

ЭНЕРГЕТИКА



Научная статья

УДК 621.311

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-123-133>

Выбор оптимальных режимов электропотребления локальной энергосистемы Республики Алтай на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии

В.З. Манусов^{1✉}, А.В. Каланакова²^{1,2}Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Резюме. Цель – разработка системы оптимального планирования электропотребления в локальной энергосистеме Республики Алтай на основе значительной доли возобновляемых и альтернативных генерирующих источников энергии. Исследования выполнены на основе метода линейного программирования режимов электропотребления генерирующими потребителями. В качестве исходной информации для решения задачи использованы графики потребления электроэнергии по сезонам и почасовые ретроспективные ряды метеорологических данных по скорости ветрового потока и солнечной инсоляции за 2021 год. В качестве объектов локального электроснабжения для расчетов выработки электроэнергии были рассмотрены ветроэнергетические установки, солнечные фотоэлектрические станции, гидроэлектростанции и накопители энергии. В статье приведены результаты расчетов выработки электроэнергии для зимнего сезона, так как в этот период наблюдается наибольший дефицит электроэнергии. Показано, что электропотребители исследуемого региона в связи с дефицитом электроэнергии могут самостоятельно устанавливать дополнительные генерирующие источники энергии в виде ветроэнергетических установок, солнечных фотоэлектрических станций и накопителей энергии. Тем самым их совместное производство смягчает некоторую непредсказуемость генерации мощности возобновляемых источников энергии. Основным новым результатом является разработка методики, дающей возможность генерирующим потребителям минимизировать свои материальные и финансовые затраты, а также снизить «углеродный след» электроэнергетики. Значимость представленных в статье результатов исследований состоит в обосновании гибридной системы электроснабжения с большой долей возобновляемых и альтернативных источников энергии, которая реализована на конкретном примере в Республике Алтай и может быть продублирована в других локальных энергосистемах с подобными метеорологическими условиями.

Ключевые слова: локальная энергосистема, возобновляемые источники энергии, оптимизация электропотребления, ветроустановка, солнечные фотоэлектрические станции, накопители энергии

Для цитирования: Манусов В.З., Каланакова А.В. Выбор оптимальных режимов электропотребления локальной энергосистемы Республики Алтай на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 1. С. 123–133. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-123-133>.

POWER ENGINEERING

Original article

Selecting optimal power consumption patterns in the Republic of Altai local grid system based on renewable and alternative power sources

Vadim Z. Manusov^{1✉}, Aysulu V. Kalanokova²^{1,2}Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract. The authors develop a system of optimal planning of power consumption in the Republic of Altai local grid system based on a large proportion of renewable and alternative generating power sources. The studies were carried out using the linear programming method for power consumption patterns used by generating consumers. Power consumption charts by seasons and hourly retrospective rows of weather data by wind current velocity and solar insolation over 2021 were used as source data. Wind turbines, solar photovoltaic facilities, hydro-power plants, and energy accumulators were considered as local power consumption facilities to calculate electricity generation. The article provides calculation results for electricity generation in winter, since this is when a higher power deficiency is observed. It was shown that power consumers in the region under study can independently install additional generating power sources in the form of wind turbines, solar photovoltaic facilities, hydro-power plants, and energy accumulators due to electricity deficiency. Their combined generation mitigates the unpredictability of power generation by renewable sources. The authors propose a method that allows generating consumers to minimize their material and financial expenses and reduce the carbon footprint. The significance of the study consists in the substantiation of a hybrid power supply system with a high proportion of renewable and alternative power sources, which is implemented in the Republic of Altai and can be reproduced in other local energy systems with similar weather conditions.

Keywords: local energy system, renewable energy sources, optimization of electrical consumption, wind turbine, solar photovoltaic (PV) power plants, energy storage devices

For citation: Manusov V.Z., Kalanakova A.V. Selecting optimal power consumption patterns in the Republic of Altai local grid system based on renewable and alternative power sources. *iPolytech Journal*. 2023;27(1):123-133. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-1-123-133>.

ВВЕДЕНИЕ

Для большинства стран мира возобновляемые и альтернативные источники энергии являются приоритетным направлением энергетической политики, тем самым являясь актуальной, и в тоже время дискуссионной темой. Современные энергетические системы переживают период серьезных изменений, связанных с переходом от централизованных структур с большой зависимостью от ископаемого топлива к децентрализованным, экологически чистым энергетическим структурам [1–7].

