

СПОСОБЫ ОПТИМИЗАЦИИ СТРУКТУРНО-СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

О.В. Григораш, *grigorasch61@mail.ru*
С.В. Оськин, *el-mash@kubsau.ru*
Е.А. Денисенко, *denisenko_88@mail.ru*
Д.П. Харченко, *dmitryph85@mail.ru*

*Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина,
Краснодар, Россия*

Аннотация. Для разработки энергоэффективных ветро-солнечных электростанций рассматриваются способы оптимизации их структурно-схемных решений по основным критериям эффективности, которыми являются экономические показатели, показатели надёжности, качества электроэнергии и КПД, а для мобильных систем – массогабаритные показатели. Раскрываются основные сложности при оптимизации структуры системы, выполненной на возобновляемых источниках энергии, и содержание способов определения оптимальных её показателей с использованием обобщённого критерия, общего экономического показателя и раскрываются особенности оптимизации по трём критериям эффективности. Рассматриваются основные этапы оптимизации структурно-схемного решения автономных систем электроснабжения.

Ключевые слова: автономная система электроснабжения, ветро-солнечные электростанции, способы оптимизации структуры системы, критерии эффективности, показатели оценки эффективности

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МФИ-20.1/27.

Для цитирования: Способы оптимизации структурно-схемных решений ветро-солнечных электростанций / О.В. Григораш, С.В. Оськин, Е.А. Денисенко, Д.П. Харченко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 3. С. 34–40. DOI: 10.14529/power230303

Original article
DOI: 10.14529/power230303

OPTIMIZING THE STRUCTURE AND CIRCUITS OF WIND AND SOLAR POWER PLANTS

O.V. Grigorash, *grigorasch61@mail.ru*
S.V. Oskin, *el-mash@kubsau.ru*
E.A. Denisenko, *denisenko_88@mail.ru*
D.P. Kharchenko, *dmitryph85@mail.ru*

Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia

Abstract. For the development of energy-efficient wind and solar power plants, the optimization of their structure and circuits are considered according to efficiency criteria: economic indicators, reliability indicators, power quality, and efficiency, and for mobile systems: weight and size indicators. The main difficulties in optimizing the structure of a system made for renewable energy sources are revealed, and methods for determining its optimal indicators using a generalized criterion, a general economic indicator, and the features of optimization according to three efficiency criteria are revealed. The main stages of optimization of the structural and circuit solutions of autonomous power supply systems are considered.

Keywords: autonomous power supply system, wind-solar power plants, optimizing the structure of the system, efficiency criteria, performance evaluation indicators

Acknowledgments. This research was carried out with the financial support of the Kuban Scientific Foundation as part of the scientific project No. IFI-20.1/27.

For citation: Grigorash O.V., Oskin S.V., Denisenko E.A., Kharchenko D.P. Optimizing the structure and circuits of wind and solar power plants. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(3):34–40. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230303

Введение

Перспективы возобновляемой энергетики неоспоримы из-за ограниченных запасов традиционного топлива [1, 2]. Однако сегодня является актуальным вопрос оптимизации структурно-схемных решений комбинированных автономных систем электроснабжения (АСЭ), выполненных с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [3–5]. Здесь прежде всего целесообразно рассматривать АСЭ, выполненные на базе ветро-солнечных электростанций (ВСЭ) небольшой мощности, которые могут быть как стационарными, так и мобильными [6, 7].

Как известно, проектирование АСЭ для электроснабжения потребителей электроэнергии, расположенных на конкретной территории, начинается с определения мощности и режимов работы потребителей, которые описываются графиками нагрузок (как правило, суточными и сезонными), и с оценки потенциала ВИЭ.

Основная проблема состоит в том, что невозможно спрогнозировать с высокой точностью для конкретной территории и времени года потенциал ВИЭ, из-за случайного характера возобновляемой энергии, к примеру, в такое-то время суток скорость ветра будет 4 м/с, а уровень солнечной радиации $800 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$. Это не позволяет сделать даже статистические данные. Можно только определить, используя известные вычисления из теории надёжности, к примеру, что с такой-то долей вероятности потенциал ветровой и солнечной энергетики на такой-то местности будет изменяться в таких-то пределах [8, 9].

