

Możliwości kształtowania bilansu energii elektrycznej odbiorcy indywidualnego wyposażonego w źródło fotowoltaiczne

Streszczenie. W artykule omówiono wyniki rejestracji profili zapotrzebowania i generacji w budynku mieszkalnym wyposażonym w instancję fotowoltaiczną. Wskazano na rozbieżność tych profili, skutkującą znaczącą wymianą energii elektrycznej z siecią rozdzielczą. Opracowano model symulacyjny rozpatrywanego obiektu, w którym przeanalizowano wpływ sterowania wybranymi odbiornikami na bilans energii analizowanego odbiorcy (prosumenta). Celem rozszerzenia możliwości kształtowania bilansu energii założono wyposażenie układu w akumulatorowy zasobnik energii elektrycznej, działający zgodnie z założonym algorytmem sterowania. Przeprowadzono również analizę opłacalności zakupu różnych typów zasobników energii.

Abstract. The paper discusses the results of recording demand and generation profiles in a residential building equipped with a photovoltaic source. The divergence of these profiles was pointed out. This divergence results in a significant exchange of electricity with the distribution network. A simulation model of the considered object was developed, in which the influence of control of selected receivers on the energy balance of the examined prosumer was analyzed. To extend the possibilities of forming the energy balance, it was assumed that the system will be equipped with battery storage of electric energy with an appropriate control algorithm. An analysis of the profitability of purchase of different types of energy storage devices was also carried out. (Possibilities of forming the electricity balance of an individual customer equipped with a photovoltaic source)

Słowa kluczowe: prosument, źródło fotowoltaiczne, sterowanie odbiornikami, zasobnik energii elektrycznej

Keywords: prosumer, photovoltaic source, control of electricity receivers, electricity storage

Wstęp

Zwiększający się udział odnawialnych źródeł energii (OZE) powoduje zmianę warunków pracy sieci elektroenergetycznej. Przy pewnym poziomie mocy zainstalowanej w OZE, w sieci mogą okresowo pojawiać się negatywne efekty wynikające z działania tych źródeł wytwórczych. Można do nich zaliczyć [1 – 4]:

- zwiększenie zmienności i przekroczenia dopuszczalnych poziomów napięć oraz pogłębienie się niesymetrii,
- wzrost prądu obciążenia, niekiedy powyżej prądu dopuszczalnego długotrwale dla danego elementu sieci,
- wzrost strat sieciowych,
- pojawienie się odwrotnych przepływów mocy, np. z sieci niskiego (nN) do sieci średniego napięcia (SN).

Obserwowany w ostatnim czasie dynamiczny wzrost mocy zainstalowanej w mikroinstalacjach, głównie fotowoltaicznych (PV), przyłączanych do sieci nN, przyczynia się do znaczącej zmiany dobowego bilansu energii podmiotów posiadających takie instalacje (prosumentów). W gospodarstwach domowych wyposażonych w źródła fotowoltaiczne średnio tylko około 30% generowanej energii jest zużywane w chwili jej wyprodukowania [6]. Powoduje to pojawienie się okresów, w których generacja przewyższa zużycie. Nadmiar generowanej energii jest oddawany, przy czym zwykle nie do rzeczywistego (fizycznego) magazynu, ale do magazynu wirtualnego, jakim jest sieć elektroenergetyczna. Przy niewielkim udziale prosumentów w sumarycznym zapotrzebowaniu odbiorców na danym obszarze, wprowadzane nadwyżki energii nie zaburzają pracy sieci. Jednak przy dużej łącznej mocy instalacji fotowoltaicznych okresowo mogą pojawić się wymienione wyżej negatywne zjawiska. To z kolei wymusza podejmowanie przez operatorów systemów dystrybucyjnych (OSD) odpowiednich działań dostosowawczych, których celem jest zapewnienie prawidłowej pracy sieci bez względu na poziom generacji źródeł PV. Do działań tych należą ograniczenie możliwości przyłączania nowych mikroinstalacji fotowoltaicznych (wymaga zmian prawa) lub rozbudowa sieci [5].

