

Magazyny energii w prosumenckich instalacjach fotowoltaicznych

Energy storage in prosumer photovoltaic installations



dr hab. inż. Andrzej Tomczewski, prof. PP

Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska
andrzej.tomczewski@put.poznan.pl
ORCID: 0000-0002-9702-3617



dr inż. Dariusz Kurz

Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska
dariusz.kurz@put.poznan.pl
ORCID: 0000-0002-6737-0052

Streszczenie

Przedmiotem pracy jest ukazanie wybranych aspektów technicznych stosowania elektrochemicznych magazynów energii elektrycznej w prosumenckich instalacjach fotowoltaicznych. Zwrócono szczególną uwagę na niezgodność profilu generacji energii elektrycznej przez systemy fotowoltaiczne z profilem obciążenia domowej instalacji odbiorczej. Wykonano analizy zmian współczynnika autokonsumpcji energii, która pochodzi z syste-

mu PV, zależnie od pojemności zastosowanego magazynu energii dla standardowego profilu obciążenia w dwóch taryfach (G11 i G12w). Przedstawiono również najnowsze uwarunkowania prawne związane ze stosowaniem magazynów energii oraz mechanizm rozliczeń energii z instalacji prosumenckich. Wskazano sposoby zwiększenia poziomu autokonsumpcji energii i zasady doboru optymalnej pojemności magazynu.

Słowa kluczowe magazyn energii, autokonsumpcja, instalacja prosumencka, fotowoltaika

Abstract

This paper presents selected technical aspects of the use of electrochemical energy storage devices in prosumer photovoltaic installations. Particular attention is paid to the discrepancy between the electricity generation profile of photovoltaic systems and the load profile of the residential installation. Analyses are performed on changes in the self-consumption rate of energy from the PV system, depending on the capacity

of the energy storage device used for a standard load profile in two tariffs (G11 and G12w). The latest legal conditions related to the use of energy storage devices and the principles of billing energy from prosumer installations are also presented. Methods for increasing the level of self-consumption of energy and principles for selecting the optimal storage capacity are identified.

Keywords energy storage, self-consumption, prosumer installation, photovoltaics

WPROWADZENIE

Niezadawalający poziom autokonsumpcji energii elektrycznej produkowanej w prosumenckich systemach generacyjnych z odnawialnymi źródłami energii (OZE) oraz zmiany sposobu rozliczeń prosumentów w zakresie energii przesyłanej do sieci elektroenergetycznej prowadzą do poszukiwania metod poprawy wskaźników ekonomicznych instalacji. Jest to widoczne zwłaszcza w przypadku stosowania fotowoltaiki – najliczniej montowanej u prosumentów – w której standardowe profile

obciążenia odbiorców oraz charakterystyki generacji energii nie pokrywają się w czasie. Częściowym rozwiązaniem tego problemu może być automatyczne załączanie odbiorników o większych mocach w okresach maksymalnej generacji energii z systemu PV (fotowoltaicznego). Działania te nie zawsze są jednak możliwe (np. ładowanie pojazdów elektrycznych). A nawet jeśli są wdrożone, to i tak w większości przypadków nie doprowadzą do całkowitego zużycia produkowanej lokalnie energii. Dodatkowo szczyt obciążenia dla większości odbiorców

prywatnych (mieszkań, domów) występuje w godzinach wieczornych, a zużycie energii jest zróżnicowane w okresach letnim i zimowym. Część energii wyprodukowanej u prosumenta zostanie zatem przesłana (sprzedana) do sieci elektroenergetycznej, a obecny sposób rozliczeń net-billing – różnicując cenę zakupu i sprzedaży jej nadmiarów – prowadzi do pogorszenia wskaźników ekonomicznych, wydłużając czas zwrotu z inwestycji. Częściowym rozwiązaniem jest zastosowanie w systemie prosumenckim magazynu energii elektrycznej.

Celem prowadzonych w ramach artykułu badań jest ustalenie pojemności magazynu elektrochemicznego, którego włączenie do prosumenckiego systemu fotowoltaicznego pozwoli na efektywne zwiększenie poziomu autokonsumpcji przy jednoczesnej kontroli kosztów inwestycyjnych. Badania dotyczą obszaru klimatycznego Polski oraz uwzględniają wpływ standardowych profili obciążenia prosumenta dla taryf G11 i G12w na 2026 r. firmy ENEA na przepływy energetyczne w systemie o mocy modułów fotowoltaicznych 4 kW. Na podstawie rzeczywistych danych generacyjnych systemu PV oraz opracowanej w środowisku MATLAB autorskiej aplikacji wyznaczono wartości przepływów energii między instalacją fotowoltaiczną, odbiornikami a magazynem energii. Zastosowana metoda umożliwia:

- bilansowanie energii w zadanym przedziale czasowym;
- wyznaczenie poziomu autokonsumpcji;
- uwzględnienie 15-minutowych cen dynamicznych (RCE), które obowiązują w aktualnym systemie rozliczeń net-billing.

Wyniki symulacji pozwoliły na przeprowadzenie analizy efektywności wykorzystania energii elektrycznej w badanych taryfach odbiorców indywidualnych, przy różnych wielkościach magazynów energii. Wskazano na zakres ich pojemności w korelacji do mocy znamionowej systemu PV i profilu obciążenia, dzięki któremu można uzyskać określone wskaźniki autokonsumpcji.

Instalacje prosumenckie, które wykorzystują źródła fotowoltaiczne, coraz częściej integrują systemy magazynowania energii, zwiększając zużycie własne i zmniejszając zależność od dostaw energii z sieci elektroenergetycznej. Łatwiejszy dostęp do magazynów energii o niewielkich pojemnościach, zazwyczaj wykonanych w technologii litowo-jonowej i posiadających własne kontrolery, pozwala istotnie zmieniać zarządzanie energią elektryczną na poziomie gospodarstw domowych.

Ostatnie badania wskazują, że włączenie magazynu energii do domowych systemów fotowoltaicznych znacząco zwiększa

wskaźniki zużycia własnego i zmniejsza ilość energii elektrycznej kupowanej z sieci. Według literatury współczynnik autokonsumpcji może wzrosnąć z ok. 29 do ponad 60% – wpływa na to pojemność magazynu energii [1–3]. Zależność między tymi dwoma parametrami jest nieliniowa, a korzyści istotnie maleją po przekroczeniu określonej pojemności magazynu. **Dla utrzymania opłacalności ekonomicznej systemu z magazynem energii istotne jest unikanie przewymiarowania jego wielkości** [4, 5].

Wpływ na pracę instalacji oraz wskaźniki energetyczne i ekonomiczne systemów prosumenckich PV z magazynami energii mają również stosowane taryfy, w tym szczególnie jednostrefowe i dwustrefowe. Te drugie zachęcają do ładowania magazynu, gdy ceny są niskie, i jego rozładowywania, gdy są wysokie. Prowadzi to do zwiększonej autokonsumpcji i skróconego okresu zwrotu z inwestycji

ności w porównaniu z danymi podanymi w kartach katalogowych, np. z 10 do kilku lat. Wszystkie ostateczne rozstrzygnięcia w tym obszarze powinny zatem opierać się na analizach ekonomicznych.

PRZYŁĄCZANIE MAGAZYNÓW ENERGII DO INSTALACJI OZE – PRZEPISY PRAWNE

Magazyn energii elektrycznej to urządzenie techniczne lub układ urządzeń i instalacji, które magazynują energię, są połączone z siecią elektroenergetyczną oraz mogą oddawać zgromadzoną energię do sieci elektroenergetycznej [13].

Z kolei proces magazynowania energii jest określony jako „przetworzenie energii pobranej z sieci elektroenergetycznej lub wytworzonej przez jednostkę przyłączoną do sieci, jej przechowywanie, także w innej postaci, a następnie ponowne jej przetworzenie na energię elektryczną” [13].

W obszarze magazynowania energii jest dostępnych wiele technologii.

