

## Funkcjonowanie magazynów energii jako układów ograniczających koszty zakupu energii elektrycznej

**Streszczenie.** Wielu odbiorców energii elektrycznej funkcjonuje obecnie na rynku energii jako prosumenci. Ważnym aspektem funkcjonowania prosumentów na rynku energii jest sposób rozliczania się za pobieraną i oddawaną do sieci energię elektryczną. Układy prosumenckie coraz częściej wyposażane są w magazyny energii. W artykule zwrócono uwagę na możliwość wykorzystania magazynów energii elektrycznej jako układów mających na celu ograniczenie kosztów zakupu energii elektrycznej. W tym celu zaproponowano i przeanalizowano rozwiązanie polegające celowym i zaplanowanym kształtowaniu przebiegów krzywych zmienności obciążenia u odbiorcy przez magazyn energii i wykorzystaniu różnic cenowych wynikających ze zmienności opłat w taryfach wielostrefowych.

**Abstract.** Many electricity consumers currently operate on the energy market as prosumers. An important aspect of the functioning of prosumers on the energy market is the way in which electricity consumed and transmitted to the electrical grid is settled. Prosumer systems are increasingly often equipped with energy storage. The article draws attention to the possibility of using electricity storage as systems aimed at reducing the costs of purchasing electricity. For this purpose, a solution was analyzed, which involved the deliberate and planned shaping of load variability curves at the recipient by the energy storage and the use of price differences resulting from the variability of fees in multi-zone tariffs. (**The functioning of energy storage facilities as systems that reduce the costs of purchasing electricity**).

**Słowa kluczowe:** elektroenergetyka, magazyny energii, taryfy elektroenergetyczne, prosumenci energii elektrycznej.

**Keywords:** electricity, energy storage, electricity tariffs, electricity prosumer.

### Wstęp

Funkcjonowanie wszelkiego rodzaju obiektów budowlanych oraz zaspakajanie podstawowych potrzeb człowieka wiąże się z pewną konsumpcją energii. Jednym z jej rodzajów jest energia elektryczna. W klasycznym układzie struktury zasilania energia elektryczna w całości jest przesyłana od źródła do odbiorcy za pomocą sieci elektroenergetycznych. W tym przypadku istnieje tylko jeden kierunek przesyłu energii elektrycznej z sieci do odbiorcy. Obecnie coraz częściej można zaobserwować model prosumencki. W tym modelu użytkownik energii elektrycznej jest zarówno jej producentem, jak i konsumentem. W pewnych warunkach energia elektryczna (przy bieżącej nadwyżce produkowanej energii elektrycznej nad bieżącym zużyciem) jest wprowadzana do sieci. W takim układzie pojawia się drugi kierunek przesyłu energii od odbiorcy do sieci. Oba rozwiązania są akceptowalne przez prawo i mogą pojawiać się z różną intensywnością w ciągu dnia, miesiąca lub roku [10, 11]. Zmiana kierunku przepływu energii elektrycznej wiąże się z zastosowaniem pewnego rozwiązania technicznego - prosumenckiego źródła energii (panele fotowoltaiczne, turbina wiatrowa) o odpowiedniej mocy znamionowej lub doposażeniem układu zasilania o magazyn energii.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami za dostarczenie i oddawanie do sieci energii elektrycznej naliczana jest należna kwota. Kwotę tę określa bilans związany z woluminem energii pobranej i wprowadzonej wskazywanej przez licznik zainstalowany w danym PPE. Ceny za pobór i wprowadzanie energii elektrycznej do sieci są naliczane na podstawie stosownych umów z producentem i dostawcą energii elektrycznej, a ich wielkość w zdecydowanej większości związana jest ze stawkami zatwierdzonymi przez Prezesa URE w stosownych taryfach [4, 11].

Patrząc na profil samej konsumpcji energii elektrycznej danego użytkownika na całkowity koszt energii elektrycznej ma wpływ wiele czynników i aspektów związanych z charakterystycznym dla tego odbiorcy przebiegiem zmienności obciążenia. Najczęściej, na podstawie analizy profilu energetycznego, określa się najbardziej korzystną dla danego odbiorcy grupę taryfową.