Ograniczanie możliwości przyłączania nowych mikroinstalacji PV, z punktu widzenia OSD, jest działaniem bezkosztowym, jednak jego negatywną konsekwencją jest blokowanie rozwoju tego sektora OZE na niektórych obszarach. Z kolei głębokie działania modernizacyjne i rozwojowe

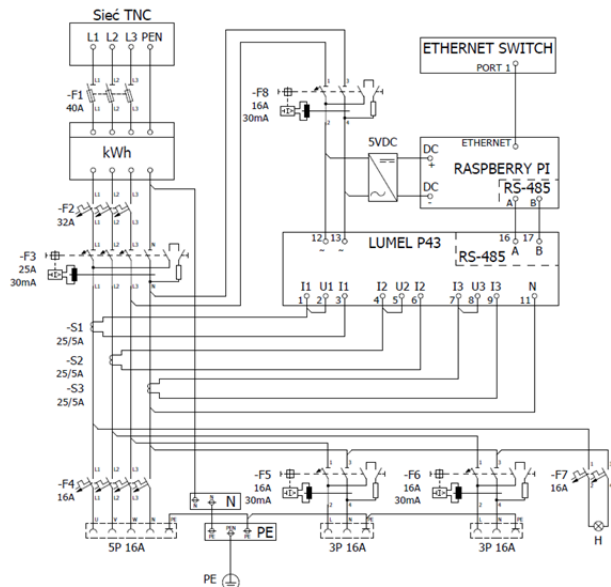
prowadzone w sieci umożliwiłyby dalszy swobodny rozwój segmentu prosumenckich mikroinstalacji fotowoltaicznych, ale wymagałyby ponoszenia bardzo wysokich nakładów inwestycyjnych, przenoszonych następnie w taryfie dystrybucyjnej na wszystkich odbiorców, za pomocą znacząco zwiększonych stawek opłaty przesyłowej [7]. W związku z tym należy poszukiwać nowych rozwiązań, które będą pozbawione wskazanych wad. Rozwiązaniem, które pozwoli na przyłączanie większej liczby mikroinstalacji fotowoltaicznych, bez jednoczesnej konieczności głębokiej rozbudowy sieci, jest zwiększenie poboru energii w miejscu jej wytworzenia, w tym samym czasie, w którym to wytwarzanie następuje. Można to uzyskać przez odpowiednie sterowanie wybranymi odbiornikami oraz dzięki wykorzystaniu zasobnika energii elektrycznej, przyłączonego w układzie zasilania prosumenta.

W artykule w pierwszej kolejności omówiono zastosowane sposoby rejestracji danych opisujących zapotrzebowanie oraz generację źródła fotowoltaicznego zainstalowanego w analizowanym budynku mieszkalnym. Wybrane wyniki zobrazowano na rysunkach. W kolejnej części przedstawiono model symulacyjny rozpatrywanego obiektu, w którym przeprowadzono badania nad sposobami zwiększenia możliwości autokonsumpcji generowanej energii. Przeanalizowano wpływ przesuwania obciążeń szczytowych oraz magazynowania energii elektrycznej. Na zakończenie porównano opłacalność zakupu różnego typu magazynów energii przeznaczonych do współpracy z instalacją fotowoltaiczną.

Rejestracja profili zapotrzebowania i generacji PV

Rejestracja profili zapotrzebowania i generacji analizowanego prosumenta miała na celu określenie stopnia wykorzystania produkowanej energii w okresach jej wytwarzania, a także identyfikację możliwości zwiększenia poziomu autokonsumpcji za pomocą sterowania wybranymi odbiornikami. Równolegle przeprowadzono szereg pomiarów zużycia energii elektrycznej w obiekcie oraz generacji w zintegrowanym z nim źródle PV. W badaniach wykorzystano rejestrator parametrów sieci wraz z urządzeniami pomocniczymi oraz mikrokomputerem, który zapisywał otrzymane wyniki. Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat układu pomiarowego, wykorzystanego do rejestracji zapotrzebo-

wania. Z kolei rejestracja generacji źródła PV przeprowadzona została za pomocą aplikacji Fronius Solar.web. W przestrzeni udostępnionej przez producenta zapisane zostały dane dotyczące generacji źródła fotowoltaicznego przesłane z falownika. Dane, które były gromadzone w chmurze zostały pobrane w formie pliku csv.