Włączenie magazynu energii do domowych systemów fotowoltaicznych znacząco zwiększa wskaźniki autokonsumpcji i zmniejsza ilość energii elektrycznej kupowanej z sieci.

w porównaniu z taryfami jednostrefowymi (ryczałtowymi) [6–11]. Taryfy dwustrefowe promują większe wykorzystanie baterii i bardziej elastyczną pracę, podczas gdy jednostrefowe mogą prowadzić do niedostatecznego ich wykorzystania oraz dłuższego okresu zwrotu [7, 12]. W wielu krajach w systemach prosumenckich do sieci można jednak wprowadzać wyłącznie energię wyprodukowaną we własnym systemie generacyjnym. Zmienia to istotnie możliwości kształtowania algorytmów sterowania pracą magazynu.

Dodatkowo zarówno praca z różnymi taryfami, jak i wprowadzanie zaawansowanych algorytmów sterowania pracą magazynu, które prowadzą do jego intensywnego wykorzystania (ładowania i rozładowania kilka razy na dobę), wpływają na jego rzeczywistą żywotność. Algorytmy takie mogą powodować skrócenie żywot-

Jednak w systemach fotowoltaicznych wykorzystuje się przede wszystkim magazyny elektrochemiczne: kwasowo-olowiowe (akumulatory żelowe) oraz litowo-jonowe. Ze względu na dużą gęstość energii najczęściej wybiera się te ostatnie (głównie z ogniwami LFP lub NMC). Przy podejmowaniu decyzji o takiej inwestycji należy wziąć pod uwagę, że żywotność ogniw litowo-jonowych, które stosuje się w magazynach, jest ograniczona i zakupiony magazyn po pewnym czasie nie będzie spełniał swoich początkowych funkcji. Zależy to od zastosowanych ogniw (typu, jakości produkcji) oraz wielu czynników eksploatacyjnych, a zwłaszcza:

- częstości procesów ładowania i rozładowania,
- głębokości ładowania i rozładowania,
- wartości prądów ładowania i rozładowania,
- temperatury ogniw.

Określenie rzeczywistej, a nie katalogowej żywotności magazynów litowo-jonowych jest zadaniem, które wymaga długotrwałych badań eksperymentalnych lub zaawansowanych metod modelowania [14].

W przypadku budowy/installacji magazynów energii elektrycznej w systemach prosumenckich należy brać pod uwagę następujące akty prawne:

- Ustawę z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne [15] oraz jej nowelizację z 20 maja 2021 r. [13],
- Ustawę z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (OZE) [16].

Wymogi spełnienia określonych formalności przy konkretnych pojemnościach magazynu wprowadziła natomiast ostatnia nowelizacja Prawa budowlanego z grudnia 2025 r. [17]. Precyzuje ona warunki, jakie musi spełnić inwestor instalujący magazyn energii, zależnie od jego pojemności. **Magazyny do 30 kWh, montowane w budynku i podłączone do prosumenckiej instalacji OZE, są zwolnione z konieczności uzyskiwania jakichkolwiek formalności.** Należy jedynie zgłosić instalację do operatora systemu dystrybucyjnego (OSD), z którym prosument ma lub zamierza podpisać umowę na świadczenie usług dostarczania energii.

ZASADY ROZLICZEŃ ENERGII Z INSTALACJI PROSUMENCKICH: NET-BILLING

Zmiany systemu rozliczeń energii dla prosumentów wymuszają konieczność racjonalnego planowania i zużycia energii pochodzącej z własnych źródeł OZE – zwłaszcza fotowoltaicznych. Powodem jest niezgodność profilu generacji energii z profilem obciążenia odbiorcy. Nowelizacja ustawy [16] wprowadziła od 1 kwietnia 2022 r. system rozliczeń energii net-billing dla nowych prosumentów przyłączających po raz pierwszy instalację fotowoltaiczną bądź wiatrową do sieci elektroenergetycznej. Po kolejnych zmianach, od 1 lipca 2024 r., obowiązuje rozliczenie energii po godzinowych, rynkowych cenach energii (RCE), natomiast od 11 czerwca 2025 r. wdrożono 15-minutowe okresy rozliczeniowe dla rynkowej ceny energii.

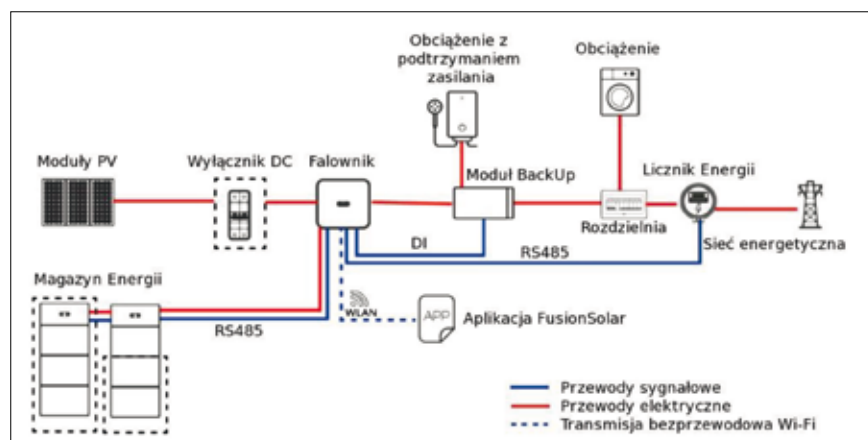
Rynkowa cena energii to cena dynamiczna (godzinowa), zmieniająca się w okresach 15-minutowych, ustalana na podstawie rzeczywistych godzinowych notowań ceny energii elektrycznej. Rynkowa cena energii miesięczna (RCEm) jest wyznaczana jako średnia ważona z rynkowych cen energii elektrycznej, które nie zawierają ani podatku akcyzowego, ani podatków od towarów i usług (VAT). Cena ta może być korygowana, przy czym ta możliwość wygasa wraz z upływem 12. miesiąca po zakończeniu miesiąca, którego cena dotyczy.

Wartość nadwyżek energii wprowadzonych przez nowych prosumentów do sieci będzie wyceniana co 15 minut. Odzwierciedla to realne wahania cen energii na rynku, zwłaszcza jej spadki w godzinach szczytowej produkcji słonecznej. Cena energii jest publikowana przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne (PSE) na stronie: <https://raporty.pse.pl/report/rce-pln>. Tym samym prosumenci są rozliczani na podstawie rzeczywistych godzinowych notowań ceny energii. Jednak zgodnie z art. 4b ust. 2 pkt 2 ustawy [16], w przypadku wystąpienia ujemnych RCE prosument w rozliczeniach energii elektrycznej wprowadzanej do sieci ma ustaloną cenę równą zero. Środki zgromadzone na depozycie prosumenckim za wprowadzoną energię można wykorzystać przez 12 kolejnych miesięcy, następujących po miesiącu ich wprowadzenia do sieci.

W pierwszej kolejności są one ujmowane w rozliczeniu kosztu energii pobranej z sieci. Po tym okresie natomiast, jeśli środki te nie zostaną wykorzystane na poczet opłat za pobraną energię, będzie można je wypłacić zgodnie z obowiązującymi zasadami, opisanymi w [18].