Оптимальное проектирование гибридной энергосистемы на основе возобновляемых источников энергии – сложная задача, включающая в себя технико-экономическое обоснование, моделирование процессов, а также интеграцию нескольких гибридных возобновляемых источников энергии, системы хранения энергии и контроллера для автоматизации с целью обеспечения надежности электроснабжения [8–11].

Авторы ряда работ [12–14] используют теорию дополнения гидро- и солнечной энергий, позволяющую решить проблему прерывистой и нестабильной выработки солнечной энергии. В работах [15, 16] для повышения надежности энергосистемы дополнительно применяются накопители энергии. Из-за нестабильности ветровых ресурсов ученые объединили гидроаккумулирующие электростанции с ветроэлектростанциями, стремясь к

оптимальному режиму взаимодополняемой работы. В научном труде [17] представлена экономическая целесообразность крупномасштабной гибридной гидроэлектростанции, включая передачу энергии на большие расстояния. Кроме того, ряд научных трудов посвящен задачам оптимизации работы систем электроснабжения генерирующих электростанций, использующих возобновляемые и альтернативные источники энергии [18–20]. Такой подход позволяет на региональном уровне выявить те направления, для которых необходимо провести детальную оценку использования и экономически целесообразные и технологически возможные варианты энергоснабжения. Исследования, проведенные на примере различных регионов, позволяют сформировать перспективные направления в данной области, оценить экономически привлекательные проекты и масштабы рынка оборудования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной статье рассмотрено локальное электроснабжение Республики Алтай за счет возобновляемых и альтернативных источников энергии. Применены ветроэнергетические установки (ВЭУ), солнечные фотоэлектрические станции (СФЭС), гидроэлектростанции (ГЭС) и накопители энергии (НЭ).

Для сравнения с потребляемой мощностью используется суточный график нагрузки зимнего сезона, представленный на рис. 1.

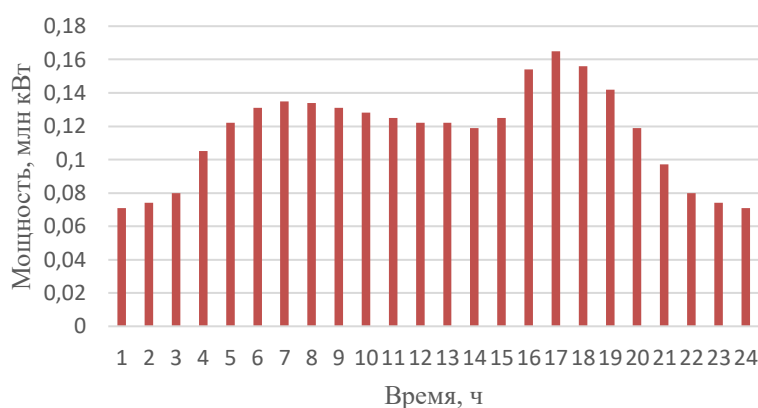


Рис. 1. Суточный график нагрузки для зимы
Fig. 1. Winter daily load schedule

В данной статье приведены результаты исследований более подробно для зимнего времени, так как дефицит энергии в это время года является наибольшим в связи с тем, что гидростанции ограничены выработкой мощности. Аналогичным образом проведены расчеты для весеннего, осеннего и летнего сезонов.

РАСЧЕТ ВЫРАБОТКИ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Рассчитаем количество выработанной энергии в каждый час по формуле (1) на примере зимнего дня:

$$W_{\text{час1}} = P_{\text{час}} \cdot t, \quad (1)$$

где $W_{\text{час1}}$ – энергия, выработанная за час, кВт·ч; $P_{\text{час}}$ – мощность, вырабатываемая солнечными панелями за час, кВт; t – время, ч.

Поскольку солнечные лучи не всегда падают на солнечные батареи под углом 90° , то каждый час домножается на выработанную энергию на процент инсоляции по формуле (2):

$$W_{\text{час}} = W_{\text{час1}} \cdot I, \quad (2)$$

где $W_{\text{час}}$ – энергия, выработанная за час с учетом инсоляции, кВт·ч; $W_{\text{час1}}$ – энергия, выработанная за час без учета инсоляции, кВт·ч; I – инсоляция, %.

Выработанная энергия за сутки рассчитывается по формуле (3):

$$W_{\text{сут}} = \sum_1^t W_{\text{час}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{сут}}$ – энергия, выработанная за сутки с учетом инсоляции, кВт·ч; $W_{\text{час}}$ – энергия, выработанная за час с учетом инсоляции, кВт·ч; t – время, ч.

