

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432>

УДК 620.91

Минимизация влияния возобновляемых источников энергии на работу энергосистемы путем совместного использования солнечной и ветряной генераций

О. А. Любчик¹⁾, С. В. Быстрых¹⁾, А. Н. Казак¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2023
Belarusian National Technical University, 2023

Реферат. Цель исследования – проверка гипотезы о существовании оптимального соотношения установленной мощности солнечных и ветряных электростанций, позволяющего при большой установленной мощности возобновляемых источников энергии с переменным характером работы минимизировать влияние их генерации на работу энергосистемы и снизить емкость накопителей энергии при их использовании в системе. Были поставлены следующие задачи: на основе метеорологических данных произвести почасовой расчет выработки энергии для нескольких лет комплексами из солнечных и ветряных электростанций различной комбинации мощностей, провести анализ выработки и при подтверждении гипотезы найти искомое соотношение мощностей. В ходе исследования применялись методы моделирования и численные методы решения задач оптимизации: метод итерации и нелинейный метод наименьших квадратов. Определен оптимальный диапазон соотношения установленных мощностей солнечных и ветряных электростанций в отдельном комплексе и в целом энергосистеме для условий Республики Беларусь, который составил от 0,4:1,0 до 0,6:1,0 (солнце:ветер). Комплексы энергоисточников, имеющих соотношение мощностей в указанном диапазоне, позволяют снизить требуемую емкость систем накопления энергии по сравнению с емкостью для только солнечных или только ветряных электростанций в 2,6–4 раза, что ведет к уменьшению капитальных затрат и срока окупаемости проекта. Выход за пределы рекомендуемого диапазона приводит к выраженному переизбытку либо дефициту выработки электроэнергии в различные периоды суток разных периодов года в зависимости от соотношения установленных мощностей. Также определена оптимальная удельная емкость систем накопления энергии для комплексов, состоящих из солнечных и ветряных электростанций в рекомендуемых соотношениях установленных мощностей, которая составила 0,4–0,8 кВт·ч/кВт суммарной установленной мощности.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, солнечные электростанции, ветряные электростанции, график нагрузки энергосистемы, выработка электроэнергии, оптимизация, накопители энергии

Для цитирования: Любчик, О. А. Минимизация влияния возобновляемых источников энергии на работу энергосистемы путем совместного использования солнечной и ветряной генераций / О. А. Любчик, С. В. Быстрых, А. Н. Казак // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 5. С. 423–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432>

Адрес для переписки

Любчик Ольга Андреевна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-96-24
olga.liubchik@yandex.ru

Address for correspondence

Liubchik V. A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-96-24
olga.liubchik@yandex.ru

Minimizing of Renewable Energy Sources Impact on the Energy System Operation by the Joint Use of Solar and Wind Generation

V. A. Liubchyk¹⁾, S. V. Bystrykh¹⁾, A. N. Kazak¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The purpose of the study was to test the hypothesis of the existence of an optimal ratio of the installed capacity of solar and wind power plants, which allows, with a large installed capacity of renewable energy sources with a variable nature of operation, to minimize the impact of their generation on the operation of the power system and reduce the capacity of energy storage devices when they are used in the system. The following tasks were set: on the basis of meteorological data, to calculate hourly energy generation by complexes of solar and wind power plants of various combinations of capacities for several years, analyze the generation and, if the hypothesis is confirmed, find the optimal ratio of capacities. In the course of the study, modeling methods and numerical methods for solving optimization problems were used, viz. the iteration method and the nonlinear least squares method. The optimal range of the ratio of solar and wind power plants installed capacities in a separate complex and in the whole power system for the conditions of the Republic of Belarus was determined, which was 0.4:1–0.6:1 (sun:wind). Complexes of energy sources with a power ratio in the specified range can reduce the required capacity of energy storage systems compared to the capacity for only solar or only wind power plants by 2.6–4.0 times, which leads to a reduction in capital costs and the payback period of the project. Going beyond the recommended range leads to a pronounced surplus or shortage of electricity generation in different periods of the day of different periods of the year, depending on the ratio of installed capacities. Also, the optimal specific capacity of energy storage systems for complexes consisting of solar and wind power plants in the installed capacities recommended ratios was determined, which amounted to 0.4–0.8 kW·h/kW of total installed capacity.

