

Proces autokonsumpcji energii elektrycznej w systemach złożonych z instalacji PV i pompy ciepła

Streszczenie. W pracy skupiono się na analizie technicznej efektywności wykorzystania instalacji fotowoltaicznej (PV) o mocy 20 kWp w gospodarstwie domowym, w którym wykorzystano sprężarkową pompę ciepła w celach grzewczych. W wyniku analizy, na podstawie danych z falownika porównano ilość wyprodukowanej energii przez instalację w latach 2020-2021. Natomiast na podstawie danych, uzyskanych z faktury za energię elektryczną w 2021 roku, określono przedział okresu grzewczego, średnią miesięczną wartość poboru energii elektrycznej na cele bytowe oraz określono średnią wartość poboru energii przez sprężarkową pompę ciepła w tym roku. W części zasadniczej wykorzystując dostępne dane wyznaczono dla każdego miesiąca w 2021 roku współczynnik autokonsumpcji energii z instalacji PV, potencjalny wskaźnik pokrycia potrzeb własnych przez instalację oraz wskaźnik wykorzystania energii z modułów fotowoltaicznych, co można utożsamiać z efektywnością energetyczną instalacji PV.

Abstract. This paper focuses on the technical efficiency analysis of a 20 kWp photovoltaic (PV) installation in a household using a compressor heat pump for heating purposes. As a result of the analysis, the amount of energy produced by the installation between 2020 and 2021 was compared using data from the inverter, while the heating period interval, the average monthly electricity consumption for domestic purposes and the average energy consumption of the compressor heat pump in that year were determined using data obtained from the electricity invoice in 2021. In the main part, using the available data, the self-consumption rate of energy from the PV installation, the potential rate of coverage of own needs by the installation and the rate of energy use from the photovoltaic modules, which can be equated with the energy efficiency of the PV installation, were determined for each month in 2021 (**The process of self-consumption of electricity in systems consisting of PV installations and heat pump**).

Słowa kluczowe: moduł fotowoltaiczny, pompa ciepła, współczynnik autokonsumpcji, współczynnik wykorzystania energii PV

Keywords: photovoltaic module, heat pump, self-consumption factor, PV energy use factor

Wstęp

Autokonsumpcja energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznych (PV) to istotny temat, który zyskuje coraz większe znaczenie w kontekście zrównoważonego rozwoju [1],[2] efektywności energetycznej. Do kluczowych punktów, które mogą być istotne w tym obszarze problematyki należą: 1) technologie i systemy magazynowania energii, co może obejmować analizę dostępnych technologii magazynowania, takich jak akumulatory litowo-jonowe, akumulatory przepływowe [3],[4], czy technologie paliwowe, w powiązaniu z magazynami ciepła; 2) badanie efektywności i wydajności instalacji fotowoltaicznych w kontekście autokonsumpcji, w tym ocena strat przesyłu i magazynowania tej energii w różnych formach użytecznych [5]; 3) ocena rentowności inwestycji PV z punktu widzenia autokonsumpcji energii elektrycznej [6]. Warto tu uwzględnić koszty instalacji, koszty eksploatacji oraz potencjalne oszczędności wynikające z redukcji rachunków za energię elektryczną; 4) analiza różnych modeli biznesowych związanych z autokonsumpcją energii elektrycznej, takich jak leasing paneli fotowoltaicznych, umowy odsprzedaży energii [7], czy też samodzielne zarządzanie instalacją i produkcją energii; 5) przegląd obowiązujących przepisów prawnych oraz polityki dotyczącej autokonsumpcji energii elektrycznej, w tym kwestii związanych z opodatkowaniem [8], oraz wymogami technicznymi stawianymi nowo powstałym inwestycjom; 6) badanie postaw i zachowań społecznych wobec autokonsumpcji energii elektrycznej oraz identyfikacja czynników determinujących akceptację i przyzwolenie społeczne tego rozwiązania w ujęciu jego praktycznych zastosowań [9]; 7) przegląd przypadków identyfikacji procesu autokonsumpcji energii elektrycznej w różnych kontekstach, takich jak domy prywatne, przedsiębiorstwa, czy też instytucje publiczne, wraz z analizą możliwych korzyści, ograniczeń i wyzwań [10]. Mając na uwadze tak szerokie spektrum problematyki odnoszące się do procesu autokonsumpcji energii elektrycznej niniejsze opracowanie zostało ograniczone do studium przypadku w obszarze prosumenckich instalacji PV, których w Polsce funkcjonuje

już około miliona, przy czym większość jeszcze w net-bilingu z perspektywą konieczności przejścia do net-meteringu po okresie 15 letnim obowiązywania umowy zawartej do kwietnia 2022r.