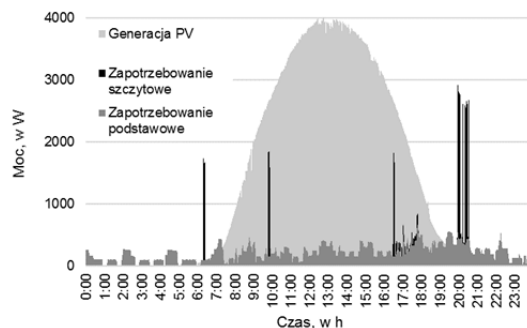
Rys. 1. Schemat układu pomiarowego wykorzystanego do rejestracji zapotrzebowania w analizowanym budynku jednorodzinnym

Przedstawiony na rys. 2 profil zapotrzebowania obrazuje rzeczywiste zapotrzebowanie na moc w analizowanym budynku w ciągu wybranej doby (dobowe zużycie energii na przedstawionym wykresie wynosi 6,65 kWh). Wyróżnić można zapotrzebowanie podstawowe (5,05 kWh) oraz zapotrzebowanie szczytowe (1,60 kWh), które spowodowane jest załączeniem odbiorników o dużej mocy. Urządzeniami, które odpowiadają za zwiększone zapotrzebowanie są: pralka, zmywarka, czajnik elektryczny oraz płyta indukcyjna. Niektóre z tych odbiorników mogą być wykorzystane do sterowania zapotrzebowaniem analizowanego obiektu.

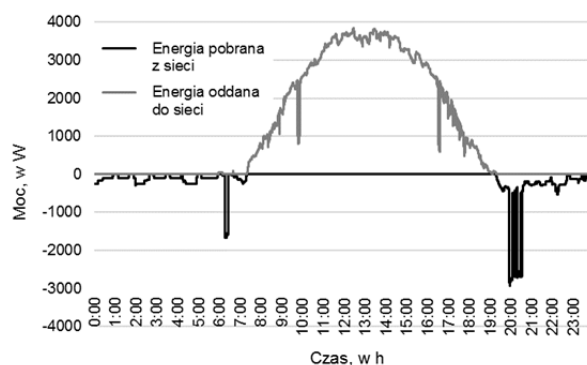
Na rys. 2 przedstawiono również generację źródła fotowoltaicznego zintegrowanego z instalacją odbiorczą rozpatrywanego budynku. Wygenerowana w analizowanej dobie ilość energii wyniosła 31,34 kWh. Zauważalna jest znacząca rozbieżność zarejestrowanych profili, co powoduje dużą wymianę energii z siecią elektroenergetyczną nN (rys. 3). Wymiana ta była równa 30,89 kWh, z czego 27,79 kWh

stanowiło oddanie do sieci, a 3,10 kWh pobór energii z sieci. Na pokrycie zapotrzebowania budynku wykorzystano jedynie 3,55 kWh generowanej energii, co oznacza, że współczynnik autokonsumpcji w ciągu rozpatrywanej doby wyniósł jedynie

11,34% ($3,55 \text{ kWh} / 31,34 \text{ kWh}$). Powodem tego jest bardzo wysoka generacja źródła PV, przy niewielkim zapotrzebowaniu odbiorcy występującym podczas pracy tego źródła.



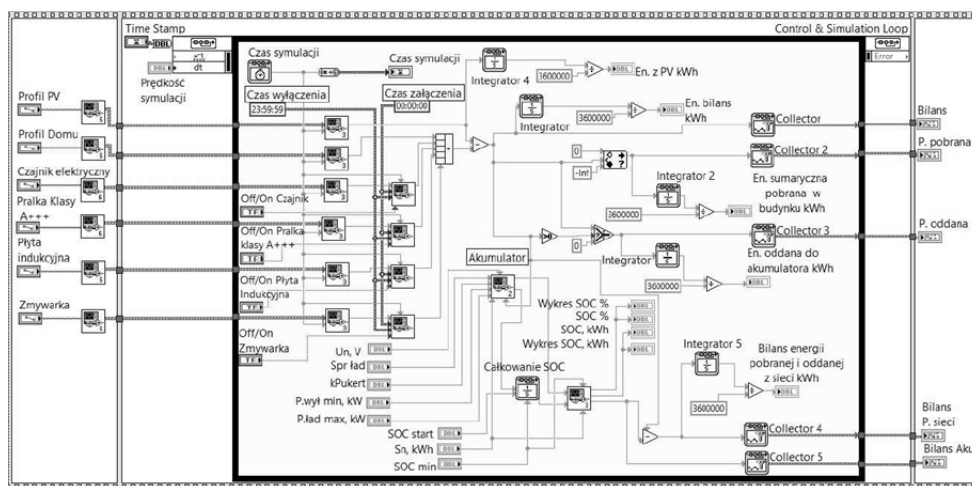
Rys. 2. Zarejestrowane dobowe profile zapotrzebowania i generacji źródła PV w analizowanym budynku jednorodzinnym



