



DOI: <https://doi.org/10.14597/INFRAECO.2024.004>

**AUTOKONSUMPCJA ENERGII ELEKTRYCZNEJ
NA PRZYKŁADZIE DOMU JEDNORODZINNEGO
WYPOSAŻONEGO W INSTALACJĘ FOTOWOLTAICZNĄ
OGRZEWANEGO POMPĄ CIEPŁA**

**SELF-CONSUMPTION OF ELECTRICITY ON THE EXAMPLE
OF A SINGLE-FAMILY HOUSE EQUIPPED WITH
A PHOTOVOLTAIC INSTALLATION HEATED BY A HEAT PUMP**

Marcin PERZYŃSKI¹, Jarosław KNAGA, Krzysztof NĘCKA

STRESZCZENIE

Dynamiczny wzrost ilości instalacji fotowoltaicznych stawia pytanie odnośnie jak najbardziej efektywnego wykorzystania produkowanej z nich energii elektrycznej. W artykule przedstawiono wyniki badań wskaźnika autokonsumpcji dla domu jednorodzinnego wyposażonego w siłownię fotowoltaiczną. Analizy przeprowadzono z uwzględnieniem danych rzeczywistych dotyczących energii elektrycznej pochodzących z prosumenckiej instalacji fotowoltaicznej, sterownika pompy ciepła oraz portalu eLicznik Tauron Dystrybucja. Badania przeprowadzono dla lat 2022-2023 z uwzględnieniem zmiany profilu poboru energii elektrycznej wynikającej z demontażu dotychczasowego źródła ciepła i jego wymiany na rzecz sprężarkowej pompy ciepła.

Słowa kluczowe: mikroinstalacja fotowoltaiczna, energia elektryczna zużywana na bieżąco, gospodarstwo domowe, budynek jednorodzinny

ABSTRACT

The dynamic growth in the number of photovoltaic installations raises questions about the most efficient use of the electricity produced from them. The article presents the results of research on the self-consumption index for a single-family house equipped with a photovoltaic power plant. The analyses were carried out taking into account actual data on electricity from a prosumer photovoltaic installation, a heat pump controller and the eLicznik Tauron Dystrybucja portal. The research was carried out for the years 2022-2023 taking into account the change in the electricity consumption

¹ Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Polska

profile resulting from the dismantling of the current heat source and its replacement with a compressor heat pump.

Keywords: *photovoltaic micro-installation, electricity consumed on an ongoing basis, household, single-family building*

WSTĘP

W ostatnich latach na krajowym rynku energii elektrycznej widzimy szybki przyrost prosumenckich źródeł energii wywodzący się z branży fotowoltaicznej w skład, którego dużą część zajmują mikroinstalacje fotowoltaiczne. Według raportu Urzędu Regulacji Energetyki na koniec 2023 roku do sieci elektroenergetycznych w Polsce przyłączonych było ponad 1,4 mln mikroinstalacji wykorzystujących promieniowanie słoneczne. Ich łączna moc zainstalowana wyniosła ponad 11,3 GW (www.ure.gov.pl). Niemal 98% mikroinstalacji było użytkowanych przez prosumentów – według stanu na koniec 2023 r. prosumenci eksploatowali 1 386 792 ze wszystkich 1 403 875 mikroinstalacji. W 2023 r. przeszło 2/3 mikroinstalacji prosumenckich (blisko 930 tys.) przyłączonych było do sieci dwóch OSD: PGE Dystrybucja S.A. oraz Tauron Dystrybucja S.A. (www.ure.gov.pl).

Do tej pory w literaturze są artykuły dotyczące aspektów własnego zużycia energii elektrycznej wyprodukowanej przez mikroinstalacje fotowoltaiczne. Podąża za tym wzrost znaczenia czynników wpływających na autokonsumpcję. Uwarunkowań wpływających na autokonsumpcję energii elektrycznej w budynkach jednorodzinnych jest wiele i co więcej – wszystkie z nich wzajemnie na siebie oddziałują. Najważniejsze z nich to (www.ure.gov.pl):

1. Rozmiar instalacji – jeśli moc fotowoltaiki jest dobrze dopasowana do zapotrzebowania budynku, autokonsumpcja z natury będzie wyższa. Jeżeli natomiast z jakiegoś powodu jest przewymiarowana instalacja fotowoltaiczna, więcej prądu z fotowoltaiki będzie przekazywane do sieci.
2. Profil zużycia energii – jeżeli najwięcej prądu zużywa się w domu lub firmie za dnia, autokonsumpcja również będzie wyższa.
3. Zastosowanie inteligentnych systemów zarządzania energią – istnieją rozwiązania, które automatycznie dostosowują zużycie energii w budynku w odpowiedzi na produkcję energii elektrycznej przez instalację fotowoltaiczną, właśnie w celu zwiększenia autokonsumpcji.
4. Orientacja paneli fotowoltaicznych – panele skierowane na południe więcej energii produkują za dnia, natomiast panele skierowane na wschód/zachód więcej rano/wieczorem, co może mieć wpływ na ostateczną autokonsumpcję zważając na profil zużycia energii.
5. Warunki klimatu – w zależności od nasłonecznienia produkowana jest większa lub mniejsza. To także ma wpływ na autokonsumpcję. Dany miesiąc w roku może być też bardziej zachmurzony niż np. w ubiegłym sezonie.