W procesie analizy kosztów i doborze odpowiedniej taryfy dla klienta prosumenckiego bierze się również pod uwagę możliwość wpływu na kształtowanie przebiegu zmienności obciążenia [4]. Profil użytkownika i przebieg zmienności obciążenia można kształtować na dwa sposoby. Pierwszy sposób to określenie okresów pracy dla poszczególnych odbiorników w ustalonych porach dnia lub tygodnia. W tym przypadku unika się włączania układów energochłonnych w okresach szczytowych i przerzuca się ich pracę na okresy o bardziej korzystnej cenie energii. Układami racjonalizującymi zużycie energii elektrycznej w budynkach mogą być odpowiednio wyposażone układy BMS, systemy monitoringu mediów lub układy automatyki budynkowej [1, 3]. Często, ze względu na specyfikę funkcjonowania obiektu wprowadzenie takiego rozwiązania nie jest możliwe, np. funkcjonowanie obiektów użyteczności publicznej. Drugi sposób to wykorzystanie środków technicznych do wytwarzania i magazynowania energii elektrycznej. Takie rozwiązanie umożliwia zwiększenie stopnia autokonsumpcji oraz aktywne sterowanie procesem przepływu energii elektrycznej z i do sieci.

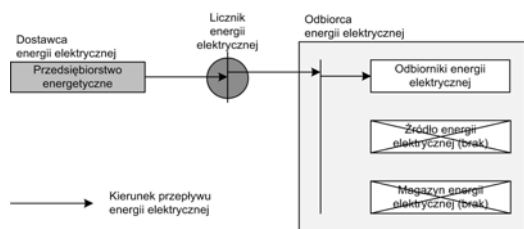
W powszechnym rozumieniu magazyny energii elektrycznej to układy współpracujące ze źródłami energii elektrycznej (np. układami paneli fotowoltaicznych) i służące do magazynowania nadmiaru produkowanej energii elektrycznej lub dostarczania jej w przypadku deficytu energii po stronie odbiorcy. Układy te sprzyjają realizacji idei autokonsumpcji. Jest to podstawowe podejście i wynika z racjonalnego podejścia do takiego układu pod względem technicznym. W takim układzie nie przesyła się nadwyżek produkowanej energii do sieci, tylko gromadzi się je i konsumuje się w okresach większego zapotrzebowania na energię elektryczną.

W artykule zwrócono uwagę na aspekt technicznych możliwości magazynów energii elektrycznej do pobierania i oddawania energii w korzystnych cenowo okresach czasu. Takie rozwiązanie może funkcjonować niezależnie od realizacji przez magazyny energii zadań związanych z zapewnieniem dużego stopnia autokonsumpcji. Wiąże się jedynie z koniecznością wyboru przez użytkownika u dostawcy energii elektrycznej taryfy wielostrefowej, np. B23.

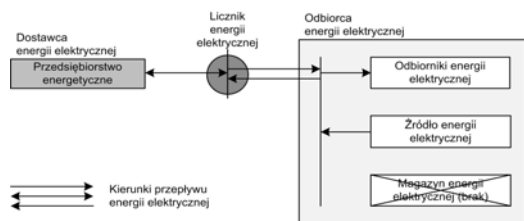
## Odbiorca energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym

Zgodnie z obowiązującymi przepisami [10, 11] odbiorca energii elektrycznej, w tym prosument, posiadający stosowną umowę z przedsiębiorstwem energetycznym może funkcjonować w systemie elektroenergetycznym na cztery podstawowe sposoby:

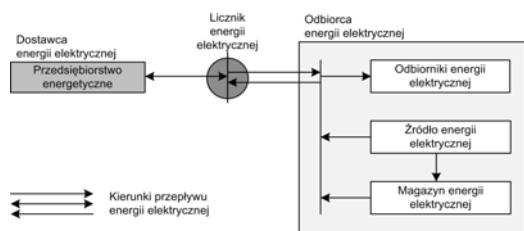
- opcja 1 (rys. 1) - klasyczny odbiorca energii elektrycznej (odbiorca końcowy) pobierający w całości energię elektryczną na własne potrzeby, bez zainstalowanego źródła energii, np. paneli fotowoltaicznych;
- opcja 2 (rys. 2) - prosument pobierający z sieci część energii elektrycznej na własne potrzeby i posiadający zainstalowane źródło energii elektrycznej wytwarzające energię elektryczną na własne potrzeby oraz wprowadzający nadwyżki produkowanej energii do sieci;
- opcja 3 (rys. 3) - prosument pobierający z sieci część energii elektrycznej na własne potrzeby i posiadający zainstalowane źródło energii elektrycznej oraz współpracujący z nim magazyn energii elektrycznej;
- opcja 4 (rys. 4) - odbiorca pobierający z sieci część energii elektrycznej na własne potrzeby i posiadający magazyn energii w celu jej magazynowania lub zużycia na potrzeby wytwarzania, przesyłania lub dystrybucji energii elektrycznej.