Cel i zakres pracy

Celem pracy było skwantyfikowanie procesu autokonsumpcji energii elektrycznej wytworzonej w fotowoltaicznej instalacji solarnej (PV) na przykładzie gospodarstwa domowego wyposażonego w instalację prosumencką rozliczaną w net-bilingu, która współpracuje w układzie złożonym z pompą ciepła. Dolnym źródłem ciepła jest grunt, w którym jest umiejscowiony wymiennik dolnego źródła ciepła o bezpośrednim odparowaniu czynnika w tym gruntuowym kolektorze.

Zakres pracy obejmował analizę produkcji energii z przydomowej instalacji PV o mocy 20 kWp w układzie miesięcznym za okres dwóch lat (2020÷2021). Natomiast analiza wybranych wskaźników określających poziom autokonsumpcji energii elektrycznej wyprodukowanej z instalacji obejmuje tylko jeden rok ze względu na kompletność danych. Należy nadmienić, iż badania zostały przeprowadzone w gospodarstwie domowym, w którym energia elektryczna była jedynym nośnikiem energetycznym służącym do zaspokojenia wszystkich potrzeb energetycznych, tj. ciepła dla przygotowania posiłków, ciepłej wody użytkowej (c.w.u.), oraz ogrzewania budynku (co), przy czym dwa ostatnie procesy były realizowane z wykorzystaniem pompy ciepła. W systemie energetycznym nie zastosowano dodatkowych magazynów energii poza przygotowaniem ciepłej wody użytkowej.

Obiekt badań

Obiektem badań było gospodarstwo domowe wyposażone odpowiednio w instalację fotowoltaiczną i ciepłą opartą na ekologicznym źródle ciepła - sprężarkowej pompie ciepła, które to zasilają dom jednorodzinny znajdujący się w województwie śląskim. Budynek o powierzchni użytkowej 350 m² został wybudowany w technologii energooszczędnej ocieplony

styropianem o grubości 10 cm. Zastosowany system ogrzewania w całym budynku został oparty na technologii niskotemperaturowej ogrzewania podłogowego.

Instalacja fotowoltaiczna o mocy 19,98 kWp została przyłączona do systemu dystrybucji energii Tauron Dystrybucja SA w 2019 r. Jest posadowiona na gruncie, a w jej skład wchodzi 74 panele fotowoltaiczne o mocy 270 W każdy. Panele są zamontowane na dwóch stelażach, jeden za drugim w odległości 7 m. Na pierwszym stelażu znajduje się 38 paneli w dwóch rzędach, a na drugim 36 modułów, w tej samej konfiguracji. Instalacja PV pracuje w systemie on-grid i jest oparta na modułach polikrystalicznych firmy Maysun MS 270 P-60 Series, a jej powierzchnia czynna wynosi 116,3 m². Całość instalacji PV jest połączona z jedynym falownikiem Fronius Symo Advanced 20.0-3-M w układzie dwóch łańcuchów paneli.

Pompa ciepła Sofath Caliane 15T to pompa typu sprężarkowego z bezpośrednim odparowaniem w gruncie. Czynnikiem krążącym w kolektorze gruntowym oraz w pompie ciepła jest czynnik R410A. Bezpośrednie wykorzystanie procesu parowania w miejscu pozyskiwania energii, tj. kolektorze gruntowym, znacząco podnosi skuteczność pobierania ciepła. Sprężarka jak w każdej sprężarkowej pompie ciepła zapewnia cyrkulację czynnika, który w tym przypadku krąży również w obwodzie gruntowego kolektora, co eliminuje konieczność stosowania dodatkowej pompy do wymuszania obiegu pierwotnego dolnego źródła ciepła. Pompa służy również do podgrzewania ciepłej wody użytkowej (cwu). Zbiornik na cwu wynosi 300 litrów. Zgodnie z danymi znamionowymi dla parametrów pracy E4/W35 (temperatura dolnego źródła wynosi 4°C, górnego 35°C) współczynnik COP wynosi 4,74, a pobór mocy elektrycznej wynosi 3,8 kW co daje moc cieplną 18 kW. Przy wzroście parametrów pracy do E4/W45, COP spada do 3,73 natomiast pobór mocy elektrycznej rośnie do 4,65 kW, a moc cieplna wyjściowa obniża się do wartości 17,34 kW.