Результаты расчета приведены в табл. 1.

Из полученных значений построен график выработки солнечных электростанций для зимнего сезона.

Исходя из графика на рис. 2 видно, что потребление энергии больше, чем выработка всех действующих солнечных электростанций (именно 0,696 млн кВт·ч для зимнего сезона). В определенные часы выработка от солнечных фотоэлектрических станций может покрыть потребление, но для полного обеспечения потребуется увеличение мощности либо дополнительный источник выработки в ночное время суток.

РАСЧЕТ ВЫРАБОТКИ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Поскольку на территории Республики Алтай нет действующих ВЭУ, то используем 10 ветроустановок с ветрогенераторами Vestas V-164. Данные агрегаты имеют мощность 10 МВт каждый, размах трех лопастей 164 м, ометаемую площадь 21124 м^2 и высоту мачты 140 м. Ветроустановки размещаются в районе пос. Еланда.

Таблица 1. Выработка и потребление электрической энергии за сутки для зимы

Table 1. Generation and consumption of electrical energy per day in winter

Время, ч	Вырабатываемая энергия для зимы, млн кВт·ч	Потребление энергии для зимы, млн кВт·ч
1	0	0,071
2	0	0,074
3	0	0,08
4	0	0,105
5	0	0,122
6	0	0,131
7	0	0,135
8	0,036	0,134
9	0,048	0,131
10	0,06	0,128
11	0,072	0,125
12	0,084	0,122
13	0,096	0,122
14	0,084	0,119
15	0,072	0,125
16	0,06	0,154
17	0,048	0,165
18	0,036	0,156
19	0	0,142
20	0	0,119
21	0	0,097
22	0	0,08
23	0	0,074
24	0	0,071

Рассчитаем выработанную энергию за сутки для зимнего дня для одной ветроустановки по формуле (4):

$$W_{сут} = (\rho \cdot S \cdot V^3)/2. \quad (4)$$

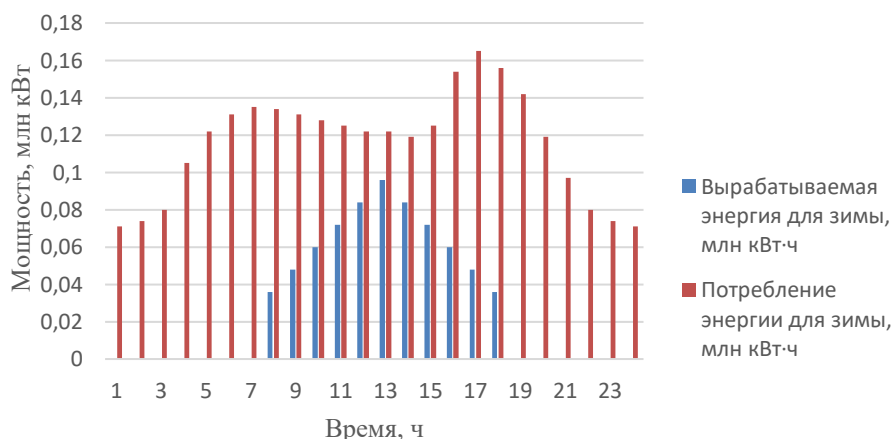


Рис. 2. Выработка солнечной энергии и потребление энергии для зимы
Fig. 2. Solar power generation and consumption in winter

Поскольку солнечная станция не может полностью покрыть потребление, используем комплексную выработку от СФЭС и ВЭУ для каждого часа в табл. 2.

Как и в случае с солнечными электростанциями, эффективность выработки от ветрогенераторов можно повысить, увеличив число ветроустановок, следовательно, подняв мощность всего ветропарка.

КОМПЛЕКСНАЯ ВЫРАБОТКА ОТ СОЛНЕЧНЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ, ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК И ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Для расчета гидроэлектростанции использованы данные Новосибирской ГЭС, в котором учитываются 4 турбины по 70 МВт, следовательно, мощностью 280 МВт. Расположим нашу станцию южнее пос. Еланда, как показано на рис. 5.

Для расчета нам потребуются значения расхода через турбину (495 м³/с), расчетный напор (17 м), КПД турбины (93%) и КПД генератора (97,4%). Вычисления будем производить по формуле (5):

$$W_1 = 9.81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{турб} \cdot \eta_{ген}, \quad (5)$$

где W_1 – мощность одной турбины, Вт; Q – расход через турбину, м³/с; H – напор воды, м; $\eta_{турб}$ – КПД турбины, %; $\eta_{ген}$ – КПД генератора, %.