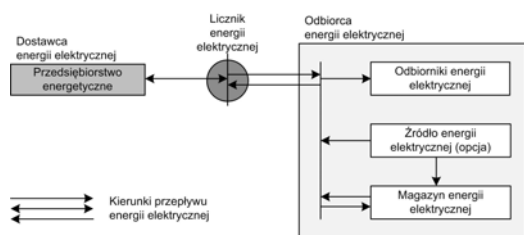
Rys. 1. Struktura układu zasilania – opcja 1



Rys. 2. Struktura układu zasilania – opcja 2



Rys. 3. Struktura układu zasilania – opcja 3



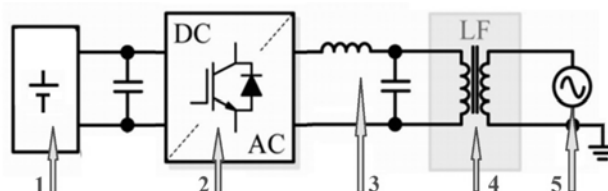
Rys. 4. Struktura układu zasilania – opcja 4

Oczywiście istnieje możliwość określenia i zdefiniowania jeszcze innych, bardziej szczegółowych przypadków wynikających z przedstawionego podziału. Na potrzeby prowadzonych analiz przyjęto do badań model odbiorcy (prosumenta) aktywnego, który ma możliwości techniczne wytwarzania i magazynowania energii oraz wprowadzania jej do sieci w wybranych okresach czasu.

## Magazyny energii elektrycznej

Magazyn energii elektrycznej to instalacja umożliwiającą magazynowanie energii elektrycznej i wprowadzenie jej do sieci elektroenergetycznej. Magazyny energii wykorzystywane do zaspokajania potrzeb energetycznych odbiorców to w zasadzie nowe rozwiązania techniczne podnoszące niezawodność zasilania i bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej. Podstawowe rozwiązanie zastosowania magazynu energii to rozwiązanie polegające na współpracy magazynu energii z instalacjami OZE (panelami PV lub wiatrakami) w ramach układów prosumenckich [2, 5, 6, 7, 8, 9]. Wcześniej stosowane układy magazynowania energii miały stosunkowo niewielką pojemność i służyły do podtrzymania funkcjonowania ważnych i tylko wybranych obwodów elektrycznych bądź elektronicznych występujących, np. w systemach bezpieczeństwa. Nowoczesne magazyny energii charakteryzują się znacznie większymi pojemnościami i umożliwiają gromadzenie nadmiarowej energii w przypadku współpracy z układami OZE zwiększając poziom autokonsumpcji. W szczególnych przypadkach i okresach czasu zapewnić mogą samowystarczalność energetyczną odbiorcy [2, 5, 6, 7, 8, 9]. Niemniej jednak magazyny energii mogą funkcjonować również jako niezależne układy, np. bez współpracy z układami OZE. Wtedy magazyny energii mogą służyć jako rezerwuuar energii stosowany do magazynowania pobranej z sieci energii elektrycznej.

Schemat blokowy układu magazynu energii został przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Schemat blokowy układu magazynu energii współpracującego z siecią zasilania budynku: 1 – magazyn energii; 2 – układ przekształtnika mocy; 3 – filtr LC; 4 – transformator separamy; 5 – sieć elektroenergetyczna

Racjonalne funkcjonowanie magazynu energii związane jest z jego sprawnością. Im jest ona wyższa tym efektywniejsze są przemiany energetyczne związane z magazynowaniem i oddawaniem energii elektrycznej. Nowoczesne magazyny energii charakteryzują się sprawnością powyżej 90%, z każdej 1 kW·h energii potrzebnej do zmagazynowania energii można otrzymać z powrotem do użytku powyżej 0,9 kW·h [9].