Rys. 3. Wymiana energii z siecią elektroenergetyczną nN w ciągu rozpatrywanej doby

Model symulacyjny rozpatrywanego obiektu

W celu przeprowadzenia badań dotyczących możliwości zwiększenia stopnia wykorzystania energii produkowanej przez źródło PV w badanym budynku, przy zastosowaniu graficznego środowiska programistycznego LabVIEW [8], zaprojektowano model symulacyjny obiektu, przedstawiony na rys. 4.



Rys. 4. Model symulacyjny rozpatrywanego budynku jednorodzinnego z mikroinstalacją PV i zasobnikiem energii w programie LabVIEW

Danymi wejściowymi do modelu były zarejestrowane dobowe profile mocy generowanej przez źródło PV, profile zapotrzebowania podstawowego budynku oraz profile wybranych odbiorników dużej mocy, których chwila załączenia może być regulowany przez użytkownika. Do tej grupy urządzeń zaliczono pralkę, zmywarkę, czajnik elektryczny oraz płytę indukcyjną. W symulatorze zaimplementowano również zasobnik energii elektrycznej w postaci akumulatora, w którym gromadzona jest nadwyżka produkowanej energii. Danymi wejściowymi dla akumulatora są: pojemność magazynu, minimalny i maksymalny poziom naładowania zasobnika, początkowy stan naładowania, maksymalna moc ładowania i rozładowania oraz sprawność procesów ładowania i rozładowania.

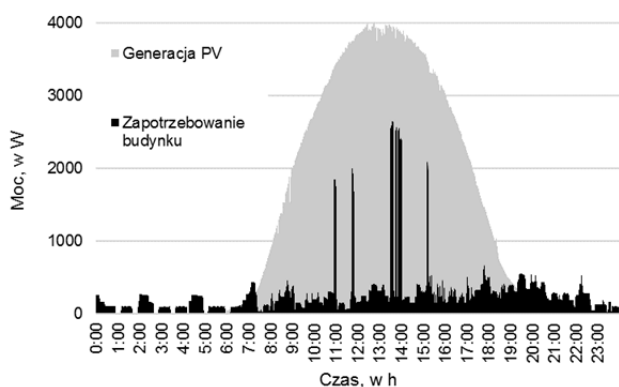
W modelu symulacyjnym w pierwszej kolejności ustalono godziny załączania odbiorników sterowalnych tak, aby ich praca odbywała się wtedy, kiedy moc generowana przez źródło PV przewyższa moc odbieraną. Podczas symulacji model bilansuje moc generowaną przez źródło PV z sumarycznym zapotrzebowaniem odbiorników, z uwzględnieniem wymiany z siecią. W wariantach z zaimplementowanym akumulatorem, w pierwszej kolejności nadmiar mocy generowanej jest wykorzystywany do ładowania zasobnika, a gdy stan naładowania osiągnie wartość maksymalną, wtedy nadmiar produkowanej energii jest oddawany do sieci. W przypadku niedoboru generacji ze źródła PV, w pierwszej kolejności do pokrycia zapotrzebowania jest wykorzystana energia zgromadzona w akumulatorze. W tak zaprojektowanym modelu symulacyjnym przeprowadzono wielowariantowe symulacje pracy analizowanego obiektu. Rozpatrywano możliwość instalacji różnych magazynów energii, co pozwoliło na wybór rozwiązania minimalizującego wymianę z siecią.