AUTOKONSUMPCJA ENERGII

Autokonsumpcja jest pojęciem związanym z definicją prosumenta zawartą w ustawie o odnawialnych źródłach energii [16]. Polega na bezpośrednim zużyciu energii elektrycznej (w odbiornikach własnych) wyprodukowanej w źródłach prosumenta w trakcie trwania produkcji. W związku ze stosowaniem systemów magazynujących część energii, która jest nadprodukcją w stosunku do aktualnego zapotrzebowania, może zostać zużyta w odbiornikach prosumenta w okresach późniejszych. Bez względu na wartość energii produkowanej w systemie PV i zużywanej w odbiornikach prosumenta nie pozwala na jakościowe porównanie różnych systemów. Wielkość produkcji energii zależy bowiem od mocy systemu PV oraz charakterystyki obciążenia. W związku z tym wprowadzono pojęcie współczynnika autokonsumpcji. Jest on definiowany jako stosunek energii wyprodukowanej w systemie OZE prosumenta i zużytej bezpośrednio w jego odbiornikach w okresie jednego roku do całkowitej ilości energii wytworzonej w systemie OZE prosumenta w czasie

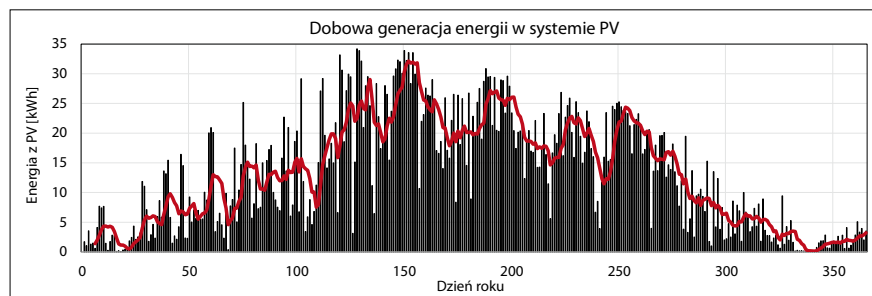


Rys. 1. Schemat prosumenckiego systemu fotowoltaicznego z magazynem energii, podłączonego do sieci elektroenergetycznej [20]

tego samego roku. Wysokie wartości współczynnika świadczą o zużyciu w odbiornikach prosumenta dużej części produkowanej energii i zwiększeniu jego zysków. Wynikają one z mniejszego zakupu energii z sieci (w systemie net-billing cena zakupu jest wyższa od ceny odsprzedaży energii do sieci – ta ostatnia może wynosić nawet 0 zł/MWh). Współczynnik autokonsumpcji wskazuje więc na stopień dopasowania profilu generacyjnego prosumenckich instalacji OZE (wraz z magazynem energii – jeśli jest zainstalowany w systemie) do profilu obciążenia odbiorników.

Stosowanie samego współczynnika autokonsumpcji do określenia jakości doboru struktury prosumenckiego systemu generacyjnego do instalacji odbiorczej może prowadzić do istotnych błędów w interpretacji zgodności profili. Warto rozpatrywać go łącznie z poziomem samowystarczalności energetycznej, która wskazuje na zdolność do samodzielnego pokrywania zapotrzebowania na energię poprzez własne źródło oraz systemy magazynowania energii. W odniesieniu do prosumenta, na podstawie formuły określonej przez GUS [19], samowystarczalność energetyczną można zdefiniować jako stosunek ilości energii wytwarzanej w systemach własnych do ilości energii potrzebnej w okresie jednego roku. Zwiększenie poziomu samowystarczalności energetycznej instalacji prosumenckich jest realizowane zazwyczaj poprzez połączenie źródeł OZE, pomp ciepła, magazynów energii oraz systemów zarządzania energią. Osiągnięcie całkowitej samowystarczalności jest bardzo trudne i kosztowne. W praktyce najczęściej mówi się więc o częściowej autonomii, która pozwala na osiągnięcie dużych oszczędności i podniesienie bezpieczeństwa energetycznego.

Magazyn energii elektrycznej w instalacji prosumenckiej może być więc dobrym rozwiązaniem, które **służy zwiększeniu poziomu samowystarczalności i autokonsumpcji energii** z uwagi na swoje zalety. Jednocześnie jednak stanowi istotny koszt instalacji. Dlatego dobór jego pojemności, czyli głównego parametru wpływającego



Rys. 2. Dobowa generacja energii dla analizowanego systemu fotowoltaicznego

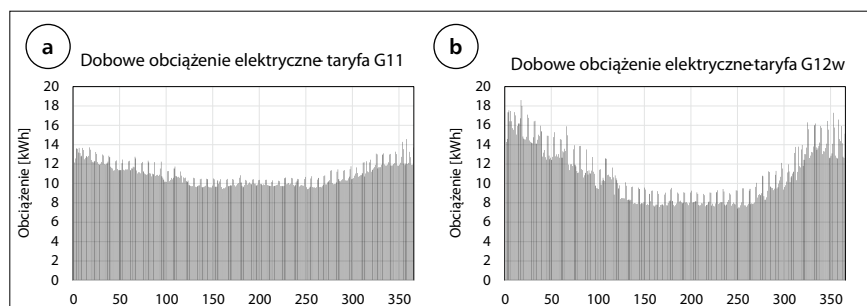
na koszt magazynu, jest kluczowy dla opłacalności inwestycji.

ANALIZA PRACY PROSUMENCKIEJ INSTALACJI PV Z MAGAZYNEM ENERGII

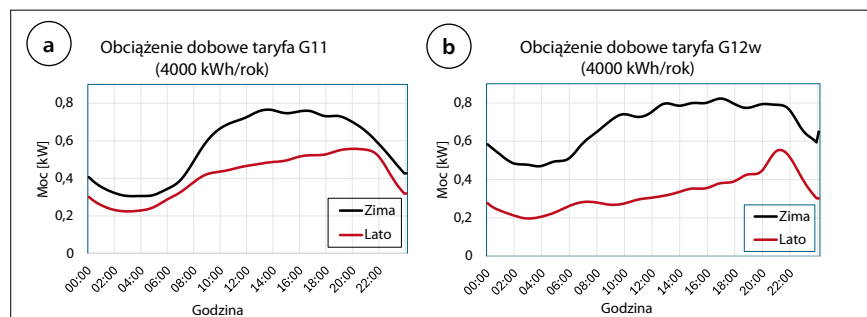
Analizie podlega system fotowoltaiczny o mocy szczytowej $P_{pv} = 4$ kW, zlokalizowany w Wielkopolsce, który zasila dom jednorodzinny o rocznym zużyciu energii elektrycznej 4000 kWh. W systemie (rys. 1) zastosowano falownik hybrydowy, do którego wejść są podłączone moduły PV oraz litowo-jonowy magazyn energii. W falowniku jest zaimplementowany standardowy algorytm sterowania pracą magazynu, polegający na ładowaniu go podczas wytwa-

rzania energii z paneli PV przekraczającej aktualne zapotrzebowanie. Rozładowanie magazynu następuje w okresach niewystarczającej lub zerowej produkcji energii w systemie PV oraz niezerowego obciążenia. Z tej perspektywy dla generacji z systemu PV proces ładowania i rozładowania jest realizowany maksymalnie jednokrotnie podczas doby. W dniach o bardzo małej produkcji energii z systemu PV magazyn nie jest w pełni ładowany, zatem liczba jego pełnych cykli ładowania i rozładowania ulega ograniczeniu, co wydłuża jego żywotność.

W dalszej części artykułu dokonano analizy wpływu pojemności magazynu



Rys. 3. Dobowe obciążenie elektryczne odbiorników prosumenta dla taryfy: a) G11, b) G12w



Rys. 4. Godzinowe obciążenie elektryczne odbiorników prosumenta dla wybranego dnia zimowego i letniego dla taryfy: a) G11, b) G12w

energii na wartości wybranych parametrów elektrycznych systemu. Symulacje przeprowadzono dla czterech pojemności magazynu: 2, 4, 6 i 8 kWh oraz dwóch standardowych profili zużycia energii na 2026 r. firmy ENEA (G11 i G12w). Wszystkie analizy dotyczyły jednego roku kalendarzowego. Wykorzystano w nich 10-minutowe

dane generacji rzeczywistego systemu fotowoltaicznego z 2024 r.