Рис. 3. Место расположения ветроэнергетических установок
Fig. 3. Location of wind mills

Таблица 2. Выработка электроэнергии от солнечных фотоэлектрических станций и ветроэнергетических установок
Table 2. Electrical energy generation by solar photovoltaic power plants and wind mills

Время, ч	Скорость ветра для зимы, м/с	Вырабатываемая энергия для зимы, млн кВт·ч
1	3,4	0,005
2	3,4	0,005
3	3,4	0,005
4	3,4	0,005
5	3,4	0,005
6	3,4	0,005
7	3,4	0,005
8	3,4	0,041
9	1,7	0,049
10	3,4	0,065
11	3,4	0,077
12	1,7	0,085
13	3,4	0,101
14	3,4	0,089
15	5,1	0,091
16	3,4	0,065
17	3,4	0,053
18	3,4	0,041
19	3,4	0,005
20	3,4	0,005
21	3,4	0,005
22	3,4	0,005
23	3,4	0,005
24	1,7	0,001

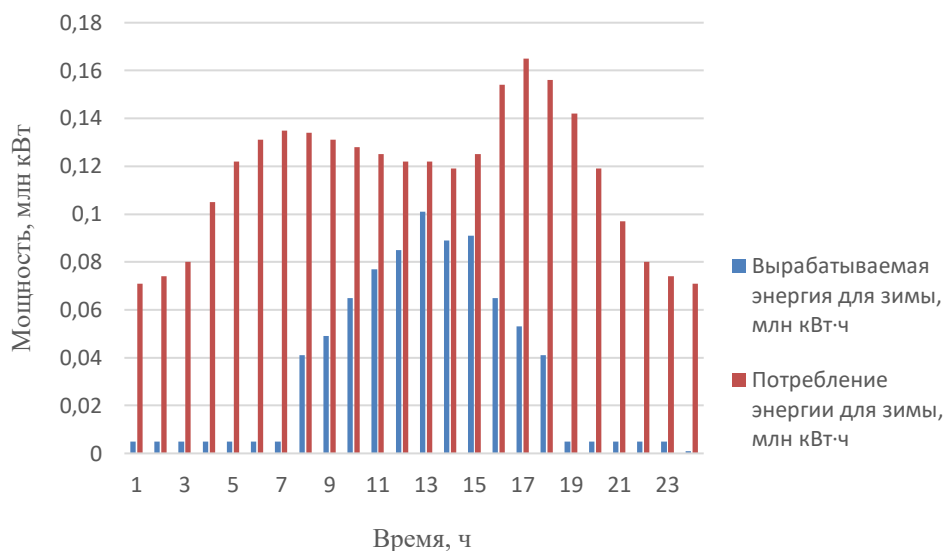


Рис. 4. Выработка электроэнергии солнечными электростанциями и ветроэнергетическими установками и потребление энергии для зимы
Fig. 4. Electrical energy generation by solar photovoltaic power plants and wind mills and energy consumption in winter



Рис. 5. Место расположения гидроэлектростанции
Fig. 5. Location of a hydroelectric power plant

Выработка энергии от ГЭС для лета, осени и весны одинаковая, зимой выработка опускается до 20% (0,06 млн кВт·ч) из-за отсутствия притоков воды и таяния ледников.

Построим графики комплексной выработки электроэнергии от СФЭС, ВЭУ и ГЭС (табл. 3) и сравним их с потреблением.

Как видно из графика на рис. 6,

комплексной выработки с учетом гидроресурсов в зимний сезон также недостаточно. Для решения данной проблемы использованы литий-ионные аккумуляторы для накопления энергии в течение летнего, осеннего и весеннего периодов. Общая нехватка энергии за весь зимний период равна 63,09 млн кВт·ч. Полученные значения приведены в табл. 4.