Ciekawą osiągalną opcją przyczyniającą się do zwiększenia wskaźnika zużycia własnego energii elektrycznej wytwarzanej przez fotowoltaikę jest wykorzystanie banku akumulatorów, których zadaniem jest zatrzymanie nadmiaru energii słonecznej w godzinach słonecznych, która następnie jest wykorzystywana wieczorem (www.fotowoltaikaonline.pl). Jednak obecne

i oczekiwane ceny baterii na najbliższe kilka lat są zbyt wysokie, aby koszty tej opcji były konkurencyjne w większości sytuacji.

Z ekonomicznego punktu widzenia właściciel instalacji fotowoltaicznej może albo samodzielnie zużywać wytwarzaną energię fotowoltaiczną, albo wprowadzać ją do sieci. Jednak włączenie lokalnego systemu magazynowania energii do systemu fotowoltaicznego jest godnym podziwu rozwiązaniem zwiększającym zużycie własnej energii fotowoltaicznej poprzez magazynowanie nadwyżki energii fotowoltaicznej do późniejszego wykorzystania. Konsumpcja własna energii z PV jest definiowana, jako część całkowitej produkcji fotowoltaicznej zużytej przez prosumenta na zaspokojenie jego lokalnego zapotrzebowania na energię.

Zwiększenie zużycia energii z fotowoltaiki na potrzeby własne mogłoby zmniejszyć uzależnienie od sieci dystrybucji energii elektrycznej, co jest korzystne ekonomicznie dla właściciela budynku. Obecnie większość magazynów energii sprzężonych z fotowoltaiką jest podłączona do sieci, ponieważ wytwarzanie energii fotowoltaicznej i pojemność magazynowania energii w akumulatorach nie wystarczają, aby zaspokoić lokalne zapotrzebowanie na energię.

Przeprowadzono wiele badań mających na celu zwiększenie zużycia własnego energii fotowoltaicznej poprzez sterowanie pracą pomp ciepła za pomocą systemu zarządzania energią w budynku (BEMS) (Jallouli i Krichen, 2012). Podobnie, w badaniu (Patera, 2023) zastosowano różne strategie kontrolowania działania akumulatorów w celu poprawy zużycia własnego energii fotowoltaicznej. Strategie te obejmują;

1. dzienny dynamiczny limit oddawania energii do sieci w oparciu o idealne prognozy,
2. stały limit oddawany do sieci w wysokości 70%,
3. maksymalizacja zużycia własnego.

Wyniki Pater (2023) pokazały, że pierwsza strategia przewyższa inne przy zużyciu energii na potrzeby własne PV powyżej 78%. Połączona praca pompy ciepła, magazynowania energii akumulatorowej i magazynowania energii cieplnej zmniejsza ograniczenie PV nawet o 21%. Zmniejszenie zużycia energii na potrzeby własne PV dzięki pojazdom elektrycznym typu plug-in (PEV) odnotowano nawet o 20% (Patera, 2023).

Powyższe badania skupione były tylko na zbadaniu opcji elastyczności popytu budynku w celu osiągnięcia pełnego pokrycia potrzeb budynku; na przykład zwiększenie konsumpcji własnej energii fotowoltaicznej i obniżenie kosztów energii elektrycznej. Podobnie, wielkość zapotrzebowania na zasoby energetyczne budynku może być wykorzystana do świadczenia usług DR w sieci. Techniki oparte na odzyskiwaniu po awarii mogą być stosowane w budynkach do sterowania dwukierunkowym przepływem energii podczas pracy w trybie podłączonym do sieci (Rehman i in., 2020).

Wraz ze zwiększeniem udziału energii elektrycznej wytwarzanej przez elektrownie fotowoltaiczne pojawia się potrzeba pełnego połączenia tych systemów z sieciami elektroenergetycznymi. Całkowite scalenie generatora z siecią wymaga wiedzy dotyczącej procesu produkcji energii elektrycznej wytwarzanej przez ten generator. Dzięki tej wiedzy generator można uwzględnić w planowaniu sieci i możliwe będzie dynamiczne dostosowywanie jego mocy w odpowiedzi na zapotrzebowanie sieci w czasie rzeczywistym. Stereotypowo energię generowaną z fotowoltaiki, podobnie jak z innych odnawialnych źródeł energii, takich jak wiatr, uważano za niekontrolowane i nieprzewidywalne źródło energii elektrycznej. W

konsekwencji nie jest postrzegana przez operatorów sieci, jako niezawodne źródło energii. Zawodność fotowoltaiki wynika z jej zależności od warunków meteorologicznych: natężenia promieniowania i temperatury. Gdyby te dwie zmienne meteorologiczne można było przewidzieć z wystarczającą precyzją, możliwe byłoby oszacowanie produkcji energii elektrycznej przez system fotowoltaiczny. Dało by to podstawę do traktowania fotowoltaiki jako bardziej niezawodnego źródła energii elektrycznej (Rathor i Saxena, 2020).