Даже ориентируясь на статистические данные о потенциале ВИЭ на местности, где предполагается размещение АСЭ, то вторым по важности является вопрос разработки её энергоэффективного структурно-схемного решения. АСЭ представляет собой сложный энергетический комплекс, содержащий автономные источники электроэнергии (ветроэнергетические и солнечные фотоэнергетические установки, мини- или микрогидроэлектростанции, бензо- или дизельные станции, аккумуляторные батареи), статические преобразователи и стабилизаторы напряжения, включая контроллер, коммутационные аппараты и измерительные приборы. Затрудняет разработку энергоэффективной АСЭ большое разнообразие потребителей электроэнергии, которые могут быть однофазными и трёхфазными, промышленной и повышенной частоты тока, а также постоянного тока, при этом каждый из них предъявляет отдельные требования к качеству электроэнергии и надёжности электроснабжения [10, 11].

Таким образом, разработать универсальное структурно-схемное решение энергоэффективной (рациональной) АСЭ для всех типов потребителей электроэнергии, использующей ресурсы возобновляемой и традиционной энергетики, АСЭ можно

спроектировать только для потребителей, расположенных на конкретной территории с учётом потенциала ВИЭ и ландшафта местности, а также требований потребителей к качеству электроэнергии [12, 13].

Теоретическая часть

Эффективность, в том числе автономного энергетического комплекса, оценивается показателями критериев эффективности, характеризующих в общем случае его эксплуатационно-технические характеристики и работоспособность в номинальном режиме работы. Основными показателями, по которым проводится оценка эффективности АСЭ, являются экономические показатели, показатели надёжности, качества электроэнергии и КПД, а для мобильных (транспортных) систем – массогабаритные показатели [14, 15].

В общем случае при решении оптимизационных задач под критерием подразумевают признак, на основании которого осуществляется оценка, а показатель – это числовое выражение критерия. Кроме того, известно, что под оптимизацией понимают процесс нахождения наилучшего решения какой-либо задачи с учётом заданных критериев и значений их показателей [16–18]. При этом простейшим способом оптимизации структурно-схемного решения АСЭ является оптимизация по одному критерию, которая заключается в выборе варианта решения, наилучшим образом соответствующего единственной цели, к примеру, улучшить КПД или повысить показатели надёжности. Многокритериальная оптимизация – более сложная задача, она состоит в поиске из множества допустимых решений «лучшего» решения с учетом нескольких критериев, по которым осуществляется оценка.

Основные проблемы разработки АСЭ, в том числе выполненных с использованием ВИЭ, связаны прежде всего с определением оптимальных (рациональных) значений показателей критериев оценки эффективности, поскольку от правильности выбора этих показателей зависят эксплуатационно-технические характеристики (ЭТХ) и технико-экономические показатели автономной системы в комплексе.

Многокритериальная АСЭ, как правило, от трёх и более показателей, с определением диапазона их оптимальных значений является сложной задачей, поскольку улучшение одного показателя, как правило, приводит к ухудшению других показателей, к примеру, улучшение показателей надёжности приводит к повышению экономических показателей и ухудшению массогабаритных показателей [6, 15]. Поэтому один из простых способов решения задачи выбора оптимального варианта АСЭ является разработка системы с учётом накопленного опыта опытно-конструкторских и проектно-конструкторских работ с использованием новой

элементной базы, когда заранее известно, что применяемый новый функциональный элемент, к примеру, инвертор, контроллер и т. п. имеет улучшенные ЭТХ в сравнении с эксплуатируемым оборудованием. Здесь важно учитывать режимы работы потребителей электроэнергии (график нагрузок), а также требования потребителей к качеству электроэнергии и надёжности электроснабжения.

Практическая часть

Таких структурно-схемных решений может быть несколько, необходимо провести их сравнение по показателям, которые определяются по следующей методике.

1. Определяется КПД АСЭ для всех возможных режимов функционирования по обобщённой формуле

$$\eta_{АСЭ} = \sum_{i=1}^n \eta_{ИЭi} \sum_{j=1}^m \eta_{ЭУj}, \quad (1)$$

где $\eta_{ИЭ}$ – КПД работающих источников электроэнергии, включая ветроэнергетическую установку (ВЭУ), солнечную фотоэнергетическую установку (СФЭУ), минигидроэлектростанцию (МГЭС), резервный источник (бензогенератор или дизельная станция) и аккумуляторные батареи (АБ); n – всего работающих источников электроэнергии; $\eta_{ЭУ}$ – КПД электронных устройств (инверторов, конверторов, контроллеров); m – всего работающих источников электроэнергии в конкретном режиме.

