhaenergo" na 2018 god* [Decision on the Establishment of Station-Based Tariffs for Electric Power Generated by Sakhaenergo JSC for 2018] *Pravlenie gosudarstvennogo komiteta po tsenovoy politike respubliky Sakha* [Board of the State Committee for Price Policy of the Republic of Sakha (Yakutia)]. 26.12.2017, no. 716/1.

Received 15 May 2019

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Денисов, К.С. Решение задачи комплексного энергоснабжения автономного потребителя с целью уменьшения экономических затрат / К.С. Денисов, В.И. Велькин, А.Н. Тырсин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 84–92. DOI: 10.14529/power190309

### FOR CITATION

Denisov K.S., Velkin V.I., Tyrsin A.N. Integrated Cost-Effective Power Supply to Off-Grid Consumers. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 84–92. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190309