Na rys. 2 zamieszczono dobową generację energii elektrycznej z systemu analizowanego PV. Linia czerwona wskazuje linię trendu wyznaczoną z zastosowaniem średniej ruchomej 7-punktowej. Całkowita roczna generacja z analizowa-

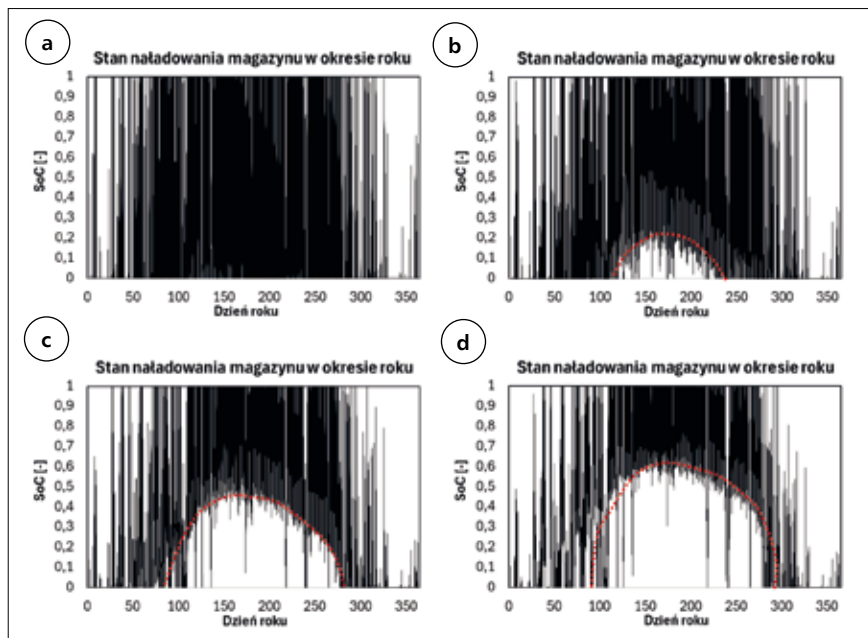
nej instalacji wynosi 4809,5 kWh, co daje 1202,4 kWh/kW/rok.

Na rys. 3 zamieszczono roczny rozkład dobowego obciążenia dla analizowanych tariff standardowych ENEA: a) G11 oraz b) G12w, natomiast na rys. 4 – godzinowe obciążenie elektryczne odbiorników prosumenta dla wybranego dnia zimowego i letniego dla tariffy: a) G11 i b) G12w. W związku z różnicami w wartościach pobieranego obciążenia obu tariff analizy zostaną przeprowadzone osobno dla G11 i G12w.

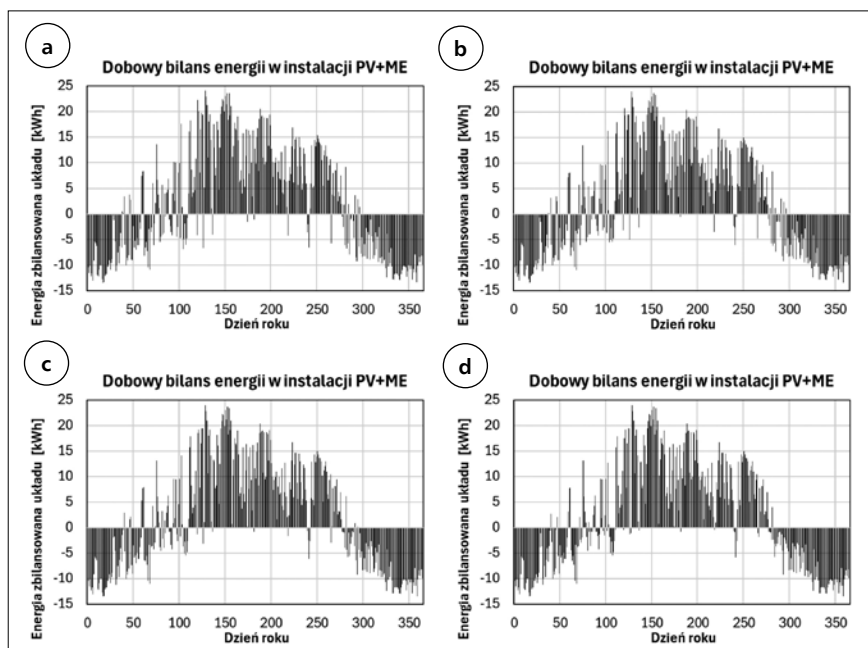
Na rys. 5–9 zamieszczono wyniki symulacji opisanych wcześniej układów prosumenckich, obejmujące roczne przebiegi zmian:

- stanu naładowania magazynu SoC (State of Charge) – rys. 5,
- dobowego bilansu energii wytwarzanej w systemie PV i zapotrzebowanej – rys. 6,
- dobowej energii przekazywanej do magazynu (ładowanie) – rys. 7,
- dobowej energii przesyłanej do sieci el.-en. (sprzedaż energii do sieci) – rys. 8,
- dobowej energii pobieranej z sieci (zakup energii) – rys. 9 – dla tariffy G11.

Analiza przedstawionych na rys. 5 i 7 charakterystyk wskazuje, że dla pojemności magazynu 2 kWh (będącej 50% mocy znamionowej instalacji PV $P_{PV} = 4$ kW) stopień naładowania akumulatora zmienia się praktycznie w całym dopuszczalnym zakresie (od 0 do 100%) przez większość dni roku. Tak samo wygląda przebieg energii ładowania, a występujące niższe wartości wynikają z braku nadwyżek energii z PV w mniej słoneczne zimowe dni (energia jest zużywana na bieżące zapotrzebowanie). Wzrost pojemności magazynu do 4 kW (czyli w stosunku 1:1 do mocy instalacji PV) powoduje, że w okresie letnim nadwyżki generowanej energii są na tyle duże, że przy pełnym stanie naładowania akumulatora reszta jej musi zostać sprzedana do sieci. Dalsze zwiększanie pojemności magazynu pogłębia tę prawidłowość jeszcze bardziej. Powoduje to, że jego potencjał nie jest wykorzystywany w pełni, zwłaszcza od końca wiosny do początku jesieni.



Rys. 5. Zmiana stanu naładowania (SoC) elektrochemicznego magazynu energii w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh dla prosumenta pracującego z tariffą G11



Rys. 6. Dobowy bilans energii w instalacji prosumenta w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh dla prosumenta pracującego z tariffą G11

Identyczne obliczenia wykonano w przypadku prosumenta rozliczającego się zgodnie z taryfą G12w. Obejmują one roczne przebiegi:

- stanu naładowania magazynu SoC (State of Charge) – rys. 10,
- dobowego bilansu energii wytwarzanej w systemie PV i zapotrzebowanej – rys. 11,
- dobowej energii przekazywanej do magazynu (ładowanie) – rys. 12,
- dobowej energii przesyłanej do sieci el.-en. (sprzedaż energii do sieci) – rys. 13,
- dobowej energii pobieranej z sieci (zakup energii) – rys. 14.

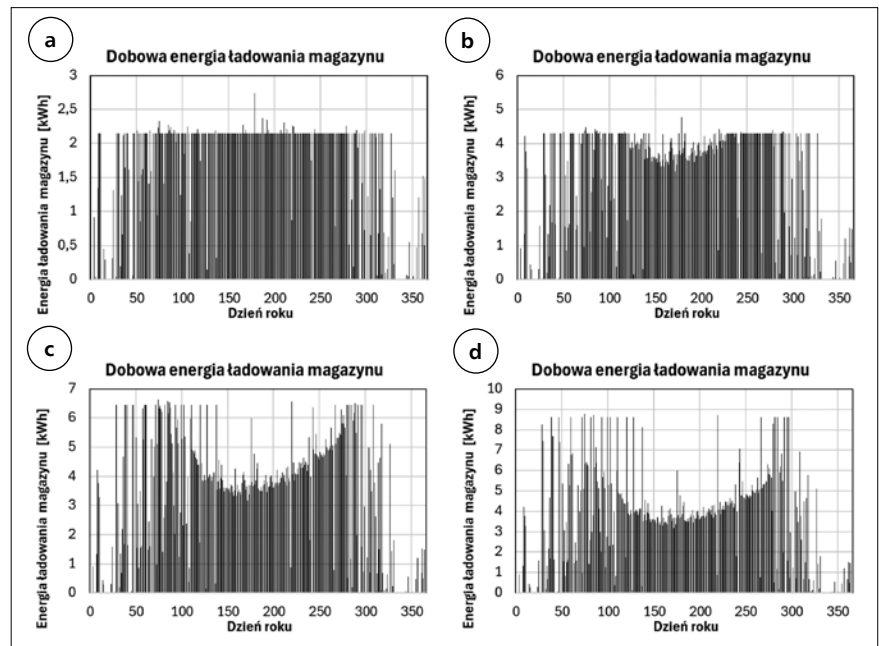
Wnioski dotyczące stopnia naładowania magazynu SoC oraz dobowych energii ładowania magazynu są identyczne jak dla obciążenia zgodnego z taryfą G11.