Определив значения КПД для всех режимов работы АСЭ, определяющим является значение КПД режима с наибольшим временным интервалом работы.

2. Проводится расчёт показателей надёжности:

– средней наработки до первого отказа, показатель, определяющий ресурс необслуживаемой работы АСЭ:

$$T_{ср} = \frac{1}{\lambda_p(t)}, \quad (2)$$

где $\lambda_p(t)$ – интенсивность отказа функциональных элементов АСЭ, работающих в конкретном режиме. При расчетах, как правило, значения интенсивности отказов элементов берутся из справочных данных;

– коэффициента готовности:

$$K_{Г} = \frac{T_{срИЭ}}{T_{срИЭ} + t_{вкл}} P_{ИЭ}(t), \quad (3)$$

где $T_{срИЭ}$ – средняя наработка до первого отказа источника электроэнергии; $t_{вкл}$ – время включения резервного источника; $P_{ИЭ}(t) = e^{-\lambda t}$ – вероятность безотказной работы источника электроэнергии.

3. Для мобильных (транспортных) АСЭ важными являются массогабаритные показатели, как

правило, проводится расчёт только массы энергетической системы. Масса АСЭ определяется по формуле

$$M_{АСЭ} = \sum_{i=1}^n (S_{ИЭ} m_{ИЭ})_i + \sum_{j=1}^m (S_{ЭУ} m_{ЭУ})_j, \quad (4)$$

где $S_{ИЭ}$ и $S_{ЭУ}$ – мощность источников электроэнергии и электронных устройств; $m_{ИЭ}$ и $m_{ЭУ}$ – удельная масса источников электроэнергии и электронных устройств.

Как правило, значение показателя $M_{АСЭ}$, полученного по формуле (4), умножается на коэффициент $K = 1,3-1,4$, учитывающий массу каркаса, коммутационных аппаратов и других элементов системы.

4. Экономические показатели:

– стоимость АСЭ определяется по формуле

$$C_{АСЭ} = C_{ФЭ} + C_{ЭР}, \quad (5)$$

где $C_{ФЭ}$ – суммарная стоимость функциональных элементов системы, включая источники, преобразователи и стабилизаторы параметров электроэнергии, коммутационные аппараты и другое вспомогательное оборудование; $C_{ЭР}$ – эксплуатационные расходы определяются за определённый период эксплуатации АСЭ, в общем случае эксплуатационные расходы определяются по формуле

$$C_{ЭР} = \frac{C_{уд}^t C_{ФЭ}}{(1 + E_H)^t} \cdot K_{СС}, \quad (6)$$

где $C_{уд}^t$ – удельные затраты за время эксплуатации t ; E_H – нормативный коэффициент; $K_{СС}$ – коэффициент, учитывающий изменение срока службы.

Как показал анализ исследований, по оценке эффективности АСЭ приоритетным является критерий стоимости, который, как известно, зависит от мощности системы. На рис. 1 приведена обобщённая схема АСЭ, содержащая ВЭУ, СФЭУ, МГЭС и блок аккумуляторных батарей (АБ). На рис. 1 показан блок системы управления и защиты СУЗ, в состав которого входит шина гарантированного питания.

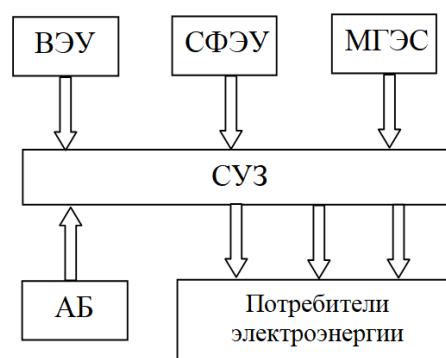


Рис. 1. Обобщённая схема АСЭ
Fig. 1. Generalized scheme of an autonomous power supply system

Суммарную стоимость оборудования АСЭ с учётом доставки и пусконаладочных работ можно определить по формуле

$$C_{АСЭ} = C_{ВЭУ}n_1 + C_{СФЭУ}n_2 + C_{МГЭС}n_3 + C_{АБ}n_4, \quad (7)$$

где $C_{ВЭУ}$, $C_{СФЭУ}$, $C_{МГЭС}$, $C_{АБ}$ – стоимость возобновляемых источников энергии и аккумуляторных батарей, а n_1 – n_4 – соответственно их количество.