Таблица 3. Комплексная выработка электроэнергии от солнечных фотоэлектрических станций, ветроэнергетических установок и гидроэлектростанции

Table 3. Integrated generation of electrical energy from solar photovoltaic power plants, wind mills and a hydroelectric power plant

Время, ч	Потребляемая энергия для зимы, млн кВт·ч	Вырабатываемая энергия для зимы, млн кВт·ч	Нехватка энергии, млн кВт·ч
1	0,071	0,126	0
2	0,074	0,126	0
3	0,08	0,126	0
4	0,105	0,126	0
5	0,122	0,126	0
6	0,131	0,126	0,005
7	0,135	0,126	0,009
8	0,134	0,162	0
9	0,131	0,169	0
10	0,128	0,186	0
11	0,125	0,198	0
12	0,122	0,205	0
13	0,122	0,222	0
14	0,119	0,21	0
15	0,125	0,211	0
16	0,154	0,186	0
17	0,165	0,174	0
18	0,156	0,162	0
19	0,142	0,126	0,016
20	0,119	0,126	0
21	0,097	0,126	0
22	0,08	0,126	0
23	0,074	0,126	0
24	0,071	0,121	0

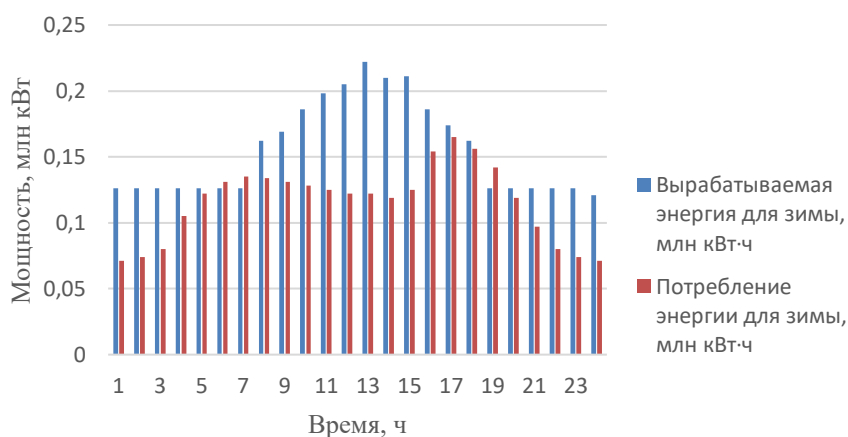


Рис. 6. Выработка энергии солнечными электростанциями, ветряными турбинами, гидроэлектростанциями и потребление энергии в зимний период

Fig. 6. Electrical energy generation by solar photovoltaic power plants, wind mills, hydroelectric power plants and energy consumption in winter

Для данной гибридной системы примем сетевые накопители энергии (СНЭ) компании «Лиотех» с возможностью накопления до 1000 кВт·ч электричества. Для определения количества сетевых накопителей (6):

$$n = \frac{W_n}{W_{СНЭ}}, \quad (6)$$

где n – количество системных накопителей; W_n – количество энергии, которой не хватает

потребителю, Вт; $W_{СНЭ}$ – количество энергии, которую может накопить один СНЭ, Вт.

$$n = \frac{0,03}{0,001} = 30.$$

Таким образом, потребуется 30 СНЭ на 1000 кВт каждый. График выработки и потребления энергии для зимнего месяца с учетом накопителей представлен на рис. 7.

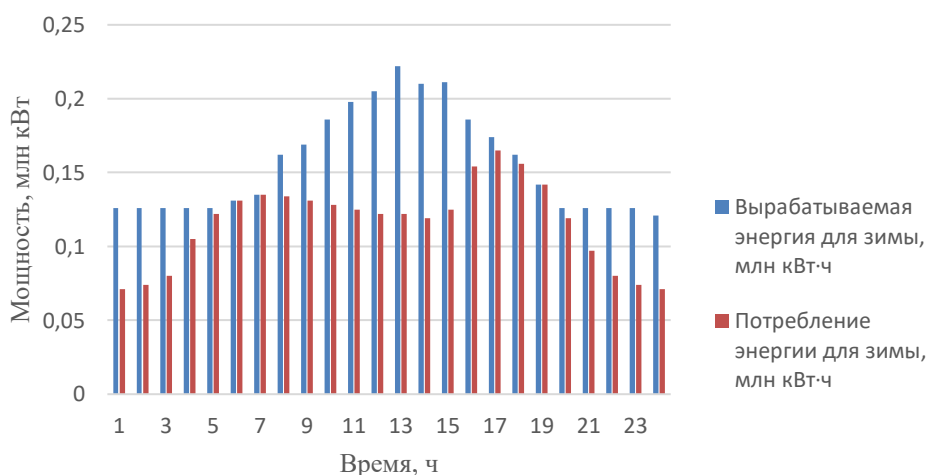


Рис. 7. Выработка и потребление энергии с учетом системы накопления энергии
Fig. 7. Generation and consumption of energy taking into account the energy storage system

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ режимов энергопотребления представленного локального региона Республики Алтай показывает, что для сезонного управления электропотреблением необходимо в качестве ключевых исходных данных выбрать наиболее загруженные рабочие дни для каждого из сезонов года. При этом комплексная выработка с учетом гидроресурсов полностью обеспечивает потребителей электроэнергией в летний, осенний и весенний периоды, однако в зимний сезон выработки недостаточно. Для решения данной проблемы использованы накопители энергии.