Keywords: renewable energy sources, solar power plants, wind power plants, power system load schedule, power generation, optimization, energy storage

For citation: Liubchyk V. A., Bystrykh S. V., Kazak A. N. (2023) Minimizing of Renewable Energy Sources Impact on the Energy System Operation by the Joint Use of Solar and Wind Generation. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (5), 423–432. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-423-432> (in Russian)

Введение

Вопросы укрепления энергетической безопасности всегда являлись важными для Республики Беларусь ввиду низкой обеспеченности страны собственными топливно-энергетическими ресурсами. Наиболее широко освещаемыми шагами в направлении обеспечения должного уровня энергобезопасности стали строительство и ввод в эксплуатацию БелАЭС [1–3]. Однако возможности атомной энергетики в повышении уровня энергобезопасности ограничены, так как последняя формируется целым набором индикаторов [4, 5]. К тому же низкая маневренность атомных станций ввиду экономических и технических причин делает нецелесообразным переход на полное электроснабжение страны от энергии ядерного топлива. Поэтому диверсификация структуры и поставщиков топливно-энергетических ресурсов не теряет актуальности, что подтверждается набором индикато-

ров действующей Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь.

В настоящее время по-прежнему доминирующим видом топлива в стране является природный газ, импортируемый из Российской Федерации. Смена поставщика значительно повысит себестоимость производимой энергии и сопряжена с трудностями доставки. Смена же природного газа на другие ископаемые виды топлива повлияет на экологическую составляющую производства энергии, вызвав увеличение выбросов парниковых газов и прочих загрязняющих веществ.

Альтернативой диверсификации видов энергоресурсов может стать более активное использование в стране местных, в том числе возобновляемых, источников энергии, что одновременно снизит зависимость от доминирующего экспортера энергоресурсов в Республику Беларусь. Это отмечено в качестве первой стратегической задачи в Государственной программе «Энергосбережение» на 2021–2025 гг.

Потенциал получения электроэнергии от солнца и ветра в Республике Беларусь и особенности интеграции солнечных и ветроэлектростанций в энергосистему

Наибольшим как теоретическим, так и технически возможным потенциалом в Республике Беларусь среди возобновляемых источников энергии обладают солнце и ветер: технически возможный потенциал 153–277 и 32–46 млрд кВт·ч/год соответственно [6, 7].

По официально представленным в открытом доступе данным [8], на начало 2022 г. установленная мощность энергоустановок, работающих за счет энергии солнца, в Республике Беларусь составила 272,5 МВт, за счет энергии ветра – 120 МВт, что позволило в 2021 г. выработать 173,8 и 173,0 млн кВт·ч электрической энергии соответственно. Таким образом, можно говорить об использовании технически доступного потенциала энергии солнца лишь на 0,06–0,11 %, а энергии ветра – на 0,38–0,54 %.

Однако зависимость от погодных условий и трудоемкость прогнозирования выработки энергии [9] вносят определенные сложности в регулирование работы энергосистемы при широком внедрении энергоустановок, работающих за счет энергии солнца и ветра, что подробно рассмотрено в работе [10]. Предложенный в ней механизм загрузки мощностей позволяет сохранить нормальный режим работы КЭС, однако рассматривает солнечные и ветряные электростанции в комплексе, без учета особенностей их работы.

В исследовании [11] рассмотрена экономическая целесообразность применения систем накопления энергии (СНЭ) на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме для сглаживания переменного характера работы солнечных и ветроустановок. Расчеты проводились исходя из возможности обеспечения полного выравнивания нормализован-

ного суточного графика выработки возобновляемыми источниками энергии с переменным характером работы, каждым в отдельности. Требуемая емкость СНЭ составила 1,6–2,1 кВт·ч на 1 кВт установленной мощности источника энергии, что привело к значительному увеличению простоя срока окупаемости.

Авторами сформирована гипотеза о существовании оптимального диапазона соотношений установленных мощностей солнечной и ветряной генераций, позволяющих им при совместной параллельной работе взаимно смягчать колебания выработки энергии, обусловленные погодными условиями и сезонностью, и таким образом снизить необходимую удельную емкость систем накопления энергии.

Описание методики проведения исследования

Для анализа динамики выработки электроэнергии за счет энергии солнца и ветра в Республике Беларусь сформированы массивы данных, представляющих собой значения фактического прихода солнечной радиации на горизонтальную поверхность земли и скорости ветра на высоте 50 м от поверхности земли для 18 контрольных точек, равномерно расположенных по территории страны. Данные взяты за период трех лет с интервалом в один час, что дало возможность произвести дальнейшие вычисления на основе почти полумиллиона исходных значений для каждого из источников энергии.