Możliwość integracji systemów fotowoltaicznych (PV) z siecią elektroenergetyczną pozwala na zaoszczędzenie dużej ilości energii wytwarzanej z paliw kopalnych, szczególnie w okresie dobowym, kiedy obserwuje się największe zużycie energii elektrycznej, co prowadzi do powstania technologii o niskim wpływie ekonomicznym i wzajemnie kompensuje się pod względem dostępności energii słonecznej w okresie zwiększonego obciążenia elektrycznego. W opracowaniu (Masa-Bote i in., 2014) autorzy wskazują na możliwość optymalnego doboru mocy instalacji PV dla potrzeb własnych. Przy tym rozpatruje różne warianty pracy takiej instalacji łącznie z jej usytuowaniem i podążaniem z promieniowaniem słonecznym.

Analizę w tej pracy przeprowadzono na danych eksperymentalnych dotyczących obciążenia elektrycznego, temperatury otoczenia, natężenia promieniowania słonecznego. Za pomocą tych czynników dokonano oceny optymalnej wydajności systemu fotowoltaicznego on-grid w oparciu o maksymalizację własnego zużycia energii, której jest w stanie pokryć zapotrzebowanie na obciążenie analizowanego gospodarstwa domowego.

Należy zwrócić uwagę na to, że zwiększając autokonsumpcję energii z systemu fotowoltaicznego możemy zmniejszyć zależność od energii elektrycznej z sieci. Obecnie większość systemów fotowoltaicznych off/grid z systemami magazynowania energii (ESS) jest podłączona do sieci, ponieważ wytwarzanie energii fotowoltaicznej i ESS nie są wystarczające, aby w pełni pokryć miejscowe zapotrzebowanie na energię. Mało możliwym jest, aby energia elektryczna wytwarzana przez systemy fotowoltaiczne poza siecią i ESS odpowiadała pożądaney energii (Hassan, 2022).

Do końca pierwszego kwartału 2022 r. obowiązywał net-metering, znany jako system opustów. Prosument, będący producentem i jednocześnie konsumentem energii mógł ją produkować za pośrednictwem własnej elektrowni fotowoltaicznej i wykorzystywać na bieżąco. Nadwyżki energii, których nie był w stanie wykorzystać w trakcie pracy systemu, za pośrednictwem licznika dwukierunkowego były przekazywane do lokalnej sieci energetycznej i tam "przechowywane" do czasu, kiedy klient mógł je odebrać. Niejako kosztem takiego procesu była niewielka strata na przesyłanej energii, która wynosiła 20-30%.

Była to najbardziej korzystna forma rozliczeń w Europie, jednak miała swoje minusy - występowały lokalne problemy w sieci spowodowane przesyceniem energii. Elektrownie miały problem z wydajnością spowodowaną dużą liczbą mikroinstalacji, a montaż magazynów energii nie był na tyle opłacalny, by takie obciążenia zmniejszyć.

Po wielu latach funkcjonowania systemu opustów powstała ustawa nowelizująca prawo OZE, która wprowadziła dla nowych nabywców instalacji fotowoltaicznych zupełnie inny system rozliczeń. Jako nowych nabywców rozumiemy tych, którzy zakupią i zamontują instalację fotowoltaiczną po 1 kwietnia 2022 r. Prosumenci, którzy zdecydowali się na montaż przed tym terminem mają gwarancję utrzymania poprzednich zasad przez 15 lat.

Nowa ustawa o OZE wprowadza tzw. net-billing, czyli system opierający się na sprzedaży wyprodukowanych nadwyżek energii i jej zakupu w czasie, gdy instalacja fotowoltaiczna nie pracuje. Pojawienie się tego systemu spędzało sen z powiek wszystkim, którzy rozważali montaż instalacji fotowoltaicznej i w znaczącym stopniu przyspieszyło podjęcie decyzji o zakupie fotowoltaiki.

Po 1 kwietnia 2022 roku ze względu na zmianę dotychczasowego systemu rozliczeń wielu prosumentów miało wątpliwości, co do inwestowania w fotowoltaikę. Nowy system rozliczeń energii elektrycznej o nazwie net-billing umożliwia właścicielom instalacji fotowoltaicznych sprzedaż nadwyżek wyprodukowanej energii do sieci energetycznej. W tym systemie, energia wyprodukowana przez moduły słoneczne i niezużyta bezpośrednio przez właściciela, jest przesyłana do sieci. Następnie, energia ta jest rozliczana z energią pobieraną z sieci, według określonej stawki. Wzrost znaczenia ilości energii elektrycznej produkowanej z siłowni fotowoltaicznych wynika z potrzeby pokrycia ilości zapotrzebowania na nią przez pompy ciepła, których zadaniem jest przygotowanie ciepłej wody użytkowej przez cały rok kalendarzowy oraz ogrzewanie budynków mieszkalnych w tym domów jednorodzinnych w sezonie grzewczym oraz w okresach, w którym warunki atmosferyczne powodują konieczność ciągłego dostarczania ciepła w celu ogrzewania obiektów.