В общем случае стоимость ВЭУ, СФЭУ и МГЭС определяется их мощностью, особенностями конструктивных решений и стоимостью дополнительного оборудования. При этом для минимизации мощности ВИЭ необходимо, чтобы их суммарная мощность была равной суммарной мощности одновременно работающих потребителей и обеспечивать заряд АБ.

Качество электроэнергии переменного тока в основном определяется видом выходного напряжения инверторов СФЭУ и ВЭУ, если последние выполнены на генераторах постоянного тока, и оно может быть синусоидальной или квазисинусоидальной формы, в любом случае от этого показателя зависит стоимость инвертора. Таким образом, нецелесообразно проводить расчёт показателей качества электроэнергии, поскольку стоимость инвертора является их косвенным показателем. Кроме того, если АСЭ содержит отдельные стабилизаторы напряжения, то это также отразится на её общей стоимости. Здесь главное – определиться с требованиями разных потребителей электроэнергии к качеству напряжения и осуществить правильный выбор автономных инверторов и при необходимости стабилизаторов напряжения.

Известный способ оптимизации структурно-схемного решения АСЭ – это применение обобщенного критерия [14]:

$$OK_{АСЭ} = \eta K_1 + T_{CP} K_2 + MK_3 + CK_4, \quad (8)$$

где η , T_{CP} , M , C – показатели критериев эффективности АСЭ (КПД, средняя наработка до первого

отказа, массогабаритные показатели и стоимость); K_1 – K_4 – весовые коэффициенты.

Проблема при минимизации функции (8) состоит в том, что, как правило, выбор весовых коэффициентов (K_1 – K_4) не является строго обоснованным. Эти коэффициенты выбираются на основании экспертных оценок. Кроме того, задача усложняется, поскольку показатели критериев оценки зависят друг от друга, что в комплексе не позволяет разработать энергоэффективное структурно-схемное решение АСЭ.

Улучшить решение задачи оптимизации структуры АСЭ можно, используя метод последовательных уступок. В соответствии с этим методом на первом этапе расчётов фиксируются все показатели критериев эффективности, рассмотренные в формуле (8), кроме одного, к примеру, показатель стоимости C , который оптимизируется ($C \rightarrow C_{min}$). Вторым этапом метода является определение допустимого отклонения от показателя C_{min} и находится следующий показателей критерия эффективности, к примеру, показатель надёжности наработки до первого отказа T_{CPmin} . На последующем этапе задается допустимое отклонение от T_{CPmin} , при котором находится следующий показатель критерия оценки эффективности системы, к примеру, η_{min} и т. д. Наилучшие результаты дает оптимизация по функции (8) с перебором значений весовых коэффициентов (K_1 – K_4) и использованием ограничений, установленных в техническом задании по разработке АСЭ.

Одним из способов упрощения решения оптимизационных задач является введение общего экономического показателя АСЭ, а все остальные показатели системы выражаются с помощью ценовых эквивалентов (затрат). Однако постоянные колебания цены позволяют использовать такой подход в весьма ограниченных случаях.

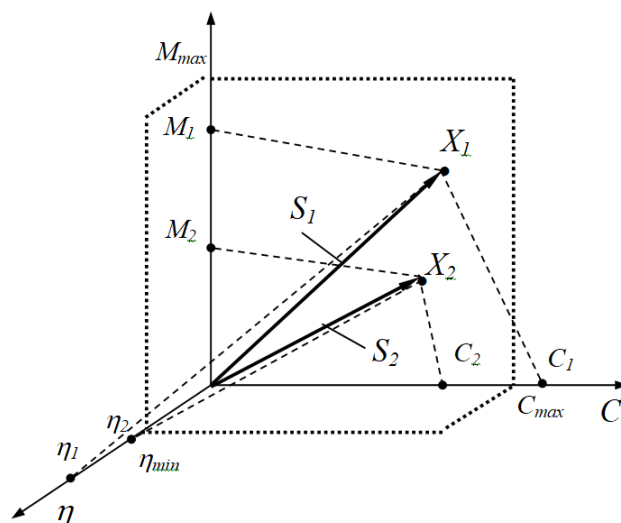


Рис. 2. Сравнение двух вариантов АСЭ по трем критериям эффективности: КПД η , массе M и стоимости C

Fig. 2. Comparison of two autonomous power supply systems in terms of efficiency η , mass M , and cost C

Оценить АСЭ по показателям трёх критериев эффективности можно по положению некоторой точки X в трехмерном пространстве (рис. 2). Проекция этой точки на соответствующие оси критериев эффективности характеризуют её показатели. При этом обобщённый показатель качества характеризуется вектором S , соединяющим начало координат с точкой X .