Для вычисления выработки энергии от солнечных электростанций приняты оптимальные ориентация по сторонам света и угол наклона солнечной батареи к горизонту и эффективность преобразования энергии солнца в электрическую в размере 20 %. При определении выработки энергии ветряной электростанцией использована полученная на основе характеристик нескольких ветроустановок зависимость выдаваемой мощности от скорости ветра.

В отличие от ранее рассмотренного расчета [11], в качестве задачи предлагается установить не обеспечение полного выравнивания нормализованного суточного графика, а повторение возобновляемыми источниками энергии формы суточного графика энергосистемы, характерного для буднего дня отопительного и неотопительного периодов [12]. Для удобства введем понятие модели суточного графика нагрузки энергосистемы (далее – модель графика нагрузки). Под моделью графика нагрузки будем понимать график, построенный по часовым значениям нагрузки в энергосистеме с применением для всех значений единого уменьшающего коэффициента, позволяющего отобразить форму реального суточного графика на графике суточной выработки энергии установками малой мощности. Часовые значения нагрузки $W_{\text{ОЭС,мод}}$ для построения модели графика нагрузки для отопительного и для неотопительного периодов в отдельности определяются с помощью формулы

$$W_{\text{ОЭС,мод}} = W_{\text{ОЭС,ч}} \frac{W_{\text{ВИЭ,сут}}}{W_{\text{ОЭС,сут}}}, \quad (1)$$

где $W_{\text{ОЭС,ч}}$ – часовые значения нагрузки в энергосистеме для типового рабочего дня; $W_{\text{ВИЭ,сут}}$ – средняя суммарная выработка за сутки с помощью установок малой мощности, работающих за счет возобновляемых источников энергии; $W_{\text{ОЭС,сут}}$ – суммарная нагрузка за сутки в энергосистеме.

Исследование проводилось с применением методов моделирования и численных методов решения задачи оптимизации: метода итерации и нелинейного метода наименьших квадратов.

В качестве первой целевой функции выбрано среднеквадратичное отклонение почасовой выработки за счет возобновляемых источников энергии $W_{\text{ВИЭ,ч}}$ от почасовых значений модели графика нагрузки $W_{\text{ОЭС,мод}}$ (рис. 1). Для удобства на шкале справа нанесены соответствующие модели графика нагрузки значения $W_{\text{ОЭС,ч}}$.

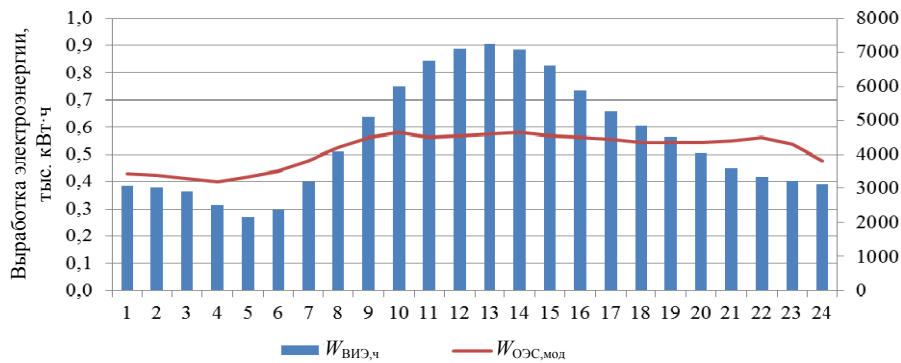


Рис. 1. Пример динамики суточной выработки энергии комплексом из солнечной и ветряной станций (2,3 МВт) и модели графика нагрузки для типового дня неотопительного периода, тыс. кВт·ч

Fig. 1. An example of the dynamics of daily energy production by a complex of a solar and wind power plant (2.3 MW) and a model of the load schedule for a typical day of the non-heating period, thousand kW·h

В идеальном случае значения столбчатой диаграммы ($W_{\text{ВИЭ,ч}}$) и значения кривой ($W_{\text{ОЭС,мод}}$) должны совпадать. Задачей было найти соотношение установленной мощности солнечных и ветряных электростанций, дающих минимальное годовое среднеквадратичное отклонение

$$\sum_{t=1}^{8760} (W_{\text{ОЭС,мод},t} - W_{\text{ВИЭ,ч},t})^2 \rightarrow \min.$$