Zdecydowanie największym źródłem poboru energii elektrycznej mającym wpływ na współczynnik autokonsumpcji spośród wszystkich urządzeń zasilanych tą energią jest pompa ciepła. Z dotychczasowych badań wynika, iż dodanie pompy ciepła do fotowoltaiki zwiększa autokonsumpcję w standardowym gospodarstwie domowym nawet do 50÷60% (Detroja, 2016).

OBIEKT BADAŃ

Badany obiekt zlokalizowany jest w miejscowości Książniczki w powiecie krakowskim w województwie małopolskim 10 kilometrów w kierunku północno - wschodnim od Krakowa w trzeciej strefie klimatycznej. Przedmiotem badań było gospodarstwo domowe, którym był budynek jednorodzinny o powierzchni 300 metrów kwadratowych wyposażony w instalację PV i pompę ciepła, która była wykorzystana do ogrzewania tego budynku i przygotowania ciepłej wody użytkowej. Badania zastały wykonane w dwóch okresach – wariantach badawczych. Pierwszy z badanych okresów czasowych obejmował roczną eksploatację standardowego systemu ogrzewania bazującą na kotle grzewczym Optima Komfort o mocy cieplnej 20 kW, wraz z zainstalowaną siłownią fotowoltaiczną o mocy szczytowej 10 kW. Natomiast drugim okresem badawczym była instalacja solarna, która współpracowała z nowym systemem grzewczym, wyposażonym pompę ciepła powietrze-woda o mocy cieplnej 16 kW.

CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy była analiza energetyczna instalacji PV współpracującej z sprężarkową pompą ciepła w aspekcie poznania efektywności wykorzystania energii generowanej z PV. Analiza ta została sprowadzona do określenia wartości oraz zmienności współczynnika autokonsumpcji i współczynnika wykorzystania energii z modułów fotowoltaicznych po wymianie dotychczasowego kotła na paliwo stałe na nowe źródło ciepła, którym jest pompa ciepła pracująca w układzie źródeł powietrze – woda. Pompa ciepła jest wykorzystywana do ogrzewania całego budynku oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej.

METODYKA

W celu matematycznego wyliczenia zmiany wartości współczynnika autokonsumpcji postanowiono częściowo skorzystać z gotowej już metody zawartej i zaczerpniętej z dokonanego przeglądu literatury (Wójcicki, 2020). Zgodnie z tym przyjęto i wyróżniono następujące rodzaje energii elektrycznej skutkiem, czego ułatwiono i uproszczono wykonanie obliczeń. Ów autor wyodrębnił:

1. energię wygenerowaną w źródle E_g
2. energię zużytą na miejscu jej wyprodukowania tj. autokonsumpcję E_a
3. energię oddaną do sieci dystrybucyjnej E_{exp}

Poniżej przedstawiono metody za pomocą, których dokonano obliczeń autokonsumpcji energii elektrycznej dla analizowanego przypadku. Badania te przeprowadzono w oparciu o dane rzeczywiste pochodzące z prosumenckiej instalacji fotowoltaicznej, sterownika pompy ciepła oraz portalu eLicznik Tauron Dystrybucja. Do obliczeń uwzględniono dane fizyczne oraz pomiary z lat 2022-2023, co umożliwiło przebadanie dwóch kompletnych rocznych okresów pomiarowych. Ilość energii elektrycznej zużytej na miejscu autokonsumpcji wyznaczono z zależności (1):

$$E_a = E_g - E_{exp} \quad (1)$$

gdzie:

E_a - ilość energii zużytej w procesie autokonsumpcji,

E_g - ilość energii wygenerowanej w źródle PV,

E_{exp} - ilość energii oddanej do sieci dystrybucyjnej.

Współczynnik autokonsumpcji (W_a) dla pozyskanych danych z okresu roku wyznaczono z zależności (2):

$$W_a = \frac{E_a}{E_g} \cdot 100\% \quad (2)$$

Ponadto analogicznie wyliczono wartości współczynników autokonsumpcji dla wszystkich miesięcy dla obu analizowanych lat tj.: 2022r. i 2023r. Natomiast do obliczenia zmiany wartości współczynnika wykorzystania energii z modułów fotowoltaicznych skorzystano z opracowanej metody zawartej w dokonanym przeglądzie literatury (Łyszczarz i in., 2024). Stąd tą zależność opisano wzorem (3):

$$W_{PV} = \frac{E_a + 0,7 \cdot E_{exp}}{E_g} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

E_a – konsumpcja bezpośrednia energii z instalacji fotowoltaicznej czyli ilość energii zużytej w procesie autokonsumpcji,

E_g – energia wyprodukowana przez instalację czyli ilość energii wygenerowanej w źródle PV,

E_{exp} – energia wprowadzona do sieci elektroenergetycznej czyli ilość energii oddanej do sieci dystrybucyjnej.

Osobno także obliczono wartości współczynników wykorzystania energii z modułów fotowoltaicznych dla wszystkich miesięcy dla obu analizowanych lat tj.: 2022 r. i 2023 r.

WYNIKI BADAŃ

Analizę wyników badań rozpoczęto od zestawienia danych rocznych. W tabeli 1 przedstawiono roczne wartości energii wygenerowanej w źródle PV, energii wprowadzonej do sieci dystrybucyjnej oraz energii zużytej w procesie autokonsumpcji zarówno przed jak i po instalacji nowego źródła ciepła.