Metodyka badań

Korzystając z danych bilansujących energię elektryczną pobraną z sieci, wprowadzoną do sieci oraz danych bezpośrednio zapisanych w pamięci falownika dotyczących produkcji energii elektrycznej przez moduły fotowoltaiczne, można określić kilka współczynników identyfikujących w jakim stopniu energia elektryczna jest wykorzystana w gospodarstwie domowym wyposażonym w pompę ciepła.

Dla określenia współczynnika autokonsumpcji, czyli wielkości jaką instalacja fotowoltaiczna pokrywa potrzeby własne gospodarstwa bez udziału sieci, wzięto pod uwagę ilość energii wyprodukowanej przez instalację oraz ilość energii wprowadzonej do sieci elektroenergetycznej co w sformalizowanym zapisie zdefiniowano zależnością (1).

$$W_A = \frac{E_r - E_w}{E_r} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

W_A – współczynnik autokonsumpcji %, E_r – energia wyprodukowana przez instalację kWh, E_w – energia wprowadzona do sieci kWh.

Mając na uwadze dane zagregowane do miesięcy w dalszej kolejności postanowiono sprawdzić jak kształtuje się wskaźnik pokrycia potrzeb własnych na energię elektryczną dla gospodarstwa domowego. Wskaźnik ten został zdefiniowany zależnością (2) a identyfikuje, w jakim stopniu energia generowana z PV jest w stanie pokryć całkowite zapotrzebowanie na energię gospodarstwa w danym miesiącu.

$$W_{ppw} = \frac{E_r}{E_p + (E_r - E_w)} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

W_{ppw} – potencjalny wskaźnik pokrycia potrzeb własnych %, E_r – energia wyprodukowana przez instalację kWh, E_p – energia pobrana z sieci elektroenergetycznej kWh, E_w – energia wprowadzona do sieci kWh.

Na podstawie tego wskaźnika można szacować w przyszłości wielkość magazynów oraz czasookres przechowywania energii np. w ciepło, wyprodukowanej w PV bez potrzeby wykorzystywania przeciążonej sieci.

Dla pełnej identyfikacji konsumpcji energii produkowanej z przydomowych instalacji PV postanowiono ocenić zimność wykorzystania energii w miejscu. Zgodnie z umową w programie prosument dla instalacji o mocy większej niż 10 kWp, a nie przekraczającej 50 kWp właściciel instalacji może odebrać 70% energii oddanej do sieci. W takim przypadku wskaźnik wykorzystania energii w miejscu (gospodarstwie domowym) został zdefiniowany zgodnie z zależnością (3):

$$W_{pv} = \frac{E_{kb} + E_w \cdot 0,7}{E_r} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

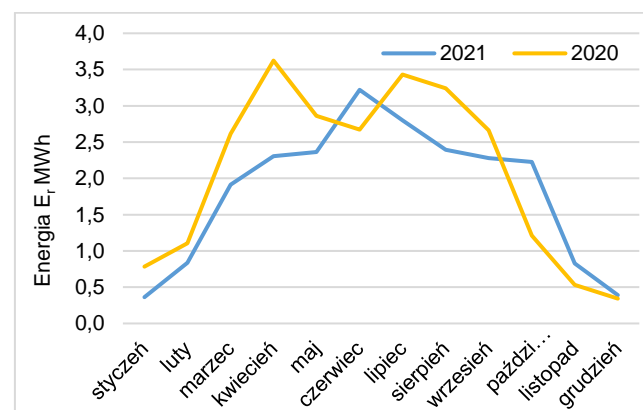
W_{pv} – wskaźnik wykorzystania energii z modułów fotowoltaicznych %, E_{kb} – konsumpcja bezpośrednia energii z instalacji PV kWh,

E_w – energia wprowadzona do sieci elektroenergetycznej kWh.