Zestawienie liczbowe wyników analizy dla obu taryf zamieszczono w tab. 1 (G11) i 2 (G12w). Uwzględniono w nich: sumaryczne roczne energie, jakie są generowane w systemie PV, kupowane z sieci i sprzedawane do niej, przesyłane do magazynu i pobierane z niego, energię wygenerowaną w systemie PV i lokalnie zużywaną (autokonsumpcję) oraz współczynnik autokonsumpcji.

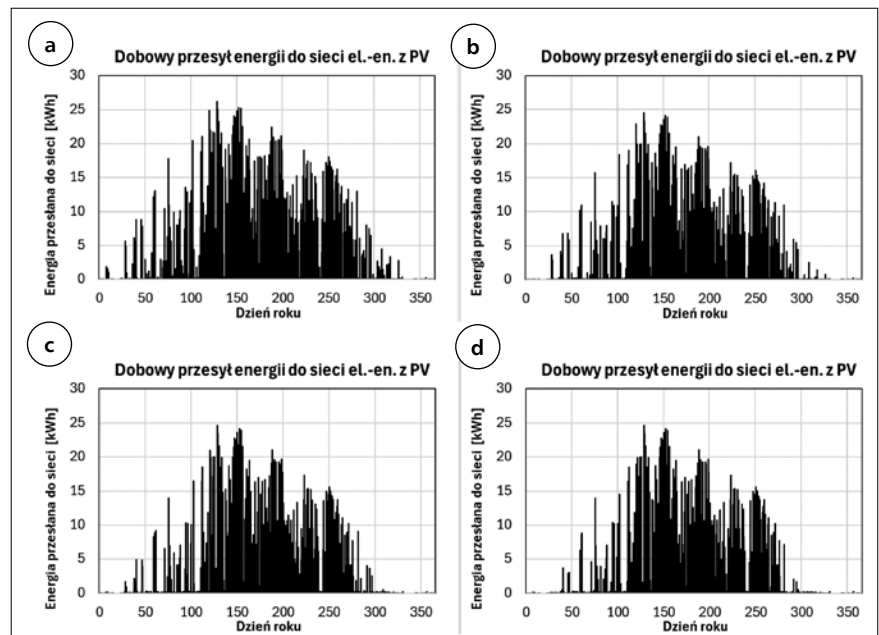
Dane przedstawione w tab. 1 i 2 wskazują, że w taryfie G11 dla wszystkich analizowanych pojemności magazynu występuje o ok. 5 punktów procentowych wyższy poziom współczynnika autokonsumpcji energii w stosunku do taryfy G12w. Współczynnik ten w analizowanym systemie PV, bez magazynu energii, wynosi odpowiednio dla rozpatrywanych taryf: 33,3 oraz 28,3%. Jego największy wzrost obserwujemy przy zmianie pojemności magazynu z 0 do 2 kWh oraz z 2 do 4 kWh (rys. 15). Wartości te wynoszą odpowiednio: 35 i 18,5% dla taryfy G11 oraz: 41,3 i 18,9% dla taryfy G12w. Dalszy wzrost pojemności nie powoduje tak dużych przyrostów wartości współczynnika autokonsumpcji. Na rys. 15 zamieszczono charakterystykę zmian współczynnika autokonsumpcji dla analizowanego systemu PV w funkcji pojemności netto magazynu energii dla obciążeń zgodnych z taryfami G11 (a) i G12w (b).

W przypadku taryfy G11 wzrost pojemności magazynu o 100% (z 2 do 4 kWh) powoduje, że instalacja odbiorcza jest w stanie odebrać rocznie o 77% energii więcej (zmiana z 570,9 do 1014,2 kWh) w stosunku do pojemności magazynu 2 kWh. Jednak kolejna zmiana z 4 do 6 kWh zwiększa tę ilość energii już tylko o 14%

(do 1157,7 kWh dla magazynu o pojemności 6 kWh wobec 4 kWh), a następna – z 6 do 8 kWh – powoduje wzrost o niecałe 5% (do 1214,7 kWh dla magazynu 8 kWh w stosunku do 6 kWh). Odwrotna sytuacja, lecz z takim samym stosunkiem zmian, występuje w przypadku energii pobieranej z sieci – im większa



Rys. 7. Dobowa energia ładowania magazynu energii w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh



Rys. 8. Dobowa energia przesyłana do sieci (sprzedawana) w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh

pojemność magazynu, tym mniej energii jest kupowane z sieci (jednak spadek ten wraz ze wzrostem pojemności magazynu jest coraz mniejszy). Można więc uznać, że stosunek 1:1 pojemności magazynu energii do mocy znamionowej instalacji jest odpowiednim rozwiązaniem dla analizowanej prosumenckiej instalacji PV.

Dla taryfy G12w występuje sytuacja analogiczna do przedstawionej wcześniej dla taryfy G11. Ze względu na różnice w obciążeniach dobowych i godzinowych (rys. 6 i 11) – dwie ceny energii (2 godziny w południe oraz noc i weekendy) – występują różnice w przepływach energii. W każdej z tych sytuacji obserwuje się

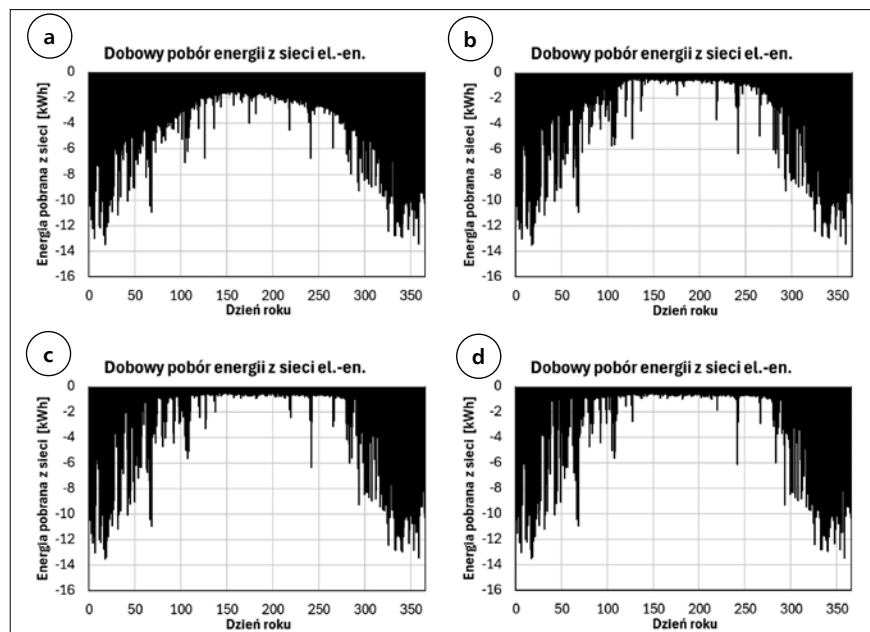
niewiele wyższe (o kilkanaście procent) wartości energii kupowanej z sieci niż w przypadku taryfy G11. Podobnie ilość energii sprzedawana do sieci jest o kilka-kilkanaście procent większa niż w przypadku taryfy G11. W konsekwencji ilość energii pochodzącej z magazynu jest nieco niższa w stosunku do taryfy G11 dla pojemności magazynu 4 i 8 kWh. W przypadku taryfy G12w jedynie dla pojemności magazynu 2 kWh z magazynu pochodziło o 1,5% więcej energii niż dla analogicznej konfiguracji z rozliczeniem według taryfy G11.