Однако расчеты показали, что в ряде случаев минимальному среднеквадратичному отклонению соответствуют мощности, позволяющие накопить в СНЭ значительно больше либо гораздо меньше энергии, чем впоследствии требуется отдать в энергосистему. В связи с этим были введены

дополнительные функции. Первой дополнительной функцией стал модуль произведения максимального за год переизбытка выработки ($\Sigma \Delta W^+$) (накопление энергии в СНЭ, в разрезе суток – период с 9 до 19 ч на рис. 1) и максимального дефицита выработки ($\Sigma \Delta W^-$) (отдача энергии от СНЭ, в разрезе суток – период с 20 до 8 ч на рис. 1). В реальных условиях в зависимости от погодных условий периоды дефицита и переизбытка выработки электроэнергии возобновляемыми источниками энергии могут длиться более продолжительное время, что увеличивает требуемую емкость накопителей энергии (учтено в исследовании). Второй дополнительной функцией стала разность между максимальным за год переизбытком выработки и максимальным за год дефицитом выработки. Для обеих дополнительных функций, как и для основной функции, проводился поиск минимальных значений путем фиксирования мощности установки на одном источнике энергии (например, ветре) и пошаговом изменении мощности установок на другом источнике энергии (солнце). При этом дополнительно установлено ограничение о не более чем 10-кратном максимальном отношении установленных мощностей между собой.

Введение дополнительных функций позволило скорректировать полученные ранее результаты и не только найти для смоделированной системы минимальные значения требуемой емкости СНЭ, но и сократить до минимума разницу между необходимым накоплением и отдачей энергии от СНЭ.

Описание результатов исследования

В результате проведенного моделирования с поиском решений методом итерации был найден диапазон рекомендуемого соотношения установленных мощностей солнечных и ветряных электростанций, который составил от 0,4:1,0 до 0,6:1,0. Комплексы энергоисточников, имеющие соотношение мощностей в указанном диапазоне, позволяют снизить требуемую емкость СНЭ по сравнению с емкостью СНЭ только для солнечных или только для ветряных электростанций в 2,6–4 раза – с 1,6–2,1 кВт·ч/кВт установленной мощности [11] до 0,4–0,8 кВт·ч/кВт установленной мощности, что ведет к снижению капитальных затрат и срока окупаемости проекта.

На рис. 2 представлена выработка электроэнергии комплексом 2,25 МВт в типовой день для каждого из сезонов года при соотношении установленной мощности солнечных электростанций к ветряным 0,5:1,0.

Как видно из рисунка, в зимнее время график имеет наименьшие колебания по часам, что обеспечивается большими скоростями ветра в холодный период года и низким приходом излучения от солнца. Весной и осенью колебания возрастают, имея максимум суточных колебаний летом, что объясняется снижением выработки энергии ветроустановками и ростом – солнечными. Однако в целом график близок по форме к типовым графикам нагрузки в энергосистеме для буднего дня.

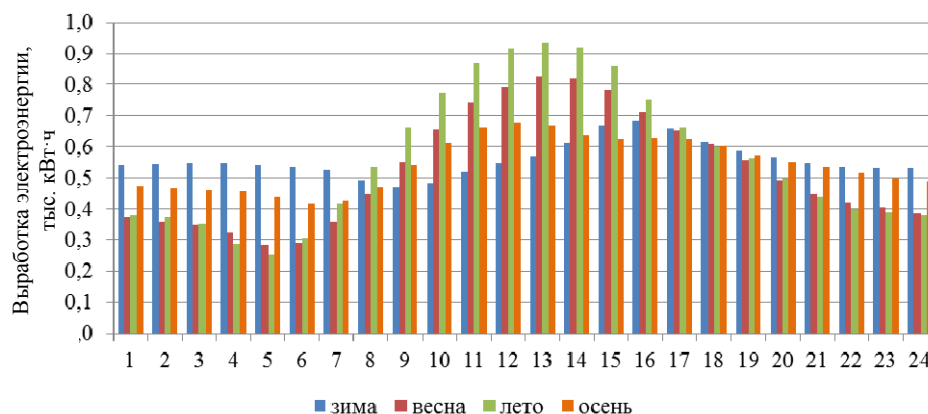


Рис. 2. График выработки энергии комплексом, состоящим из солнечной (0,75 МВт) и ветряной (1,5 МВт) электростанций в типовой день по сезонам года, тыс. кВт·ч

Fig. 2. Schedule of energy generation by a complex consisting of a solar (0.75 MW) and a wind (1.5 MW) power plant on a typical day by season, thousand kW·h

На рис. 3 для сравнения представлена выработка электроэнергии комплексом с соотношением 1:1 общей мощностью 3,0 МВт, где становится заметным явный переизбыток энергии в дневные часы в течение весеннего и летнего периодов.