Wielkość bezpośredniej konsumpcji E_{kb} energii elektrycznej z przydomowej instalacji można wyznaczyć, jako różnicę energii wyprodukowanej przez instalację (E_r) i energii wprowadzonej do sieci (E_w). Wskaźnik ten można również interpretować, jako efektywność wykorzystania energii elektrycznej wyprodukowanej przez instalację PV.

Wyniki badań

Przeprowadzono szczegółową analizę procesu autokonsumpcji na wybranym przykładzie gospodarstwa domowego wyposażonego w ekologiczny system energetyczny bez magazynowania energii. Zasadniczy przedmiot rozważań został poprzedzony analizą produkcji energii elektrycznej z przydomowej instalacji PV, co zostało przedstawione graficznie na wykresach (rys. 1 i rys. 2).

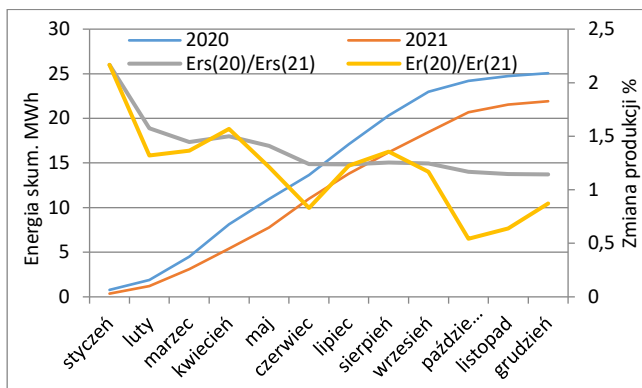


Rys. 1. Produkcja energii elektrycznej przez instalację PV w 2020 i 2021 roku

Analiza ta wynika z faktu, znacznej różnicy w wyprodukowanej energii przez instalację PV w okresie dwóch lat (2020, 2021). W roku 2020 przedmiotowa instalacja wyprodukowała 25,1 MWh, a rok później już 21,9

MWh, co daje różnicę 3,2 MWh. Jest to dość znaczne zmniejszenie produkcji wynoszące aż 14,5%, co zostało zauważone przez właściciela i stało się podstawą do bardziej szczegółowej analizy ponieważ instalacja była w trzecim roku eksploatacji.

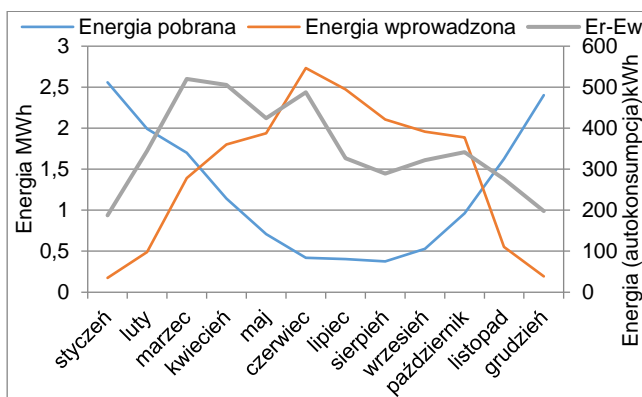
Największe różnice w produkcji wystąpiły w pierwszym półroczu a dokładnie w kwietniu, w którym to wzrost produkcji, w 2020 r. był o ponad 50 % większy niż rok później. Dla dalszej analizy skwantyfikowano te różnice również w odniesieniu do wartości skumulowanej produkcji energii, co zostało przedstawione na wykresie (rys. 2).



Rys. 2. Skumulowana produkcja energii elektrycznej przez instalację PV, oraz jej zmiana w latach 2020÷2021

Na wykresie przedstawiającym skumulowaną energię wyprodukowaną przez instalację można zaobserwować, iż od początku roku krzywe reprezentujące sumaryczną energię systematycznie się rozchodzą aż do października. Natomiast pod koniec roku te krzywe zaczynają się zbliżać do siebie, co świadczy o tym, że w okresie jesiennym ta tendencja w produkcji energii się odwróciła, ale ze znacznie mniejszą intensywnością. Natomiast na przebiegu zmiany produkcji energii liczony miesiąc do miesiąca największe różnice wystąpiły w okresie od stycznia do kwietnia przy czym należy zaznaczyć, iż kwiecień w 2020 r. charakteryzował się największą produkcją na poziomie 3,62 MWh, co stanowi odpowiednio 14,4% i 16,5% produkcji całorocznej w roku 2020 r. i 2021 r.