На каждый из критериев эффективности АСЭ, как правило, накладываются ограничения в соответствии с техническим заданием (η_{\min} , M_{\max} , C_{\max}), по которым определяется, соответствует ли скомпонованная система требованиям или нет. К примеру, скомпонованная АСЭ по положению точки X_1 не удовлетворяет техническому заданию по показателю стоимости C_1 . Ограничение показателей дает возможность выбора оптимального структурного решения АСЭ, т. е. удовлетворяющим ограничениям. Таким образом, каждой совокупности показателей соответствует множество схемных решений АСЭ, качество которых характеризуется обобщенными векторами S_1-S_n .

Результаты

В общем случае основными этапами оптимизации структурно-схемного решения АСЭ при её проектировании являются [15, 16]:

- 1) оценка потребителей по требованиям их к качеству электроэнергии, а также надёжности электроснабжения, в том числе бесперебойности электроснабжения;
- 2) оценка потенциала ВИЭ;
- 3) выбор функциональных элементов системы (основных, дополнительных и резервных источников электроэнергии, преобразователей и стабилизаторов параметров электроэнергии и т. п.);
- 4) разработка и оптимизация структурно-схемного решения системы в соответствии с требованиями технического задания;
- 5) проведение исследования на электромагнитную совместимость силовых элементов системы (источников, преобразователей и потребителей электроэнергии) в разных режимах функционирования системы, включая аварийные режимы, с ис-

пользованием аппарата математического моделирования физических процессов с целью улучшения эксплуатационно-технических характеристик системы;

6) анализ результатов расчётов и исследований;

7) выработка практических рекомендаций по проектированию и эксплуатации энергоэффективной АСЭ.

Окончательное принятие решения о структурно-схемном решении АСЭ должно приниматься после глубокого анализа результатов математического моделирования, позволяющего выполнить параметрический, структурный и многокритериальный анализ решения оптимизационной задачи [16].

Как известно, параметрический анализ предполагает многокритериальное решение задачи оптимизации при переборе различных значений одного параметра и постоянных значений остальных параметров. Оценивается влияние этого параметра на показатели оценки эффективности АСЭ. При этом структурный анализ также предполагает многократное решение задачи, но с учётом структурных ограничений и граничных условий по показателям оценки эффективности, которые, как правило, пренебрежены техническим заданием на разработку АСЭ. Оценивается влияние этих ограничений на показатели эффективности АСЭ. Суть многокритериального анализа заключается в решении задачи оптимизации с различными целевыми функциями (по различным критериям).

Выводы

1. Рассмотренные в статье подходы и способы оптимизации позволяют решить задачу проектирования энергоэффективных структурно-схемных решений АСЭ, выполненных с использованием ветро-солнечных электростанций.

2. Основным инструментом теоретических исследований по реализации рассмотренных способов оптимизации АСЭ являются методы математического моделирования, в основу которых должны быть положены параметрический, структурный и многокритериальный анализ.

Список литературы

1. Лукитин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. 128 с.
2. Григораш О.В., Квитко А.В. Ветро-солнечные электростанции: перспективы, особенности проектирования и выбора основных функциональных элементов: моногр. Краснодар: КубГАУ, 2022. 119 с.
3. Prescriptive Trees for Integrated Forecasting and Optimization Applied in Trading of Renewable Energy / A. Stratigakos, S. Camal, A. Michiorri, G. Kariniotakis // IEEE Transactions on Power Systems. 2022. Vol. 37, no. 6. P. 4696–4708. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3152667
4. Automatic generation control of a renewable energy integrated power system in the presence of fractional order 3DOF controller / N.K. Jena, S. Sahoo, P.C. Sahu et al. // 2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology(ODICON). Bhubaneswar, India, 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/ODICON50556.2021.9429009
5. Optimization of Renewable Energy Parameters for Maximizing Power Output / C. Nayanatara, P. Sharmila, P. Shanmugapriya et al. // 2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS). Chennai, India, 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICPECTS49113.2020.9336970