Zastosowanie magazynu energii o pojemności 8 kWh znacznie podnosi wartość współczynnika autokonsumpcji energii w stosunku do układu bez magazynu – o 23,5 i 23,1 punktów procentowych odpowiednio dla taryf G11 i G12w. Wzrost współczynnika autokonsumpcji w stosunku do magazynu 4 kWh jest znacznie mniejszy i wynosi odpowiednio tylko 3,6 i 3,9 punktów procentowych. Można więc stwierdzić, że przyrosty współczynnika autokonsumpcji oraz energii autokonsumpcji istotnie maleją wraz ze wzrostem pojemności magazynu energii (rys. 15). Na tej podstawie można też wnioskować o doborze magazynu energii do analizowanej instalacji PV (o mocy 4 kW) i rocznym zapotrzebowaniu energetycznym obiektu 4000 kWh o pojemności netto ok. 4 kWh. **Dla prosumenckich instalacji domowych pojemność magazynu (w kWh) powinna więc zawierać się w granicach 50–150% wartości liczbowej mocy znamionowej instalacji**, a najlepszym wolumenem (pod względem korzyści energetycznych, autokonsumpcji energii i kosztów inwestycji) będzie magazyn o pojemności (w kWh) w zakresie 0,5–1,0 wartości liczbowej mocy znamionowej instalacji.

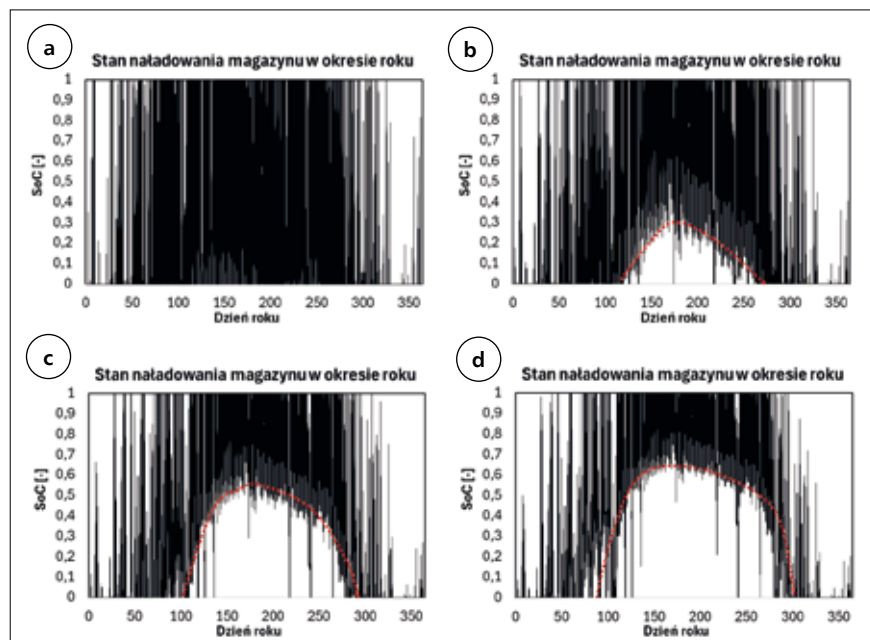
WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz oraz doświadczeń w zakresie systemów magazynowania energii elektrycznej można sformułować następujące wnioski:

- Dobór pojemności energetycznej netto magazynu energii w systemie prosumenckim powinien uwzględniać krzywą obciążenia (przynajmniej standardowy



Rys. 9. Dłobowa energia pobierana z sieci (kupowana) w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh



Rys. 10. Zmiana stanu naładowania (SoC) elektrochemicznego magazynu energii w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh dla prosumenta pracującego z taryfą G12w

profil zużycia energii odpowiadający określonej taryfie OSD), krzywą generacyjną systemu PV oraz podstawowe parametry magazynu: maksymalny prąd (moc) ładowania/rozładowania, pojemność energetyczną netto i temperaturę otoczenia.

- Analizy muszą być wykonywane dla danych obciążenia i generacji podanych dla krótkich okresów – co najmniej kilka pomiarów na godzinę, aby uchwycić chwilowe zmiany mocy głównych urządzeń odbiorczych.

- Analiza pracy systemu prosumenckiego powinna być każdorazowo wykonywana dla kilku pojemności magazynu energii wraz z wyznaczeniem wskaźników ekonomicznych, np. okresu zwrotu z inwestycji.

- W analizach pracy systemu prosumenckiego musi zostać uwzględniona rzeczywistość (niekatalogowa) trwałość magazynu elektrochemicznego, oszacowana jedną z metod uwzględniających co najmniej roczny przepływ energii przez magazyn o określonej pojemności oraz wpływ rzeczywistych warunków eksploatacji.

- Zwiększanie pojemności energetycznej magazynu powoduje wzrost współczynnika autokonsumpcji, jednak przy obecnych cenach magazynów dla instalacji prosumenckich – także istotny wzrost kosztów inwestycyjnych.

- Dla określonego systemu prosumenckiego (moc modułów PV, charakterystyka generacyjna i obciążenia) istnieje graniczna pojemność magazynu energii, powyżej której przyrost współczynnika autokonsumpcji jest niewielki w stosunku do wzrostu pojemności energetycznej magazynu.

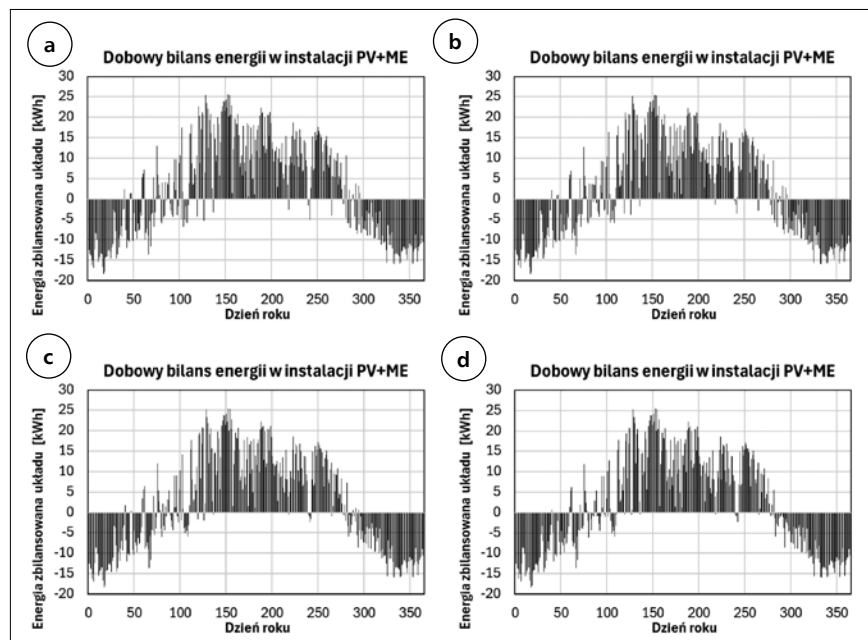
- Dla magazynów o pojemnościach większych od granicznej (w analizowanym przypadku 6 i 8 kWh) utrzymywany jest przez długi czas wysoki stan naładowania SoC (utrzymywanie wysokiego napięcia ogniw), co negatywnie wpływa na trwałość magazynów litowo-jonowych, pomimo procentowo mniejszej ilości energii przepływającej przez magazyn (ładowanie – rozładowanie) w ciągu roku w stosunku do jego pojemności znamionowej.