Możliwości zwiększenia autokonsumpcji energii

Celem określenia możliwości zwiększenia autokonsumpcji energii produkowanej przez mikroinstalację fotowoltaiczną wykonano dwuetapową symulację obejmującą:

1. sterowanie wybranymi odbiornikami (pralka, zmywarka, czajnik elektryczny, płyta indukcyjna),
2. sterowanie odbiornikami (według programu jak w punkcie 1) oraz akumulatorowym zasobnikiem energii.

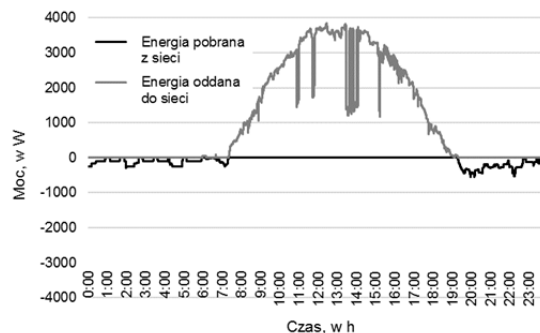
Analizy zostały wykonane przy założeniu, że praca źródła PV odbywa się według grafiku pokazanego na rys. 2.



Rys. 5. Profil generacji źródła PV oraz profil zapotrzebowania budynku po zastosowaniu sterowania pracą wybranych odbiorników

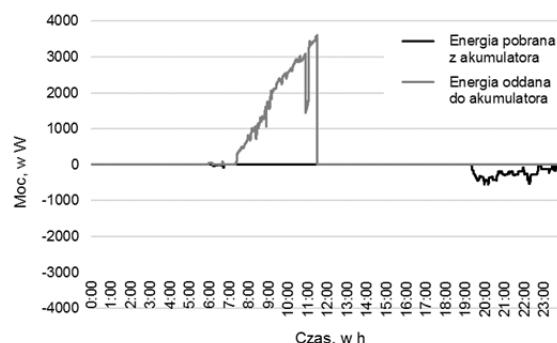
Na rys. 5, na tle profilu generacji, przedstawiono profil zapotrzebowania budynku po zastosowaniu sterowania czasem załączania wybranych odbiorników. Z wygenerowanych 31,34 kWh energii na pokrycie zapotrzebowania budynku zużyte zostało 4,75 kWh (3,55 kWh bez sterowania odbiornikami), co oznacza, że współczynnik autokonsumpcji był równy 15,16% (wzrost z poziomu 11,34%).

Aдекватnej zmianie uległa również wymiana energii z siecią (rys. 6), która wyniosła 28,49 kWh (30,89 kWh w wariancie bez sterowania odbiornikami). Zmniejszenie wymiany z siecią wynika z jednakowego zmniejszenia ilości energii oddanej do sieci (spadek z 27,79 kWh do 26,59 kWh) i energii pobranej z sieci (spadek z 3,10 kWh do 1,90 kWh).

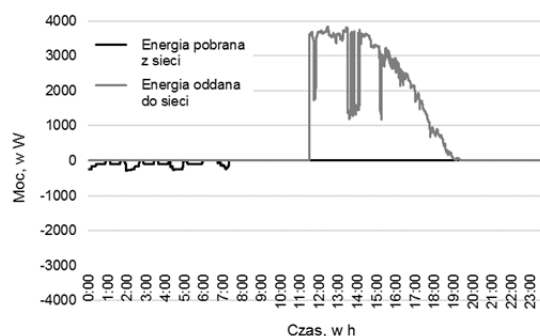


Rys. 6. Wymiana energii z siecią elektroenergetyczną nN po zastosowaniu sterowania pracą wybranych odbiorników

W celu dalszego zwiększenia stopnia wykorzystania generowanej energii zamodelowano zasobnik AXIstorage Li 9S (pojemność 8,5 kWh, minimalny stan naładowania 1,7 kWh, maksymalna moc ładowania 6,5 kW, maksymalna moc rozładowania 8,3 kW, sprawność 85%). Ładowanie zasobnika następuje wtedy, gdy moc generowana przewyższa zapotrzebowanie i jest kontynuowane do osiągnięcia pojemności znamionowej. Rozładowanie następuje w sytuacji odwrotnej i kończy się po uzyskaniu minimalnego stanu naładowania. Pracę zasobnika w ciągu analizowanej doby ilustruje rys. 7.