6. Новая элементная база возобновляемых источников электроэнергии: моногр. / О.В. Григораш, А.Ю. Попов, Е.В. Воробьев [и др.]. Краснодар: КубГАУ, 2018. 202 с.
7. Ветро-солнечный генератор и его характеристики / Я.М. Кашин, Л.Е. Копелевич, И.Б. Самородов [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2019. № 6. С. 201–214.
8. Дайчман Р.А. Расчет ветро-солнечной установки малой мощности // Молодой ученый. 2016. № 10 (114). С.169–173.
9. Никитенко Г.В., Коноплев Е.В., Лысыкв А.А. Ветро-солнечная система автономного электроснабжения // Сельский механизатор. 2018. № 4. С. 28–29.
10. Saeidpour Parizy E., Choi S., Bahrami H. Grid-Specific Co-Optimization of Incentive for Generation Planning in Power Systems with Renewable Energy Sources // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 947–957. DOI: 10.1109/TSTE.2019.2914875
11. Shao Z., Zhai Q., Guan X. All-Scenario-Feasible Optimization Method for Coordinated Scheduling of Security Constrained Power Grids with Uncertain Renewable and Storable Energy Sources // 2019 Chinese Control Conference (CCC). Guangzhou, China, 2019. P. 2187–2192. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8866316
12. Юдаев И.В., Даус Ю.В., Гамага В.В. Возобновляемые источники энергии: учеб. СПб.: Лань, 2020. 328 с. (Сер. Высшее образование).
13. Mannai H., Oueslati H., Mabrouk S.B. Homer based optimization of pv-wind-grid connected hybrid system in administrative building // 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon). Gammarth, Tunisia, 2020. P. 830–835. DOI: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236512
14. Усков А.Е. Выбор оптимального резервного источника электроснабжения // Сельский механизатор. 2022. № 1. С. 36–38.
15. Особенности выбора оптимального состава ветро-солнечной электростанции с дизельными генераторами / А.Ю. Лаврик, Ю.Л. Жуковский, А.Ю. Лаврик, А.Д. Булдыско // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. Т. 22, № 1. С.10–17. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17
16. Филиппова Т.А., Сидоркин Ю.М., Русина А.Г. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 356 с.
17. Zahnstecher B. T2B: Ultra – Low Power System Optimization & Energy Harvesting Opportunities // 2018 31st IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC). Arlington, VA, USA, 2018. P. 1–3. DOI: 10.1109/SOCC.2018.8618568
18. Pushpabala V., ChristoherAsirRajan C. Energy Efficient Based Optimized Renewable Energy Systems (ORES) Using QPSO Technique for Normalized Cost of Energy (NCE) // 2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN). Puducherry, India, 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICSCAN53069.2021.9526488

References

1. Lukitin B.V., Muravlev I.O., Plotnikov I.A. *Sistemy elektrosnabzheniya s vetrovymi i solnechnymi elektrostantsiyami* [Power supply systems with wind and solar power plants]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House; 2015. 128 p. (In Russ.)
2. Grigorash O.V., Kvitko A.V. *Vetro-solnechnye elektrostantsii: perspektivy, osobennosti proektirovaniya i vybora osnovnykh funktsional'nykh elementov: monogr.* [Wind and solar power plants: prospects, design features and selection of the main functional elements: monograph]. Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2022. 119 p. (In Russ.)
3. Stratigakos A., Camal S., Michiorri A., Kariniotakis G. Prescriptive Trees for Integrated Forecasting and Optimization Applied in Trading of Renewable Energy. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2022;37(6):4696–4708. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3152667
4. Jena N.K., Sahoo S., Sahu P.C., Sahu B.K., Mohanty K.B. Automatic generation control of a renewable energy integrated power system in the presence of fractional order 3DOF controller. In: *2021 1st Odisha International Conference on Electrical Power Engineering, Communication and Computing Technology(ODICON)*. Bhubaneswar, India; 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/ODICON50556.2021.9429009
5. Nayanatara C., Sharmila P., Shanmugapriya P., T J., CS S.G. Optimization of Renewable Energy Parameters for Maximizing Power Output. In: *2020 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)*. Chennai, India; 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/ICPECTS49113.2020.9336970
6. Grigorash O.V., Popov A.Yu., Vlorobyev E.V. et al. *Novaya elementnaya baza vozobnovlyaemykh istochnikov elektroenergii: monogr.* [New element base of renewable electricity sources: monograph]. Krasnodar: Kuban State Agrarian University; 2018. 202 p. (In Russ.)
7. Kashin A.Y., Kopelevich L.E., Samorodov A.V., Kim V.A., Artenian K.Z. Wind-solar generator and its characteristics. *Electronic network polythematic journal “Scientific Works of the Kuban State Technological University”*. 2019;6:201–214. (In Russ.)