Tabela 1. Zestawienie rocznych danych dotyczących gospodarowania energią elektryczną

Table 1. Summary of annual data on electricity management			
Rok/Year	E_g[kWh]	E_{exp}[kWh]	E_a[kWh]
2022	12957	10914	2043
2023	13784	10436	3348

Z danych przedstawionych w tabeli 1 oraz zależności (2) wynika że współczynnik autokonsumpcji dla roku 2022 wynosi niemalże 15,77% zaś dla roku 2023 osiągnął wartość 24,29%. Wynika z tego, że po sprzężeniu z systemem fotowoltaicznym instalacji pompy ciepła wartość ocenianego współczynnika wzrosła rok do roku o 8,52%.

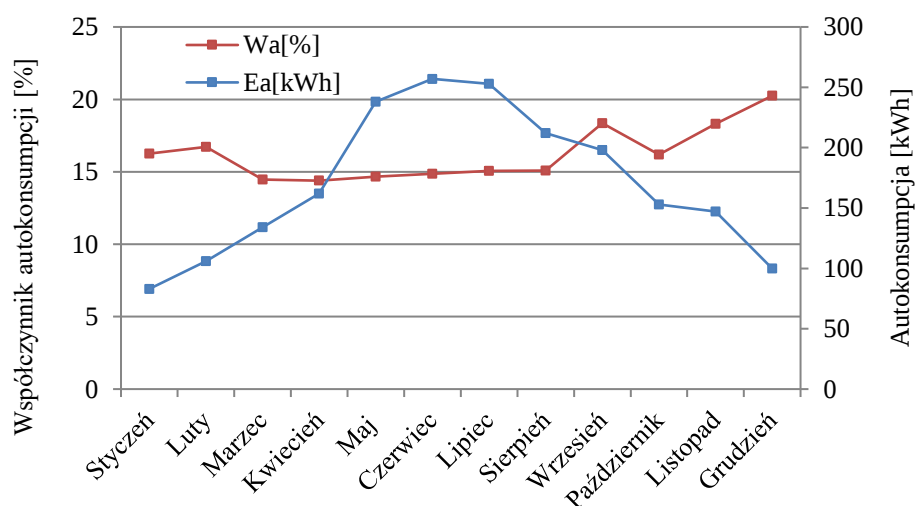
W tabeli 2 zestawiono wartości liczbowe energii wygenerowanej w źródle PV, energii wprowadzonej do sieci dystrybucyjnej oraz energii zużytej w procesie autokonsumpcji w rozbiciu miesięcznym za rok 2022, czyli w okresie, w którym instalacja PV była wykorzystana tylko do pokrycia potrzeb gospodarstwa domowego i częściowo przygotowania ciepłej wody użytkowej.

Z danych przedstawionych w tabeli 2 oraz wykresu (rys. 1) wynika że najniższą wartość współczynnik autokonsumpcji odnotowuje się w miesiącu kwietniu i wynosi 14,4%, zaś wartość najwyższą osiąga w miesiącu grudniu i wynosi 20,3%. Z kolei średnia arytmetyczna wartość współczynnika autokonsumpcji dla roku 2022 kształtuje się na poziomie 16,2%. Niewiele niższa wartość współczynnika autokonsumpcji w miesiącach letnich wynika z tego, że codzienne przygotowywanie ciepłej wody użytkowej odbywało się za pomocą bojlera wyposażonego w grzałkę elektryczną.

Tabela 2. Bilans energii w gospodarstwie domowym w 2022 roku

Table 2. Energy balance in the household in 2022

Miesiąc/Month	E_g [kWh]	E_{xp} [kWh]	E_a [kWh]
Styczeń/January	511	428	83
Luty/February	634	528	106
Marzec/March	927	793	134
Kwiecień/April	1126	964	162
Maj./May	1623	1385	238
Czerwiec/June	1729	1472	257
Lipiec/July	1680	1427	253
Sierpień/August	1406	1194	212
Wrzesień/September	1079	881	198
Październik/October	945	792	153
Listopad/November	803	656	147
Grudzień/December	494	394	100



Rysunek 1. Przebieg zmian współczynnika autokonsumpcji oraz ilości energii zużytej w procesie autokonsumpcji w układzie miesięcznym w roku 2022