Rys. 7. Praca akumulatorowego zasobnika energii



Rys. 8. Wymiana energii z siecią elektroenergetyczną nN po zastosowaniu magazynowania energii

Praca zasobnika według grafiku pokazanego na rys. 2 pozwoliła na zmagazynowanie 6,80 kWh energii (stan początkowy naładowania zasobnika był równy poziomowi minimalnemu wynoszącemu 1,70 kWh). Uwzględniając zużycie energii przez odbiorniki podczas pracy źródła PV (4,75 kWh), współczynnik autokonsumpcji wzrósł do po-

mu 36,85%. Znaczącej zmianie uległa również wymiana z siecią (rys. 8), która zmniejszyła się do poziomu 19,34 kWh (energia oddana była równa 18,59 kWh, a pobrana 0,75 kWh).

Analiza opłacalności zakupu magazynu energii

Jednostkowa cena magazynu energii zależy m.in. od wykorzystanej technologii. Z uwagi na dużą gęstość energii magazyny przeznaczone do współpracy ze źródłami fotowoltaicznymi zbudowane są najczęściej z akumulatorów litowo-jonowych [9]. Ważnym aspektem jest też żywotność zasobnika, którą można oszacować na podstawie maksymalnej liczby cykli pracy (założono 300 cykli na rok). W tabeli 1 zestawiono najważniejsze dane charakteryzujące rozpatrywane magazyny energii [10, 11] (przyjęto kurs 4,55 zł/euro).

Szacując opłacalność wyposażenia instalacji fotowoltaicznej w zasobnik energii należy uwzględnić stosowany obecnie w Polsce system rozliczeń za energię wprowadzoną i odebraną z sieci przez prosumenta [12]. Zgodnie z tym systemem, dla instalacji o mocy do 10 kW, za 1 kWh energii oddanej do sieci prosument może bez dodatkowych opłat odebrać 0,8 kWh, przy czym rozliczenie jest realizowane w okresach rocznych. Oznacza to, że sieć elektroenergetyczna jest traktowana jako wirtualny magazyn o sprawności 80%.

Przy takim sposobie rozliczeń wartość utraconych 20% energii wprowadzonej do sieci może być traktowana jako strata poniesiona przez prosumenta. Jej ograniczenie jest możliwe przy zastosowaniu zasobnika pozwalającego na zmniejszenie wymiany z siecią (magazynem minimalizującym wymianę z siecią okazał się Tesla Powerwall 2, który posiada największą pojemność magazynową). Zatem za-

kup zasobnika będzie opłacalny ekonomicznie tylko wtedy, kiedy zmniejszenie straty ponoszonej przez prosumenta będzie wyższe niż koszt związany z instalacją magazynu.

W pracy [13], dla analizowanego prosumenta, wykonano symulacje pozwalające na oszacowanie rocznego bilansu energii. Obliczenia pokazały, że przy braku magazynu ilość energii wprowadzana do sieci będzie równa 1926 kWh, czyli utracone zostanie 385 kWh. Przyjmując, że suma ceny energii i stawek opłat zmiennych dla odbiorcy rozliczanego według taryfy G11 wynosi 0,62 zł/kWh [14], maksymalna, możliwa do uzyskania, wartość rocznego zmniejszenia straty prosumenta jest równa 239 zł. Wartość tę należy porównać z rocznym kosztem związanym z instalacją magazynu (tabela 1), oszacowanym jako iloraz ceny zakupu urządzenia i przewidywanej żywotności. Wykonana analiza wskazuje na brak opłacalności zakupu zasobnika energii.

Wnioski

Znacząca rozbieżność profilu produkcji źródła fotowoltaicznego i profilu zapotrzebowania odbiorcy komunalno-bytowego w wielu sytuacjach powoduje dużą wymianę energii z siecią. Ograniczenie tego zjawiska jest możliwe poprzez pewne działania możliwe do wykonania u odbiorcy. Należy do nich zmiana profilu zapotrzebowania przez zastosowanie sterowania czasem załączania wybranych odbiorników oraz zastosowanie magazynowania energii w miejscu jej wytworzenia. Praktyczne wdrożenie wymienionych metod na szerszą skalę wymaga jednak opracowania odpowiednich rozwiązań technicznych i organizacyjnych. Rozwiązania te mogłyby być wzorowane na usłudze *Demand Side Response*, funkcjonującej obecnie na poziomie systemowym.