В настоящее время имеющиеся в наличии 8 солнечных станций, 2 малых ГЭС и 10 небольших дизельных электростанций не могут полностью обеспечить население Республики

Алтай необходимым количеством энергии, вследствие чего в ряде случаев осуществляется веерное отключение. Как показывает тенденция, потребление электрической энергии в регионе растет с каждым годом и предполагается, что оно повысится к 2030 году на 20%. Перспектива по возведению ГЭС мощностью 280 МВт и создание небольшого ветропарка из 10 ветроустановок по 10 МВт вполне реализуемы. Если рассматривать перспективу локального комплекса электроснабжения за счет возобновляемых и альтернативных ресурсов на более длительный промежуток, то достаточно будет добавить к уже имеющейся концепции дополнительное количество сетевых накопителей для покрытия потребления в пиковые моменты. Наряду с этим следует отметить, что для повышения уровня

достоверности результатов оптимизации целесообразно использовать прогнозирование мощности, генерируемой возобновляемыми и альтернативными источниками энергии на основе искусственных нейронных сетей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для локальной энергосистемы на примере Республики Алтай получено оптимальное соотношение генерации энергии возобновляемыми и альтернативными источниками от суточного электропотребления.

2. Показано, что в качестве возобновляемых источников энергии приняты гидроресурсы региона, включая малые реки. В качестве альтернативных источников энергии приняты ветроресурсы и солнечная энергия, а

именно – скорость ветрового потока и солнечная инсоляция.

3. В связи с некоторой непредсказуемостью метеорологических факторов и впоследствии выработкой мощности возобновляемых и альтернативных источников энергии обоснована необходимость накопителя энергии, в качестве которого, учитывая горный рельеф местности региона, можно рекомендовать строительство гидроаккумулирующей станции.

4. Предложена методика оптимизации энергопотребления для минимизации эксплуатационных и финансовых затрат на суточном интервале времени и повышения экономической жизнеспособности интегрированных систем возобновляемой энергетики.

Список источников

1. Jurasz J., Canales F.A., Kies A., Guezgouz M., Beluco A. A review on the complementarity of renewable energy sources: concept, metrics, application and future research directions // *Solar Energy*. 2020. Vol. 195. P. 703–724. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>.
2. Feddaoui O., Toufouti R., Labed D., Meziane S. Control of an isolated microgrid including renewable energy resources // *Serbian Journal of Electrical Engineering*. 2020. Vol. 17. Iss. 3. P. 297–312. <https://doi.org/10.2298/SJEE2003297F>.
3. Bhatti H.J., Danilovic M. Making the world more sustainable: enabling localized energy generation and distribution on decentralized smart grid systems // *World Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 6. No. 2. P. 350–382. <https://doi.org/10.4236/wjet.2018.62022>.
4. Манусов В.З., Назаров М.Х. Оптимизация режимов электропотребления автономной электрической системы с возобновляемыми и альтернативными источниками энергии // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2020. Т. 24. № 4. С. 810–820. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-810-820>.
5. Sekretarev Yu.A., Sultonov Sh.M., Nazarov M.Kh. Optimization of long-term modes of hydropower plants of the energy system of Tajikistan // *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2016. <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911428>.
6. Асанов М.С., Кокин С.Е., Жабудаев Т.Ж., Дмитриев С.А., Обозов А. Дж., Сафаралиев М. Х. [и др.]. Структурная модель алгоритма расчета микро-ГЭС с учетом гидрологических параметров малых водотоков горных рек в центральной Азии // *Альтернативная энергетика и экология*. 2020. № 34-36. С. 22–36. <https://doi.org/10.15518/isaee.2020.34-36.022-036>.
7. Ausfelder F., Beilmann C., Bertau M., Bräuninger S., Heinzl A., Hoer R., et al. Energy storage as part of a secure energy supply // *ChemBioEng Reviews*. 2017. Vol. 4. P. 144–210. <https://doi.org/10.1002/cben.201700004>.
8. Lawan S.M., Abidin W.A.W.Z. A review of hybrid renewable energy systems based on wind and solar energy: modeling, design and optimization // *Wind Solar Hybrid Renewable Energy System*. 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.85838>.
9. Аюев Б.И., Давыдов В.В., Ерохин П.М. Оптимизационные модели ближайших предельных режимов электрических систем // *Электричество*. 2011. № 3. С. 1–9.
10. Frangopoulos C.A., Spakovsky M.R., Sciubba E. A brief review of methods for the design and synthesis optimization of energy systems // *International Journal Applied Thermodynamics*. 2002. Vol. 5. No. 4. P. 151–160. <https://doi.org/10.5541/ijot.97>.
11. Королев М.Л., Макеечев В.А., Суханов О.А., Шаров Ю.В. Оптимизация режимов электроэнергетических систем на основе моделирования // *Электричество*. 2006. № 3. С. 2–16.
12. Jurasz J., Dabek P.B., Kazmierczak B., Kies A., Wdowikowski M. Large scale complementary solar and wind energy sources coupled with pumped-storage hydroelectricity for Lower Silesia (Poland) // *Energy*. 2018. Vol. 161. P. 183–192. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.085>.
13. Kougiaris I., Szabó S., Monforti-Ferrario F., Huld T., Bódis K. A methodology for optimization of the complementarity between small-hydropower plants and solar PV systems // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 87. Part 2. P. 1023–1030. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.073>.
14. Li He, Liu Pan, Guo Shenglian, Ming Bo, Cheng Lei, Yang Zhikai. Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization // *Applied Energy*. 2019. Vol. 238. P. 863–875. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.111>.
15. Parastegari M., Hooshmand R.-A., Khodabakhshian A.,