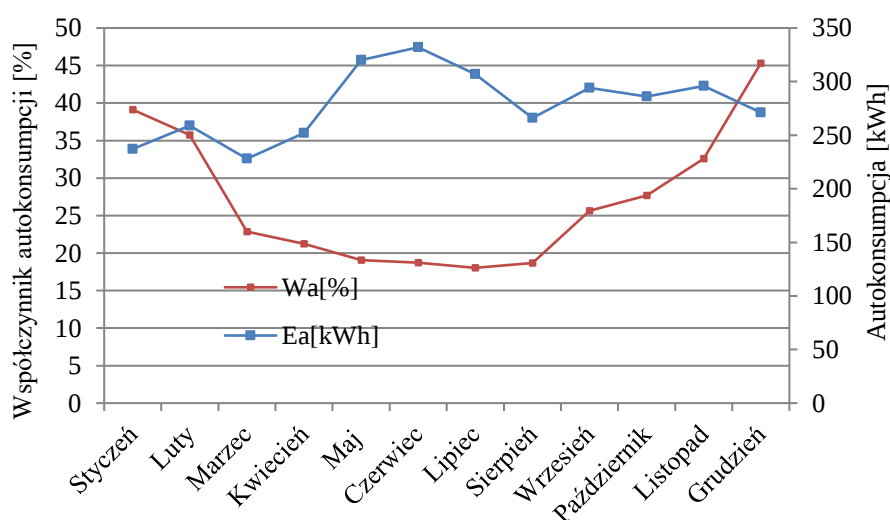
Figure 1. The course of changes in the self-consumption coefficient and the amount of energy used in the self-consumption process on a monthly basis in 2022

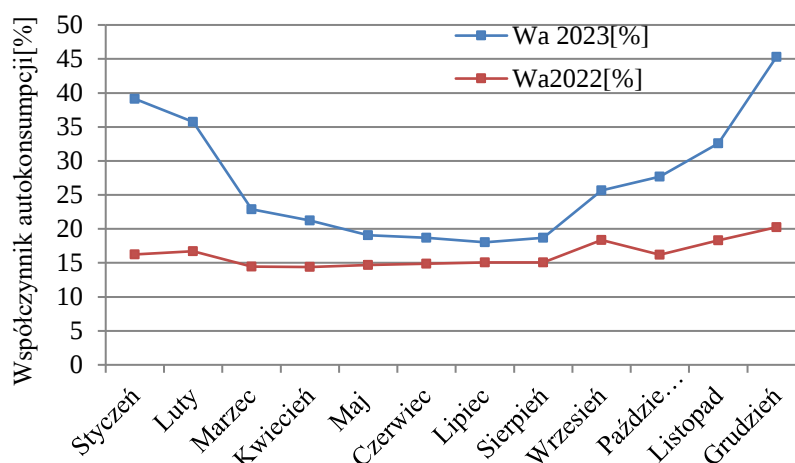
Bilans energetyczny dla gospodarstwa domowego zestawiono w tabeli (3), co zostało sprowadzone odpowiednio do zestawienia wartości energii wygenerowanej w przez PV, energii wprowadzonej do sieci dystrybucyjnej z instalacji PV, oraz energii zużytej w procesie autokonsumpcji w rozliczeniu miesięcznym dla roku 2023, czyli w okresie po zainstalowaniu nowego źródła ciepła, którym była to sprężarkowa pompa ciepła typu monoblok.

Tabela 3. Bilans energii w gospodarstwie domowym w 2023 roku**Table 3.** Energy balance in the household in 2023

Miesiąc/Month	E_g [kWh]	E_{exp} [kWh]	E_a [kWh]
Styczeń/January	606	369	237
Luty/February	725	466	259
Marzec/March	997	769	228
Kwiecień/April	1187	935	252
Maj./May	1678	1358	320
Czerwiec/June	1776	1444	332
Lipiec/July	1703	1396	307
Sierpień/August	1425	1159	266
Wrzesień/September	1147	853	294
Październik/October	1033	747	286
Listopad/November	909	613	296
Grudzień/December	598	327	271

Z bilansu zawartego w tabeli (3) oraz obliczeń, których wyniki przedstawiono na wykresie (rys. 3) wynika, że najniższą wartość współczynnika autokonsumpcji odnotowano w miesiącu lipcu 18 %, zaś wartość najwyższą osiągnęła w miesiącu grudniu 45,3%. Z kolei średnia arytmetyczna wartość współczynnika autokonsumpcji dla roku 2023 wynosiła 27,1% i jest wyższa o 10,9% w odniesieniu do roku 2022. Widoczna jest wyraźna różnica pomiędzy wartością współczynnika autokonsumpcji w miesiącach tzw. sezonu grzewczego a letnich, w których ilość wygenerowanej energii elektrycznej była najwyższa i kształtowała się na poziomie 1,5 MWh. Wynika to z faktu, iż podczas sezonu grzewczego oprócz przygotowania ciepłej wody użytkowej analizowany budynek ma większe zapotrzebowanie na energię ciepłą, które pompa ciepła musi pokryć w całości, po to aby zapewnić komfort cieplny jego mieszkańcom. Wiąże się to ze zwiększonym zapotrzebowaniem na energię elektryczną.