- W analizowanych przykładach ilość energii, o jaką zostanie zwiększona roczna auto-

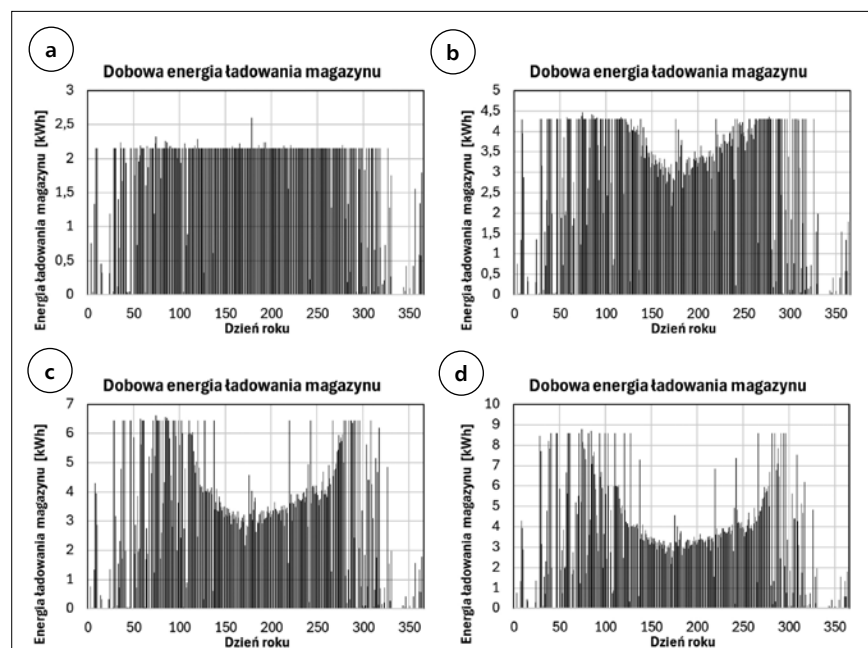
konsumpcja, wynosi od ok. 0,5 do 1 MWh. Przy obecnych cenach energii zysk związany ze zmniejszeniem jej zakupu z sieci nie kompensuje wzrostu kosztów systemu bez uwzględniania dopłat lub programów finansowania.

- Na podstawie zamieszczonych wniosków można odnieść wrażenie, że wyko-

rzystywanie magazynów energii w systemach prosumenckich jest nieopłacalne. Ich stosowanie powinno być jednak rozpatrywane nawet w małych systemach prosumenckich w znacznie szerszym kontekście niż tylko zyski wynikające z ograniczenia zakupu energii z sieci (zwiększenie autokonsumpcji). Dotyczy to szczególnie



Rys. 11. Dobowy bilans energii w instalacji prosumenta w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh dla prosumenta pracującego z taryfą G12w

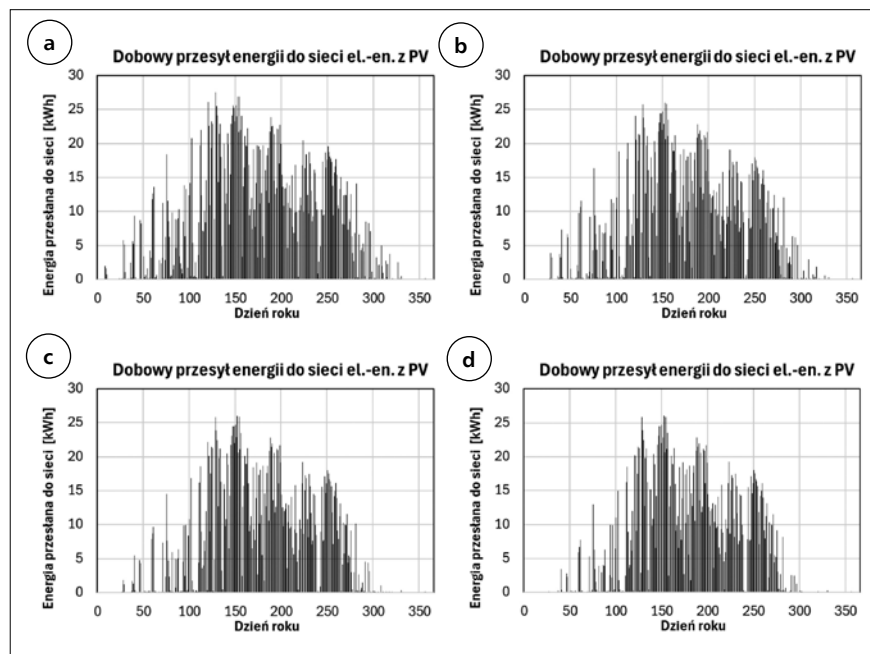


Rys. 12. Dobowa energia ładowania magazynu energii w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh dla prosumenta pracującego z taryfą G12w

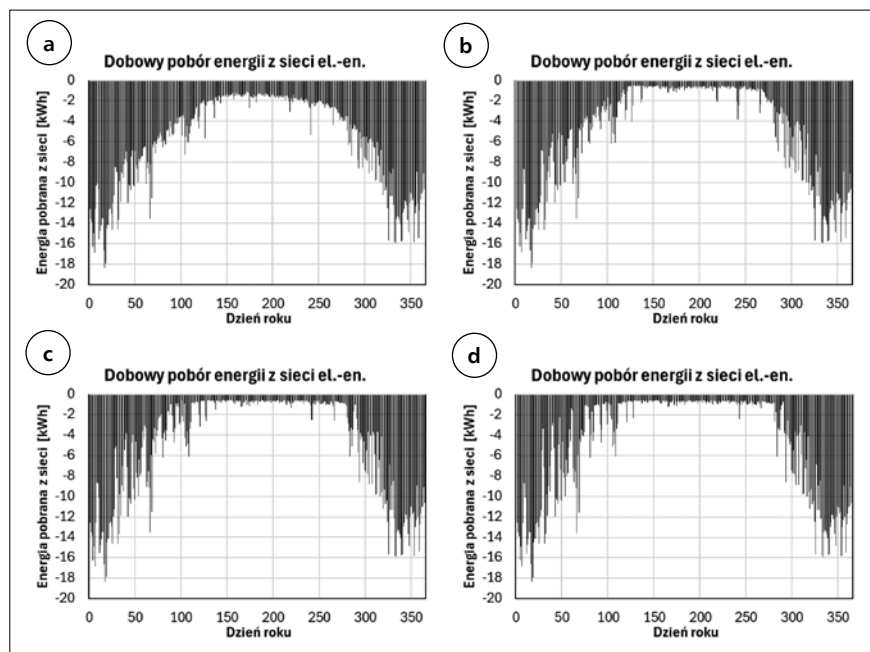
aspektów bezpieczeństwa energetycznego, zasilania bezprzerwowego odbiorników krytycznych (np. lodówki, pompy ciepła, zasobnika c.w.u.), wpływu na stabilność systemu elektroenergetycznego i ograniczenia wyłączeń prosumenckich instalacji PV, a także funkcjonalności jako systemów UPS.