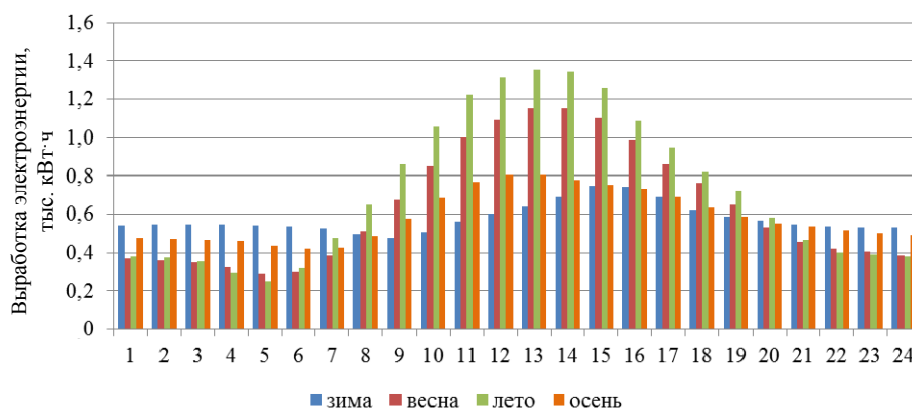


Рис. 3. График выработки энергии комплексом, состоящим из солнечной (1,5 МВт) и ветряной (1,5 МВт) электростанций в типовой день по сезонам года, тыс. кВт·ч

Fig. 3. Schedule of energy generation by a complex consisting of a solar (1.5 MW) and a wind (1.5 MW) power plant on a typical day by season, thousand kW·h

Выход за рекомендуемый диапазон соотношения мощностей и сильное занижение установленной мощности солнечных электростанций также приводит к нежелательным отклонениям от модели графика нагрузки. На графике рис. 4 продемонстрированы результаты моделирования выработки энергии комплексом общей мощностью 1,8 МВт с соотношением 0,2:1,0, где дисбаланс будет наблюдаться уже в осенний и зимний периоды.

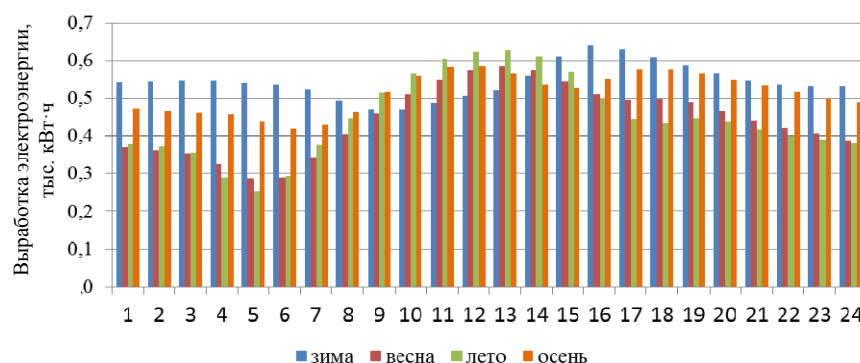


Рис. 4. График выработки энергии комплексом, состоящим из солнечной (0,3 МВт) и ветряной (1,5 МВт) электростанций в типовой день по сезонам года, тыс. кВт·ч

Fig. 4. Schedule of energy generation by a complex consisting of a solar (0.3 MW) and a wind (1.5 MW) power plant on a typical day by season, thousand kW·h

Большая доля ветряных установок увеличивает выработку энергии в ночное время суток и не позволяет повысить выработку в дневное время, когда в энергосистеме наблюдается наибольшее потребление. Большая доля в комплексе солнечных установок приводит к излишнему росту вырабатываемой энергии в дневное время в теплый период года. Поэтому важно соблюдение баланса и комплексное использование солнечной и ветряной генераций для более устойчивой совместной работы, минимизации влияния возобновляемых источников энергии на процессы регулирования в энергосистеме и снижения емкости накопителей энергии при их применении.