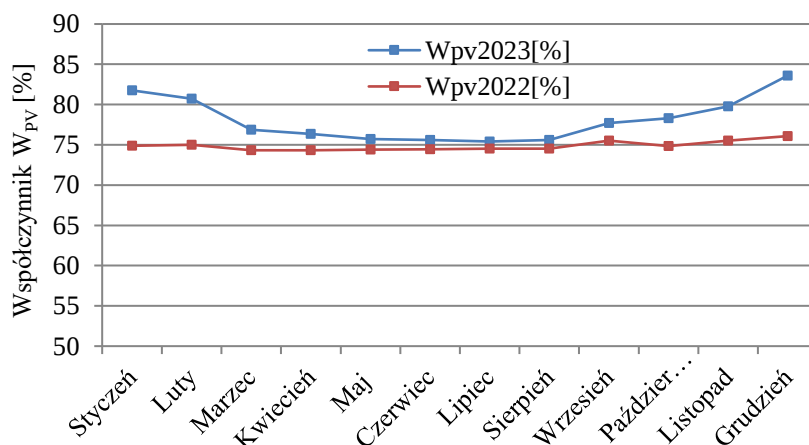
**Rysunek 2.** Przebieg zmian współczynnika autokonsumpcji oraz ilości energii zużytej w procesie autokonsumpcji z rozbiem miesięcznym dla roku 2023**Figure 2.** The course of changes in the self-consumption coefficient and the amount of energy used in the self-consumption process, broken down by month, for 2023



Rysunek 3. Porównanie zmian miesięcznego współczynnika autokonsumpcji dla obu badanych okresów

Figure 3. Comparison of changes in the monthly auto-consumption rate for both periods under study

Wykorzystując instalację PV do zasilania sprężarkowej pompy ciepła zaobserwowano wyraźny wzrost współczynnika autokonsumpcji (rys. 3). Jednak wzrost ten nie przekracza 45% w miesiącu o najmniejszej ilości energii pozyskanej z promieniowania słonecznego. Należy zaznaczyć, że w okresie letnim ten współczynnik wzrósł nieznacznie i nie przekroczył 20% od maja do sierpnia, co nie jest korzystne z punktu eksploatacji sieci energetycznych. Mając na uwadze obciążenie sieci elektroenergetycznych nN energią generowaną z PV postanowiono przeprowadzić analizę współczynnika wykorzystania energii bezpośrednio w gospodarstwie domowym. W tym celu sporządzono przebieg zmian tego współczynnika w układzie miesięcznym za okres dwóch lat, co zostało przedstawione na wykresie (rys. 4).



Rysunek 4. Porównanie zmian współczynników wykorzystania energii z modułów fotowoltaicznych w układzie miesięcznym dla obu badanych sezonów

Figure 4. Comparison of changes in the energy utilization factors from photovoltaic modules on a monthly basis for both seasons studied

W sezonie zimowym, gdy ilość generowanej energii z PV jest znacznie mniejsza współczynnika wykorzystania energii z PV wzrasta nieznacznie powyżej 80% w przypadku zasilania pompy ciepła, co oznacza, że niespełna 20% zostało oddane bezpowrotnie do sieci elektroenergetycznej. Natomiast przed zainstalowaniem pompy ciepła ilość oddanej energii do sieci utrzymuje się w ciągu roku na stałym poziomie w granicach 25%. Tu należy zaznaczyć, że w przypadku, gdy instalacja PV oddaje całość energii do sieci to bezzwrotnie traci gospodarstwo aż 30% energii wygenerowanej z tej instalacji. Taka sytuacja stwarza również nadmierne obciążenie sieci energią z systemów PV. Przeciętny współczynnik wykorzystania energii z modułów fotowoltaicznych dla roku 2022 wynosi niemalże 74,7% zaś dla roku 2023 osiąga wartość 77,3%. Wynika z tego, że po sprzężeniu z systemem fotowoltaicznym instalacji pompy ciepła wartość ocenianego współczynnika wzrosła o wartość 2,6%. Najwyższe wartości osiąga w miesiącach zimowych, kiedy pobierano najwięcej energii elektrycznej z sieci, natomiast najniższe kiedy ilość energii wyprodukowanej oraz wprowadzonej do sieci była zdecydowanie wyższa niż ilość energii pobranej z sieci, jednak nie spada poniżej 75%. Powyższe wyniki skłaniają do wniosku, iż instalacje PV w gospodarstwie domowym pomimo wprowadzenia nowoczesnych źródeł ciepła (pomp ciepła) nie są optymalnie skonfigurowane. Brak odpowiednich systemów zarządzania energią, oraz odpowiednio dobranych instalacji PV do potrzeb gospodarstwa domowego sprawiają, że nie jest właściwie wykorzystana teoretycznie „darmowa energia”, a wręcz przeciwnie może powodować nadmierne obciążenie sieci energetycznych.

WNIOSKI

Przeprowadzona analiza eksploatacji instalacji PV o mocy 10 kWp w okresie dwóch lat, stanowiąca studium przypadku w zakresie efektywnego wykorzystania energii generowanej z przedmiotowej instalacji przed i po wprowadzeniu ekologicznego źródła ciepła do ogrzewania w postaci sprężarkowej pompy ciepła typu monoblok wskazuje, że sama wymiana źródła ciepła nie poprawia znacząco efektywnego wykorzystania generowanej energii z PV. Analiza porównawcza dwóch czasokresów pracy instalacji PV, przy czym w jednym z nich zastosowano do ogrzewania sprężarkową pompę ciepła pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Współczynnik autokonsumpcji w skali roku dla sezonu ze węglowym kotłem będącym źródłem ciepła był stosunkowo niski i wyniósł 16,2%, natomiast po instalacji nowego systemu ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej wyniósł 27,1%. Wzrost współczynnika autokonsumpcji o 10,9% wskazuje na efektywniejsze wykorzystanie energii elektrycznej produkowanej przez siłownię fotowoltaiczną wynikające ze zwiększonego zapotrzebowania na energię elektryczną przeznaczoną na cele grzewcze, jednak ten wzrost przekłada się na 1,3 MWk energii zużytej na miejscu.
2. Współczynnik wykorzystania energii z modułów fotowoltaicznych w 2022 roku wyniósł średnio 74,9%, a dla roku 2023 78,1%. Najwyższe wartości osiągnął w miesiącach zimowych, kiedy pobierano najwięcej energii z sieci elektrycznej natomiast, najniższe kiedy ilość energii wyprodukowanej oraz wprowadzonej do sieci była zdecydowanie