- Autorzy obserwują rozwój systemów magazynowania energii – również w ramach instalacji prosumenckich niewielkiej mocy – oraz oferowanych systemów wsparcia, a także spadek cen, co czyni te rozwiązania znacznie bardziej dostępnymi i opłacalnymi.
- Autorzy wskazują także na możliwość stosowania w systemach prosumenckich

hybrydowych układów solarno-wiatrowych z magazynami energii. Wymieniona struktura źródeł OZE może zmienić wskaźniki energetyczne, zwłaszcza w przypadkach włączenia jako odbiorników energii pojazdów elektrycznych [22]. ■



Rys. 13. Dłobowa energia ładowania magazynu energii w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh dla prosumenta pracującego z taryfą G12w



Rys. 14. Dłobowa energia pobierana z sieci (kupowana) w okresie roku dla magazynu o pojemnościach energetycznych netto: a) 2 kWh, b) 4 kWh, c) 6 kWh, d) 8 kWh dla prosumenta pracującego z taryfą G12w

Literatura

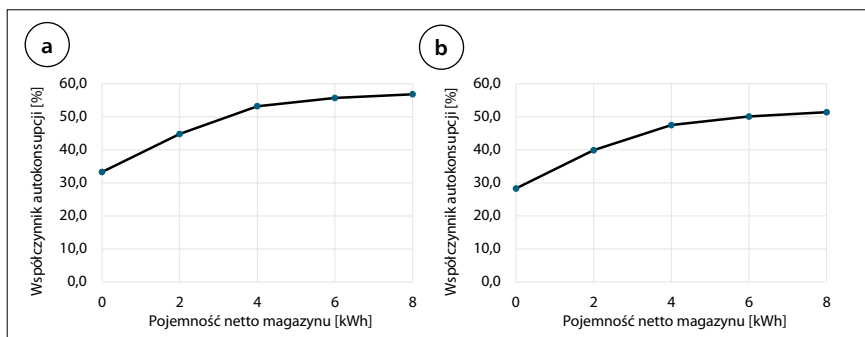
- [1] Tillyros K. i in., „Residential electrical storage: Feasibility study for hybrid residential PV/ battery systems in Cyprus” w: *IET Conference Proceedings*, nr 29, 2024, s. 637–642, <https://doi.org/10.1049/icp.2024.4732>.
- [2] Cieślak K.J., „Profitability analysis of a prosumer photovoltaic installation in light of changing electricity billing regulations in Poland” w: *Energies*, t. 17, nr 15, 2024, art. 3618, <https://doi.org/10.3390/en17153618>.
- [3] Lis M., Antonov V., Olczak P., „Hybrid photovoltaic and energy storage system in order to enhance self-consumption energy – Poland case study” w: *Journal of Energy Storage*, t. 91, 2024, art. 112096, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112096>.
- [4] Chatzigeorgiou N.G., Makrides G., Georgiou G.E., „The effect of electricity price and consumption level on the power-to-energy ratio for the sizing of hybrid PV-BSS: Techno-economic analysis of Mediterranean prosumers” w: *SyNERGY MED 2022 – 2nd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area*, Thessaloniki, Grecja, 2022, <https://doi.org/10.1109/SyNERGY-MED55767.2022.9941376>.
- [5] Chatzigeorgiou N.G. i in., „Evaluating the techno-economic effect of pricing and consumption parameters on the power-to-energy ratio for sizing photovoltaic-battery systems: An assessment of prosumers in the Mediterranean area” w: *Energies*, t. 16, nr 10, 2023, art. 4073, <https://doi.org/10.3390/en16104073>.
- [6] Mokoena B., Eboule P.S.P., Pretorius J.H.C., „Medium voltage consumers’ cost evaluation connected to a micro-grid PV system” w: *Energy Reports*, t. 8, nr 10, 2022, s. 235–244, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.05.105>.
- [7] Wang Z. i in., „Technical and economic analyses of PV battery systems considering two different tariff policies” w: *Solar Energy*, t. 267, 2024, art. 112189, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112189>.
- [8] Mendes Ferreira Gomes A., de Andrade Pinto G.X., R  ther R., „Techno-economic assessment of small-size residential solar PV + battery systems under different tariff structures in Brazil” w: *Solar Energy*, t. 267, 2024, art. 112238, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112238>.
- [9] Goryl W., „Real-world performance and economic evaluation of a residential PV battery energy storage system under variable tariffs: A Polish case study” w: *Energies*, t. 18, nr 15, 2025, art. 4090, <https://doi.org/10.3390/en18154090>.
- [10] Riedel T., Hauschke C., Schmeck H., „Dynamic feed-in from prosumer households with

Tab. 1. Zestawienie wyników analiz dla taryfy G11

Parametr	Wartość					Jednostka
Pojemność magazynu energii	0	2	4	6	8	kWh
Roczna generacja z PV	4809,5	4809,5	4809,5	4809,5	4809,5	kWh
Roczne zapotrzebowanie	4000,0	4000,0	4000,0	4000,0	4000,0	kWh
Energia kupowana z sieci	2398,4	1923,1	1577,3	1475,0	1430,4	kWh
Energia sprzedawana do sieci	3208,1	2655,6	2249,9	2128,3	2076,0	kWh
Energia przesłana do magazynu	0,0	570,9	1014,2	1157,7	1214,7	kWh
Energia pobrana z magazynu	0,0	493,8	877,2	1001,3	1050,6	kWh
Autokonsumpcja (energia zużywana z PV)	1601,4	2153,9	2559,6	2681,3	2733,5	kWh
Współczynnik autokonsumpcji	33,3	44,8	53,2	55,7	56,8	%

Tab. 2. Zestawienie wyników analiz dla taryfy G12w

Parametr	Wartość					Jednostka
Pojemność magazynu energii	0	2	4	6	8	kWh
Roczna generacja z PV	4809,5	4809,5	4809,5	4809,5	4809,5	kWh
Roczne zapotrzebowanie	4000,0	4000,0	4000,0	4000,0	4000,0	kWh
Energia kupowana z sieci	2640,5	2157,1	1848,1	1744,3	1690,0	kWh
Energia sprzedawana do sieci	3450,2	2888,4	2525,5	2402,3	2338,6	kWh
Energia ładowania magazynu	0,0	580,5	979,1	1123,3	1192,8	kWh
Energia rozładowania magazynu	0,0	502,1	846,9	971,5	1031,7	kWh
Autokonsumpcja (energia zużywana z PV)	1359,4	1921,1	2284,0	2407,3	2471,0	kWh
Współczynnik autokonsumpcji	28,3	39,9	47,5	50,1	51,4	%



Rys. 15. Zmiana współczynnika autokonsumpcji w funkcji pojemności netto magazynu energii: a) taryfa G11, b) taryfa G12w

batteries considering spot market prices" w: *ETG Congress 2023*, Kassel, Germany, 2023, s. 1–8 [dostęp: 15.01.2026], w: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10173055/metrics#metrics>.

[11] Kurz D., Nowak A., „Analysis of the impact of the level of self-consumption of electricity from a prosumer photovoltaic installation on its profitability under different energy billing scenarios in Poland" w: *Energies*, t. 16, nr 2, 2023, art. 394, <https://doi.org/10.3390/en16020946>.

[12] Zhang Y. i in., „A techno-economic sizing method for grid-connected household photovol-

taic battery systems" w: *Applied Energy*, t. 269, 2020, art. 115106, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115106>.

[13] Ustawa z dnia 20 maja 2021 r. – Prawo energetyczne (Dz.U. z 2021 r. poz. 1093).

[14] Burzyński D., Kasprzyk L., „Model predykcji stanu dostępnej energii ogniw litowo-żelazowo-fosforanowych" w: *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 100, nr 2, 2024, s. 294–297.

[15] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne (Dz.U. z 1997 r. nr 54, poz. 348 ze zm.).

[16] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. z 2015 r. poz. 478 ze zm.).

[17] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. – Prawo budowlane (t.j. Dz.U. z 2025 r. poz. 418 ze zm.).

[18] PGE, „Przewodnik prosumenta – pytania i odpowiedzi" [dostęp: 15.01.2026], w: Serwis PGE, <https://www.gkpge.pl/>.

[19] Główny Urząd Statystyczny, *Wskaźniki zrównoważonego rozwoju Polski*, Katowice, 2011 [dostęp: 23.01.2026], w: https://stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/oz_wskazniki_zrownowazonego_rozwoju_Polski_us_kat.pdf.

[20] Huawei, *Instrukcja obsługi magazynu energii LUNA2000* [dostęp: 23.01.2026], w: <https://support.huawei.com/enterprise/en/doc/EDOC1100173568/426c6ff9/about-this-document>.

[21] ENEA Operator, *Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej* [dostęp: 23.01.2026], w: <https://www.operator.enea.pl/uslugi-dystrybucyjne/iriesd>.

[22] Tomczewski A. i in., „Multicriteria optimisation of the structure of a hybrid power supply system for a single-family housing estate in Poland, taking into account different electromobility development scenarios" w: *Energies*, t. 16, nr 10, 2023, art. 4132, <https://doi.org/10.3390/en16104132>.