8. Daichman R.A. [Calculation of a low-power wind-solar installation]. *Young scientist*. 2016;10(114):169–173. (In Russ.)
9. Nikitenko G.V., Konoplev E.V., Lysykrv A.A. Wind-solar system of autonomous power supply. *Selskiy Mechanizator*. 2018;4:28–29. (In Russ.)
10. Saeidpour Parizy E., Choi S., Bahrami H. Grid-Specific Co-Optimization of Incentive for Generation Planning in Power Systems with Renewable Energy Sources. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2020;11(2):947–957. DOI: 10.1109/TSTE.2019.2914875
11. Shao Z., Zhai Q., Guan X. All-Scenario-Feasible Optimization Method for Coordinated Scheduling of Security Constrained Power Grids with Uncertain Renewable and Storable Energy Sources. In: *2019 Chinese Control Conference (CCC)*. Guangzhou, China; 2019. P. 2187–2192. DOI: 10.23919/ChiCC.2019.8866316
12. Yudaev I.V., Daus Yu.V., Gamaga V.V. *Renewable energy sources: textbook* [Renewable energy sources: textbook]. St. Petersburg; 2020. 328 p. (Ser. Higher Education). (In Russ.)
13. Mannai H., Oueslati H., Mabrouk S.B. Homer based optimization of pv-wind-grid connected hybrid system in administrative building. In: *2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*. Gammarth, Tunisia; 2020. P. 830–835. DOI: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236512
14. Uskov A.E. Choosing the optimal backup power supply source. *Selskiy Mechanizator*. 2022;1:36–38. (In Russ.)
15. Lavrik A.Y., Zhukovsky Y.L., Lavrik A., Buldysko A.D. Features of the optimal composition of a wind-solar power plant with diesel generators. *Proceedings of higher educational institutions. Energy sector problems*. 2020;22(1):10–17. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-1-10-17
16. Filippova T.A., Sidorkin Yu.M., Rusina A.G. *Optimizatsiya rezhimov elektrostantsiy i energosistem* [Optimization of modes of power plants and power systems]. Novosibirsk: NSTU Publishing House; 2016. 356 p. (In Russ.)
17. Zahnstecher B. T2B: Ultra – Low Power System Optimization & Energy Harvesting Opportunities. In: *2018 31st IEEE International System-on-Chip Conference (SOCC)*. Arlington, VA, USA; 2018. P. 1–3. DOI: 10.1109/SOCC.2018.8618568
18. Pushpabala V., ChristoberAsirRajan C. Energy Efficient Based Optimized Renewable Energy Systems (ORES) Using QPSO Technique for Normalized Cost of Energy (NCE). In: *2021 International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCAN)*. Puducherry, India; 2021. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICSCAN53069.2021.9526488

Информация об авторах

Григораш Олег Владимирович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия; grigorash61@mail.ru.

Оськин Сергей Владимирович, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой электрических машин и электропривода, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия; el-mash@kubsau.ru.

Денисенко Евгений Александрович, канд. техн. наук, доц. кафедры электротехники, теплотехники и возобновляемых источников энергии, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия; denisenko_88@mail.ru.

Харченко Дмитрий Павлович, канд. техн. наук, доц., доц. кафедры электрических машин и электропривода, Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, Краснодар, Россия; dmitryph85@mail.ru.

Information about the authors

Oleg V. Grigorash, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Renewable Energy Sources, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia; grigorash61@mail.ru.

Sergey V. Oskin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Electrical Machines and Electric Drives, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia; el-mash@kubsau.ru.

Evgeny A. Denisenko, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Electrical Engineering, Heat Engineering and Renewable Energy Sources, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia; denisenko_88@mail.ru.

Dmitry P. Kharchenko, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electrical Machines and Electric Drives, Kuban State Agrarian University named after I.T. Trubilin, Krasnodar, Russia; dmitryph85@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 21.06.2023; одобрена после рецензирования 23.07.2023; принята к публикации 23.07.2023.

The article was submitted 21.06.2023; approved after review 23.07.2023; accepted for publication 23.07.2023.