ВЫВОДЫ

1. Определен оптимальный диапазон соотношения установленных мощностей солнечных и ветряных электростанций в отдельном комплексе и энергосистеме для условий Республики Беларусь, который составил от 0,4:1,0 до 0,6:1,0 (солнце:ветер). Данное соотношение мощностей позволяет вырабатывать электроэнергию за счет указанных возобновляемых источников энергии в размере, максимально близком к значениям модели суточного графика нагрузки в энергосистеме.

2. Выход за пределы рекомендуемого диапазона приводит либо к переизбытку выработки в ночное время в течение холодного периода года с соответствующим дефицитом в дневное время в течение теплого периода года при превышении генерации за счет ветра, либо к переизбытку в дневное время в теплый период года и дефициту в ночное время в холодный период года при превышении генерации за счет солнца.

3. Определена оптимальная удельная мощность систем накопления энергии для комплексов, состоящих из солнечных и ветряных электростанций в рекомендуемых соотношениях установленных мощностей, которая составила 0,4–0,8 кВт·ч/кВт суммарной установленной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михалевич, А. А. Энергетическая безопасность / А. А. Михалевич // Наука и инновации. 2021. № 10. С. 10–13.
2. Чиж, Е. П. Энергетическая безопасность Республики Беларусь с учетом ввода БелАЭС [Электронный ресурс] / Е. П. Чиж // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов: сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 50-летию Научной школы в области исследования модернизации экономики, 22 ноября 2018 г. / редкол.: С. Ю. Солодовников (председатель) [и др.]. Минск: БНТУ, 2018. Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/53105?show=full>.
3. Зорина, Т. Г. Влияние тенденций развития энергетического сектора Республики Беларусь на укрепление энергетической безопасности / Т. Г. Зорина, О. А. Любчик // Экономическая безопасность как основной приоритет устойчивого развития государства: тез. докл. респ. науч.-практ. конф. (Минск, 26 нояб. 2021 г.) / учреждение образования «Акад. М-ва внутр. дел Респ. Беларусь»; редкол.: О. В. Маркова (отв. ред.) [и др.]. Минск: Академия МВД, 2021. С. 59–62.
4. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 23 декабря 2015, № 1084 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084>. Дата доступа: 12.06.2023.
5. Методические подходы к решению проблемы энергетической безопасности Молдовы и Беларуси / Е. В. Быкова [и др.]. Кишинев, 2010. 100 с. (Сер. Энергетическая безопасность; кн. 5).
6. Любчик, О. Анализ эффективности работы солнечных электростанций в Республике Беларусь / О. Любчик // *Innovatsion Tekhnologiyalar*. 2022. Vol. 1. С. 60–63.
7. Любчик, О. А. Определение потенциала возобновляемых источников энергии в Республике Беларусь и оценка их использования в аграрном секторе / О. А. Любчик // Энерго- и ресурсосбережение: новые исследования, технологии и инновационные подходы: сб. тр. междунар. конф., Карши, 24–25 сент. 2021 г. Т.: Voris-nashriyot, 2021. С. 281–286.
8. IRENA [Electronic resource]. Mode of access: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Technologies/>. Date of access: 17.07.2023.
9. Повышение точности прогнозирования генерации фотоэлектрических станций на основе алгоритмов k -средних и k -ближайших соседей / П. В. Матренин [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2023. Т. 66, № 4. С. 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321>.
10. Михалевич, А. А. Моделирование работы Белорусской энергосистемы с учетом ввода АЭС / А. А. Михалевич, В. А. Рак // *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 1. С. 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14>.
11. Концепция применения систем накопления энергии (СНЭ) на базе литий-ионных аккумуляторов в Белорусской энергосистеме: отчет о НИР (Этап 2) / РУП «БЕЛТЭИ»; рук. А. Ф. Молочко. Минск, 2022. 189 с. № Б 22-4/3.
12. Разработка энергетического баланса энергосистемы Беларуси с учетом развития возобновляемых источников энергии, в том числе ветроэнергетики: научно-технический отчет / А. Ф. Молочко [и др.]. Минск: Альфа-книга, 2019. 238 с.