Tabela 1. Najważniejsze dane rozpatrywanych akumulatorowych zasobników energii oraz wyniki analizy opłacalności zakupu magazynu

Lp.	Typ magazynu	Pojemność	Przewidywana żywotność		Cena zakupu		Roczny koszt instalacji magazynu	Możliwe roczne zmniejszenie straty
		kWh	cykle	lata	zł	zł/kWh	zł	zł
1	Pb 150 Ah	7,2	2500	8,3	4086	568	492	239
2	Pb 200 Ah	9,6	2500	8,3	5448	568	656	239
3	LiFePO ₄ 150 Ah	7,2	5000	16,7	28311	3932	1695	239
4	LiFePO ₄ 200 Ah	9,6	5000	16,7	33142	3452	1985	239
5	BMZ ESS 9.0	8,5	5000	16,7	19063	2243	1141	239
6	AXIStorage Li 9S	8,5	7000	23,3	17383	2045	746	239
7	Fronius Battery 9.0	9,0	8000	26,7	33069	3674	1239	239
8	LG Chem REUS 10	9,8	6000	20,0	20148	2056	1007	239
9	BYD Battery-Box L10.5	10,5	5000	16,7	21664	2063	1297	239
10	Tesla Powerwall 2	14,0	3200	10,7	39271	2805	3670	239

Autorzy: mgr. inż. Tomasz Naczyński, Politechnika Śląska – absolwent 2020, E-mail: tomasz0128@interia.pl; dr hab. inż. Roman Korab prof. PŚ; E-mail: roman.korab@polsl.pl; Politechnika Śląska, KEISU, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice

LITERATURA

- [1] Watson, J.D., Watson, N.R., Santos-Martin, D., Wood, A.R., Lemon, S. and Miller, A.J.: Impact of Solar Photovoltaics on the Low-Voltage Distribution Network in New Zealand. IET Gener. Transm. Distrib., 2016, 10, doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.1076
- [2] Singh R., Tripathi P. and Yatendra K.: Impact of Solar Photovoltaic Penetration In Distribution Network. 2019 3rd International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), Noida, India, 2019, doi.org/10.1109/RDCAPE47089.2019.8979014.
- [3] Fernández G., Galan N., Marquina D., Martínez D., Sanchez A., López P., Bludszuweit H., Rueda J.: Photovoltaic Generation Impact Analysis in Low Voltage Distribution Grids. Energies. 2020, 13 (17), 4347, doi.org/10.3390/en13174347
- [4] Gandhi O., Kumar D.S., Rodríguez-Gallegos C.D., Srinivasan D.: Review of power system impacts at high PV penetration. Part I: Factors limiting PV penetration. Solar Energy, 2020, 210, doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.097

- [5] PTPiREE: Mikroinstalacje w Polsce. www.ptpiree.pl/energetyka-w-polsce/energetyka-w-liczbach/mikroinstalacje-w-polsce (dostęp 2021.04.13)
- [6] Wójcicki R.: Autokonsumpcja energii elektrycznej w prosumenckiej osłonie kontrolnej. Rynek Energii, 2020, 1
- [7] Topolski J.: Potrzebne zmiany regulacji w związku z rozwojem mikroinstalacji OZE. www.cire.pl (dostęp 2021.04.13)
- [8] Chruściel M.: LabVIEW w praktyce. Wydawnictwo BTC, Legonowo 2008
- [9] Wojciechowski H.: Technologie magazynowania energii, cz. I, Instal 2/2017
- [10] Akumulatory ogólnego zastosowania, www.batimex.pl (dostęp 2021.04.16)
- [11] Magazyny energii dla instalacji fotowoltaicznych, www.europe-solarstore.com (dostęp 2021.04.16)
- [12] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii. Tekst jednolity. Dz. U. 2020, poz. 261
- [13] Naczyński T.: Źródło fotowoltaiczne w układzie zasilania odbiorcy indywidualnego, Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska 2020
- [14] Taryfa dla energii elektrycznej – dla odbiorców grup taryfowych G11, G12, G12w, G13, www.tauron.pl (dostęp 2021.04.16)