wyższa niż ilość energii pobranej z sieci, jednak nie spada poniżej 74% dla sezonu z udziałem kotła grzewczego a 75% dla sezonu z pompą ciepła.

3. W sezonie po wymianie źródła ciepła na pompę ciepła, autokonsumpcja cechuje się większymi wahaniami sezonowymi przyjmując w grudniu i styczniu wartości oscylujące w okolicach 40% i więcej zaś dla sezonu letniego jego wartość kształtuje się na poziomie 18÷20%, co może nie korzystnie wpływa na Krajowy System Elektroenergetyczny.
4. Sama wymiana źródła ciepła nie poprawia znacząco współczynnika autokonsumpcji a tym bardziej współczynnika wykorzystania energii generowanej z instalacji PV. Wskazane jest magazynowanie energii - ciepła połączone z odpowiednim układem monitorującym parametry klimatu – promieniowanie słoneczne.

LITERATURA

1. <https://www.ure.gov.pl/pl/urząd/informacje-ogolne/aktualnosci/11796> dostęp on-line: 30.03.2024.
2. <https://www.ure.gov.pl/pl/urząd/informacje-ogolne/aktualnosci/11796> dostęp on-line: 5.04.2024.
3. <https://www.fotowoltaikaonline.pl/autokonsumpcja-w-fotowoltaice> dostęp on-line: 16.04.2024
4. Jallouli, R.; Krichen, L. (2012). *Sizing, techno-economic and generation management analysis of a stand alone photovoltaic power unit including storage devices*. National Engineering School of Sfax, Advanced Control and Energy Management (ACEM) BP 1173, 3038 Sfax, Tunisia, DOI 10.1016/j.energy.2012.02.004.
5. Patera, S. (2023). *Zwiększanie samo zużycia energii w mieszkaniowych instalacjach fotowoltaicznych z pompami ciepła w Polsce*. Czasopismo Energie sekcja A2: Energia Słoneczna i systemy fotowoltaiczne Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska, DOI 10.3390/en16104003.
6. Rehman, O.; Khan, S.; Javaid, N. (2020). *Impact of photovoltaic self-consumption curtailment on building-to-grid operations*. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, DOI 10.1016/j.iepes.2020.106374.
7. Rathor, S.; Saksena, D. (2020). *Energy management system for smart grid: An overview and key issues*. International Journal of Energy Research, DOI 10.1002/er.4883.
8. Masa-Bote, D.; Castillo-Cagigal, M.; Matallanas, E.; Caamaño-Martín, E.; Gutiérrez, A.; Monasterio-Huelín, F.; Jiménez-Leube, J. (2014). *Improving photovoltaics grid integration through short time forecasting and self-consumption*. Applied Energy DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.03.045.
9. Hassan, Q. (2022). *Evaluate the adequacy of self-consumption for sizing photovoltaic system*. Energy Reports, Volume 8, p. 239-254 DOI 10.1016/j.egyr.2021.11.205.
10. Detroja, K. (2016). *Optimal autonomous microgrid operation: A holistic view*. Applied Energy, Elsevier, t. 173(C), strony 320-330. DOI 10.1016/j.apenergy.2016.04.056.
11. Wójcicki, R. (2020). *Autokonsumpcja energii elektrycznej w prosumenckiej osłonie kontrolnej*, Rynek Energii 2020 nr 1, s.11-17.

12. Łyszczaż, P.; Knaga, J.; Nęcka, K.; Lis, S.; Nicpoń, M. (2024). *Proces autokonsumpcji energii elektrycznej w systemach złożonych z instalacji PV i pompy ciepła*. Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki. XXXIII Sympozjum Środowiskowe Polskie Towarzystwo Zastosowań Elektromagnetyzmu we współczesnej inżynierii medycynie 09-12 czerwca 2024, Szklarska Poręba.2024.

Autor korespondencyjny: Jarosław Knaga

ORCID: 0000-0002-9071-9136

e-mail: jaroslaw.knaga@urk.edu.pl

Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatyzacji

Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

Marcin Perzyński

Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatyzacji

Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

e-mail: mp77777@onet.pl

Krzysztof Nęcka

ORCID: 0000-0002-0401-1239

Katedra Inżynierii Bioprocessów, Energetyki i Automatyzacji

Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

e-mail: Krzysztof.necka@urk.edu.pl

Otrzymano: 15 czerwca, 2024

Zwrócono po recenzji: 2 sierpnia, 2024

Zaakceptowano: 2 sierpnia, 2024