Zasadniczą część analizy rozpoczęto od przedstawienia skwantyfikowanych pozostałych danych w tym energii pobranej z sieci (E_p), energii wprowadzonej do sieci (E_w), oraz energii skonsumowanej na miejscu wyznaczonej z różnicy ($E_r = E_w$), co zostało przedstawione na wykresie (rys. 3).

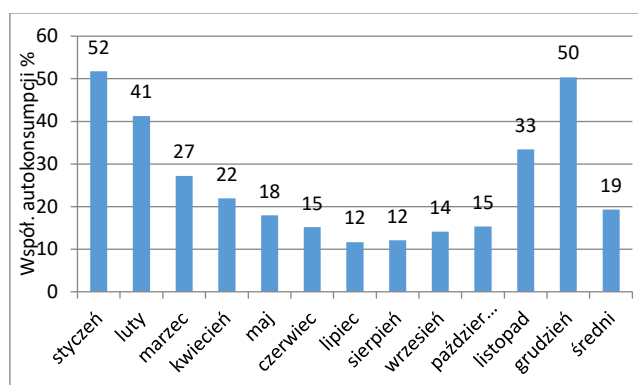


Rys. 3. Energia pobrana i wprowadzona do sieci oraz energia skonsumowana na miejscu w układzie miesięcznym

Przedstawione przebiegi energii wprowadzonej do i pobranej z sieci w układzie miesięcznym można zinterpretować, jako typowe parabole wzajemnie

odwrócone, które przecinają się w marcu tj. z początkiem wiosny i w październiku miesiąc po równonocy. Na podstawie przedstawionych danych można zidentyfikować ilość energii przeznaczoną na ogrzewanie i pozostałe procesy w gospodarstwie domowym. Pozostałe procesy w gospodarstwie można oszacować, jako sumę energii pobranej z sieci w miesiącach czerwiec-lipiec powiększoną o wartość konsumpcji własnej tj. o około 300 kWh, co łącznie daje wartość 700 kWh miesięcznie, a w skali roku to 8 MWh.

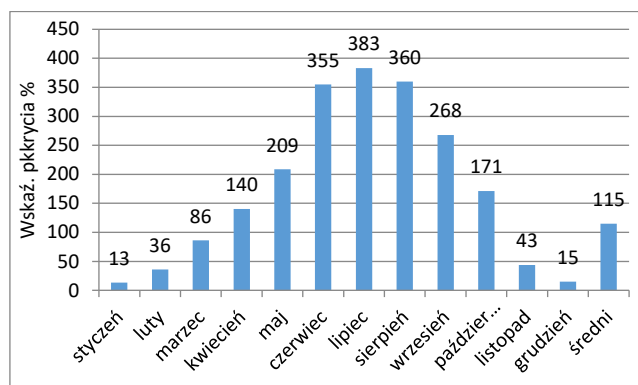
Zgodnie z zależnością (1) i na podstawie przedstawionych danych wyznaczono współczynnik autokonsumpcji, a dokładnie jego zmienność dla poszczególnych miesięcy roku (rys. 4). Tylko w pięciu zimowych miesiącach współczynnik ten waha się w przedziale 27÷52%, natomiast w okresie czerwiec-październik kształtuje się na bardzo niskim poziomie w zakresie 12÷15%. Dość niepokojący jest fakt, iż w miesiącach o najmniejszej produkcji energii elektrycznej współczynnik ten nie przekracza znacząco 50%.



Rys. 4. Zmienność roczna współczynnika autokonsumpcji energii elektrycznej z instalacji PV 20 kWp

Całoroczny współczynnik autokonsumpcji nie przekracza 20%, co mając na uwadze rozliczenie w systemie net-bilingu, gdzie właściciel instalacji PV pozostawia w sieci 30% energii elektrycznej wyprodukowanej do niej nie jest korzystne.