Zare A.-H. Joint operation of wind farm, photovoltaic, pump-storage and energy storage devices in energy and reserve markets // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015. Vol. 64. P. 275–284.

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.074>.

16. Манусов В.З., Ганиев З.С., Султонов Ш.М. Оценка доступности энергетических ресурсов за счет солнечной радиации в Республике Таджикистан // *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2018. № 1. С. 174–177.

<http://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-1-189-203>.

17. Гулов Д.Ю., Давлатов А.М., Горт М.В. Эффективность электроснабжения горных районов Таджикистана // *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021. № 1. С. 61–66.

<https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.008>.

18. Удалов С.Н., Манусов В.З. Моделирование ветроэнергетических установок и управление ими на основе нечеткой логики: монография. Новосибирск: НГТУ, 2013. 200 с.

19. Шакиров В.А., Артемьев А.Ю. Выбор площадки размещения ветроэлектростанции с использованием компьютерного моделирования рельефа местности и ветрового потока // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2017. Т. 21. № 11. С. 133–143.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-133-143>.

20. Aza-Gnandji M., Fifatin F.-X., Hounnou A.H.J., Dubas F., Chamagne D., Espanet C., et al. Complementarity between solar and wind energy potentials in Benin Republic // *Advanced Engineering Forum*. 2018. Vol. 28. P. 128–138.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.28.128>.

References

1. Jurasz J., Canales F.A., Kies A., Guezgouz M., Beluco A. A review on the complementarity of renewable energy sources: concept, metrics, application and future research directions. *Solar Energy*. 2020;195:703-724. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.087>.

2. Feddaoui O., Toufouti R., Labed D., Meziane S. Control of an isolated microgrid including renewable energy resources. *Serbian Journal of Electrical Engineering*. 2020;17(3):297-312.

<https://doi.org/10.2298/SJEE2003297F>.

3. Bhatti H.J., Danilovic M. Making the world more sustainable: enabling localized energy generation and distribution on decentralized smart grid systems. *World Journal of Engineering and Technology*. 2018;6(2):350-382.

<https://doi.org/10.4236/wjet.2018.62022>.

4. Manusov V.Z., Nazarov M.Kh. Optimisation of power consumption modes for an autonomous electrical system with renewable and alternative energy sources. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2020;24(4):810-820. (In Russ.).

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2020-4-810-820>.

5. Sekretarev Yu.A., Sultonov Sh.M., Nazarov M.Kh. Optimization of long-term modes of hydropower plants of the energy system of Tajikistan. In: *2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*. 2016.

<https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2016.7911428>.

6. Asanov M.S., Kokin S.E., Zhabudaev T.Z., Dmitriev S.A., Obozov A.J., Safaraliev M.K., Asanova S.M., Ghulomzoda A.H. Structural model of the micro hydro power plant calculation algorithm based on the hydrological parameters of small watercourses of mountain rivers in central Asia. *Alternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2020;(34-36):22-36. (In Russ.).