Поступила 20.06.2023 Подписана в печать 22.08.2023 Опубликовано онлайн 29.09.2023

REFERENCES

1. Mikhalevich A. A. (2021) Energy Security. *Nauka i Innovatsii = Science and Innovations*, (10), 10–13 (in Russian).
2. Chizh E. P. (2018) Energy Security of the Republic of Belarus Taking Into Account the Commissioning of the Belarusian NPP. *Modernizatsiya Khozyaistvennogo Mekhanizma Skvoz'*

- Prizmu Ekonomicheskikh, Pravovykh, Sotsial'nykh i Inzhenernykh Podkhodov: Sb. Materialov XIII Mezhdunar. Nauchn.-Prakt. Konf., Posvyashchennoi 50-Letiuyu Nauchnoi Shkoly v Oblasti Issledovaniya Modernizatsii Ekonomiki, 22 noyabrya 2018 g.* [Modernization of the Economic Mechanism through the Prism of Economic, Legal, Social and Engineering Approaches: Collection of Materials of the XIII International Scientific and Practical Conference Dedicated to the 50th Anniversary of the Scientific School in the Field of Economic Modernization Research, November 22, 2018]. Minsk, BNTU. Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/53105?show=full> (in Russian).
3. Zorina T. G., Lyubchik O. A. (2021) Influence of Trends in the Development of the Energy Sector in Belarus on the Enhancing of Energy Security. *Ekonomicheskaya Bezopasnost' kak Osnovnoi Prioritet Ustoichivogo Razvitiya Gosudarstva: Tez. Dokl. Resp. Nauch.-Prakt. Konf. (Minsk, 26 Noyab. 2021 g.)* [Economic Security as the Main Priority of Sustainable Development of the State: Abstracts of the Republican Scientific and Practical Conference (Minsk, 26 Nov. 2021)]. Minsk, Academy of the Ministry of Internal Affairs of the Republic of Belarus, 59–62 (in Russian).
 4. The Concept of Energy Security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, December 23, 2015, No. 1084. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21501084> (accessed 12 June 2023) (in Russian).
 5. Bykova E. V., Mikhalevich A. A., Postolatii V. M., Fisenko S. P., Shnip A. I., Rimko D. V., Grodetskii M. V. (2010) *Methodological Approaches to Solving the Problem of Energy Security of Moldova and Belarus. Energy Security. Book 5*. Chisinau. 100 (in Russian).
 6. Lyubchik O. (2022) Analysis of the Efficiency of Solar Power Plants in the Republic of Belarus. *Innovatsion Texnologiyalar*, 1, 60–63 (in Russian).
 7. Lyubchik O. A. (2021) Determination of the Potential of Renewable Energy Sources in the Republic of Belarus and Assessment of their Use in the Agricultural Sector. *Energo- i Resursosberezhenie: Novye Issledovaniya, Tekhnologii i Innovatsionnye Podkhody: Sb. Tr. Mezhdunar. Konf., Karshi, 24–25 sent. 2021 g.* [Energy Conservation and Resource Conservation: New Research, Technologies and Innovative Approaches: Proceedings of the International Conference, Qarshi, September 24–25, 2021]. Tashkent, “Voriz-Nashriyot” Publ., 281–286 (in Russian).
 8. IRENA. Available at: <https://www.irena.org/Data/View-data-by-topic/Capacity-and-Generation/Technologies/> (accessed 17 July 2023).
 9. Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Gamaley V. V., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A., Potachits Y. V. (2023) Improving of the Generation Accuracy Forecasting of Photovoltaic Plants Based on *k*-Means and *k*-Nearest Neighbors Algorithms. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 66 (4), 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321> (in Russian).
 10. Mikhalevic A. A., Rak U. A. (2021) Belarus Power Engineering System Modeling Taking into Account the Nuclear Power Plant Commissioning. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (1), 5–14. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-5-14> (in Russian).
 11. Molochko A. F. (Supervisor), RUE “BELTEP” (2022) *The Concept of Using Energy Storage Systems (ESS) Based on Lithium-Ion Batteries in the Belarusian Energy System: Research Report (Stage 2). No B 22-4/3*. Minsk 189 (in Russian).
 12. Molochko A. F., Sivak A. V., Privalov A. S., Chernetsov O. D., Zhuchenko E. A., Shcherbich V. I. [et al.] (2019) *Development of the Energy Balance of the Belarusian Energy System Taking into Account the Development of Renewable Energy Sources, Including Wind Energy: Scientific and Technical Report*. Minsk, Alfa-Book Publ. 238 (in Russian).