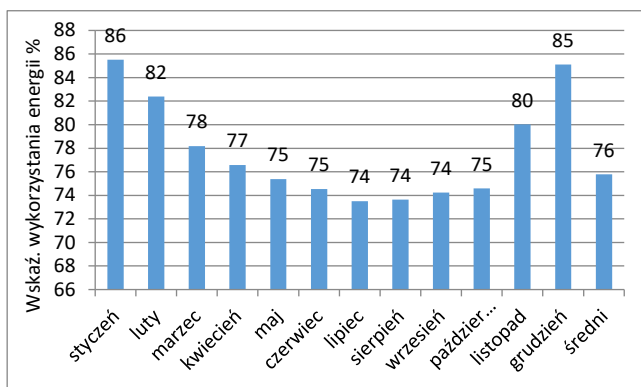
Następnie zgodnie z zależnością (2) obliczono wskaźnik pokrycia potrzeb własnych gospodarstwa z energii wyprodukowanej z PV (rys. 5). Wskaźnik ten przedstawia, w jakim stopniu potencjalnie instalacja PV jest w stanie pokryć zapotrzebowanie na energię elektryczną.



Rys. 5. Potencjalny wskaźnik pokrycia potrzeb własnych z instalacji PV

Średnioroczny potencjał produkcji energii elektrycznej z instalacji PV przekracza potrzeby gospodarstwa o 15%. Jednak ze względu na zastosowany system ogrzewania niskotemperaturowego bez magazynowania energii, który w

najchłodniejszych miesiącach może być pokryty z PV tylko w 15%, co jest stanowczo za mało. Nadwyżki energii, które występują w okresie od marca do października są obciążone 30% kosztem magazynowania/przechowywania energii w systemie. Pomimo ponad trzykrotnej nadprodukcji energii elektrycznej w miesiącach czerwiec-sierpień to zaspokojenie rocznych potrzeb energetycznych gospodarstwa na poziomie 19 MWh nie jest możliwe przy produkcji niespełna 22 MWh z instalacji PV, co wynika z 30% obciążenia systemowego. W ostatniej części analizy postanawiano sprawdzić efektywność wykorzystania energii elektrycznej. Na podstawie zależności (3) wyznaczono wskaźnik wykorzystania energii generowanej z instalacji PV. Z definicji wynika, iż zmienność tego wskaźnika będzie w zakresie od 70% (co oznacza, że wolumen produkowanej energii jest w całości przekazany do sieci) do 100% w przypadku gdy całość energii jest konsumowana na miejscu.



Rys. 6. Wskaźnik wykorzystania energii elektrycznej wygenerowanej z PV

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że ten wskaźnik dla analizowanego gospodarstwa zmienia się w zakresie od 74% do 86% w okresie zimowym. Średnioroczna wartość tego wskaźnika kształtuje się na poziomie 76% i jest to dość niska wartość świadcząca o tym, że w niewielkim udziale energia z PV jest konsumowana na miejscu bez obciążenia systemu elektroenergetycznego. Mając na uwadze powyższą analizę warto zaznaczyć, że samo wyposażenie gospodarstwa domowego w odbiorniki energii elektrycznej nie poprawi procesu autokonsumpcji bez odpowiedniego zarządzania pracą tych urządzeń. Analiza również uwiadcza, że krótkotrwałe magazyny energii elektrycznej nie poprawią znacząco procesu autokonsumpcji w okresie od maj do września. Magazynowanie energii w instalacja przydomowych powinno się rozwijać w kierunku magazynów długotrwałych, o możliwości przechowania energii do kilku miesięcy.

Podsumowanie

Dokonując analizy efektywności wykorzystania systemu Odnawialnych Źródeł Energii (OZE), a dokładnie procesu autokonsumpcji energii z PV w gospodarstwie domowym, wybrano budynek mieszkalny jednorodzinny o standardowym wyposażeniu, w tym w sprężarkową pompę ciepła. Samo wyposażenie gospodarstwa w odbiorniki energii elektrycznej, pompę ciepła nie poprawia znacząco procesu autokonsumpcji, a szczególnie w przypadku większych instalacji powyżej 10 kWp. W analizowanym obiekcie współczynnik autokonsumpcji energii elektrycznej wyniósł 19% przy rocznej produkcji energii z PV na poziomie 22 MWh, a konsumpcji energii w gospodarstwie