<https://doi.org/10.15518/isjaee.2020.34-36.022-036>.

7. Ausfelder F., Beilmann C., Bertau M., Bräuninger S., Heinzel A., Hoer R., et al. Energy storage as part of a secure energy supply. *ChemBioEng Reviews*. 2017;4:144-210. <https://doi.org/10.1002/cben.201700004>.

8. Lawan S.M., Abidin W.A.W.Z. A review of hybrid

renewable energy systems based on wind and solar energy: modeling, design and optimization. *Wind Solar Hybrid Renewable Energy System*. 2018.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.85838>.

9. Ayuev B.I., Davydov V.V., Erohin P.M. Optimization models of the nearest limiting regimes of electrical systems. *Elektrichestvo*. 2011;3:1-9. (In Russ.).

10. Frangopoulos C.A., Spakovsky M.R., Sciubba E. A brief review of methods for the design and synthesis optimization of energy systems. *International Journal Applied Thermodynamics*. 2002;5(4):151-160.

<https://doi.org/10.5541/ijot.97>.

11. Korolev M.L., Makeechev V.A., Sukhanov O.A., Sharov Yu.V. Simulation-based optimization of electric power system modes. *Electricity*. 2006;3:2-16. (In Russ.).

12. Jurasz J., Dabek P.B., Kazmierczak B., Kies A., Wdowikowski M. Large scale complementary solar and wind energy sources coupled with pumped-storage hydroelectricity for Lower Silesia (Poland). *Energy*. 2018;161:183-192.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.085>.

13. Kougias I., Szabó S., Monforti-Ferrario F., Huld T., Bódis K. A methodology for optimization of the complementarity between small-hydropower plants and solar PV systems. *Renewable Energy*. 2016;87(2):1023-1030.

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.09.073>.

14. Li He, Liu Pan, Guo Shenglian, Ming Bo, Cheng Lei, Yang Zhikai. Long-term complementary operation of a large-scale hydro-photovoltaic hybrid power plant using explicit stochastic optimization. *Applied Energy*. 2019;238:863-875.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.111>.

15. Parastegari M., Hooshmand R.-A., Khodabakhshian A., Zare A.-H. Joint operation of wind farm, photo-voltaic, pump-storage and energy storage devices in energy and reserve markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2015;64:275-284.

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.06.074>.

16. Manusov V.Z., Ganiev Z.S., Sultonov Sh.M. Estimation of energy resources availability by solar radiation in the Republic of Tajikistan. *Nauchnye problemy transporta Sibiri i*

Dal'nego Vostoka. 2018;1:174-177. (In Russ.).
<http://doi.org/10.17212/1814-1196-2020-1-189-203>.
17. Gulov D.Yu., Davlatov A.M., Gort M.V. Efficiency of electricity supply in mountainous Regions of Tajikistan. *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal*. 2021;1:61-66.
<https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.103.1.008>.
18. Udalov S.N., Manusov V.Z. *Wind farm modeling and control based on fuzzy logic*. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University; 2013, 200 p. (In Russ.).
19. Shakirov V.A., Artemiev A.Yu. Wind farm siting using

computer modeling of terrain relief and wind flow. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2017;21(11):133-143. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-133-143>.
20. Aza-Gnandji M., Fifatin F.-X., Hounnou A.H.J., Dubas F., Chamagne D., Espanet C., et al. Complementarity between solar and wind energy potentials in Benin Republic. *Advanced Engineering Forum*. 2018;28:128-138
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AEF.28.128>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Манусов Вадим Зиновьевич,
к.т.н., профессор,
профессор кафедры системы электроснабжения
предприятий,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия
✉ Manusov36@mail.ru

Каланакова Айсулу Владимировна,
аспирант,
Новосибирский государственный технический
университет,
630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20, Россия
aysulu.kalanakova@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 06.09.2022; одобрена после рецензирования 25.11.2022; принята к публикации 03.02.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vadim Z. Manusov,
Cand. Sci. (Eng.), Professor,
Professor of the Department of Industrial Power Supply
Systems,
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia
✉ Manusov36@mail.ru

Aysulu V. Kalanakova,
Postgraduate Student,
Novosibirsk State Technical University,
20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia
aysulu.kalanakova@yandex.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 06.09.2022; approved after reviewing 25.11.2022; accepted for publication 03.02.2023.