19 MWh, w tym na ogrzewanie 11 MWh. Autokonsumpcja energii w układzie miesięczny zmienia się w zakresie od 200 do 500 kWh w miesiącach wiosennych marzec-kwiecień. W okresie roku kalendarzowego jest to wartość 4,22 MWh. Stosunkowo mała autokonsumpcja ma swoje odniesienie w niskim wskaźniku wykorzystania energii elektrycznej z instalacji PV, przeciętnie na poziomie 76% przy dolnej minimalnej wartości 70%. W pierwszej kolejności wskaźnik ten można poprawić przez odpowiedni system sterowania pracą urządzeń elektrycznych, oraz krótkotrwałymi magazynami energii. Jednak znaczny wskaźnik potencjału produkcji energii elektrycznej w miesiącach letnich czerwiec-sierpień wymusza konieczność poszukiwania rozwiązań długotrwałych magazynów energii, które pozwolą na odciążenie sieci elektroenergetycznej w najbardziej krytycznym okresie.

Autorzy: mgr. inż. Piotr Łyszczarz, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: piotr.lyszczarz@urk.edu.pl; dr. hab. inż. Jarosław Knaga, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: jaroslaw.knaga@urk.edu.pl; dr. inż. Krzysztof Nęcka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: krzysztof.nECKA@urk.edu.pl; dr. inż. Stanisław Lis, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków, e-mail: stanislaw.lis@urk.edu.pl; inż. Miłosz Nicpoń, absolwent Wydziału Inżynierii Produkcji i Energetyki, ul. Balicka 116B, 30-149 Kraków

LITERATURA

- [1] S. Leonori, G. Rizzoni, F. M. Frattale Mascioli, i A. Rizzi, „Intelligent energy flow management of a nanogrid fast charging station equipped with second life batteries”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, t. 127, s. 106602, maj 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106602.
- [2] E. Despotou, „Vision for Photovoltaics in the Future”, w *Comprehensive Renewable Energy*, Elsevier, 2012, s. 179–198. doi: 10.1016/B978-0-08-087872-0.00109-8.
- [3] L. Hatton i in., „The global and national energy systems techno-economic (GNESTE) database: Cost and performance data for electricity generation and storage technologies”, *Data in Brief*, t. 55, s. 110669, sie. 2024, doi: 10.1016/j.dib.2024.110669.
- [4] A. Vasilakis, I. Zafeiratou, D. T. Lagos, i N. D. Hatzigeorgiou, „The Evolution of Research in Microgrids Control”, *IEEE Open J. Power Energy*, t. 7, s. 331–343, 2020, doi: 10.1109/OAJPE.2020.3030348.
- [5] L. Garcia-Gutierrez, M. Aillerie, J. P. Sawicki, Z. Zheng, i R. Claverie, „Evaluation of solar photovoltaic efficiency on green and flat roofs: Experimental and comprehensive numerical analysis”, *Solar Energy*, t. 278, s. 112750, sie. 2024, doi: 10.1016/j.solener.2024.112750.
- [6] M. Zeraatpisheh, R. Arababadi, i M. Saffari Pour, „Economic Analysis for Residential Solar PV Systems Based on Different Demand Charge Tariffs”, *Energies*, t. 11, nr 12, s. 3271, lis. 2018, doi: 10.3390/en11123271.
- [7] C. Sarasa-Maestro, R. Dufo-López, i J. Bernal-Agustín, „Analysis of Photovoltaic Self-Consumption Systems”, *Energies*, t. 9, nr 9, s. 681, sie. 2016, doi: 10.3390/en9090681.
- [8] J. K. Kaldellis, M. Kapsali, i Ev. Katsanou, „Renewable energy applications in Greece—What is the public attitude?”, *Energy Policy*, t. 42, s. 37–48, mar. 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2011.11.017.
- [9] L. Whitmarsh, „Behavioural responses to climate change: Asymmetry of intentions and impacts”, *Journal of Environmental Psychology*, t. 29, nr 1, s. 13–23, mar. 2009, doi: 10.1016/j.jenvp.2008.05.003.
- [10] E. Sánchez, Á. Ordóñez, A. Sánchez, R. García Ovejero, i J. Parra-Domínguez, „Exploring the Benefits of Photovoltaic Non-Optimal Orientations in Buildings”, *Applied Sciences*, t. 11, nr 21, s. 9954, paź. 2021, doi: 10.3390/app11219954.