Przemysłowe magazyny energii budowane mogą być jako układy wewnętrzne lub zewnętrzne. Układy wewnętrzne magazynów energii elektrycznej (rys. 6) umieszczone są wewnątrz budynków i stanowią integralną część ich infrastruktury technicznej. Ciekawym rozwiązaniem są układy zewnętrzne magazynów energii elektrycznej (rys. 7) wykonane w postaci modułowych kontenerów. Takie rozwiązanie umożliwia bezpieczne odseparowanie magazynu energii od obiektu budowlanego, jego niezależność konstrukcyjną oraz w pewnym sensie mobilność [2].



Rys. 6. Wewnętrzny magazyn energii elektrycznej o pojemności 300 kW·h

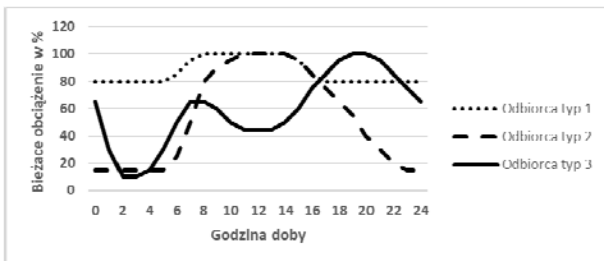


Rys. 7. Zewnętrzny kontenerowy magazyn energii elektrycznej o pojemności 500 kW·h

### Przebiegi zmienności obciążenia odbiorców

Ważnym aspektem związanym z funkcjonowaniem odbiorcy końcowego energii elektrycznej na rynku energii jest jego profil odbiorcy. W profilu odbiorcy zawarta jest informacja o przepływie (odbiorze lub wprowadzaniu) energii elektrycznej z poszczególnych okresach doby oraz mocy maksymalnych jakie pobiera dany odbiorca w danym okresie. Na podstawie analizy zużycia energii elektrycznej przez odbiorcę określanym może być również szereg ważnych współczynników, jak np. średnie wykorzystanie mocy szczytowej. W przypadku taryf wielostrefowych profil odbiorcy określa zużycie energii elektrycznej w poszczególnych strefach. Na podstawie profilu odbiorcy można określić ewentualne korzyści związane z ekonomicznym zastosowaniem magazynów energii, dobrać ich wielkości (pojemności), a także określić najbardziej uzasadnioną ekonomicznie taryfę [4].

Szczegółowy profil użytkownika można określić na podstawie przebiegów zmienności obciążenia. Przebiegi zmienności obciążenia mogą być generowane przez współczesne układy pomiarowe lub analizatory sieci. Na rys. 8 przedstawiono poglądowe przebiegi zmienności obciążenia dla wybranych grup odbiorców.



Rys. 8. Poglądowe dobowe przebiegi zmienności obciążenia dla: odbiorcy przemysłowego pracującego w trybie pracy ciągłej (typ 1), odbiorcy o charakterze pracy biurowo-administracyjnym lub odbiorcy przemysłowego pracującego w trybie jednozmianowym (typ 2), odbiorcy indywidualnego rozliczanego w taryfie G (typ 3)

Na podstawie analizy przedstawionych modeli można zauważyć, że odbiorcy będą mieli różną motywację do zainstalowania i użytkowania magazynów energii. Każdy z tych przypadków, nie generuje nadwyżek energii elektrycznej (nawet, jeżeli jest prosumentem). W takich przypadkach magazyn energii może służyć do racjonalnego kształtowania krzywych zapotrzebowania na energię elektryczną.

### Funkcjonowanie i struktura opłat za energię elektryczną – studium przypadku

Opłaty związane z użytkowaniem energii elektrycznej są związane trzema czynnikami, pierwszy to opłaty stałe, drugie zależne od zamówionej mocy, a trzecie od zużytej energii. Dodatkowo trzeci czynnik może być podzielony, na energię zużytą w określonych strefach czasowych. W przypadku taryf wielostrefowych występują różnice cenowe za 1kW·h. Charakterystyka wybranych składników opłat przedstawiona została w tabeli 1.

Tabela 1. Struktura opłat za energię elektryczną (dla rozpatrywanego przypadku) zależna od stawek związanych ze zużyciem (poborem) energii elektrycznej

Nazwa składnika	Oznaczenie	Jednostka	Cena netto
Energia w szczycie przedpołudniowym	S01	zł/kWh	1,16400
Energia w szczycie popołudniowym	S02	zł/kWh	1,34600
Energia w pozostałych godzinach doby	S03	zł/kWh	0,88000
Opłata przesyłowa w szczycie przedpołudniowym	S04	zł/kWh	0,07626
Opłata przesyłowa w szczycie popołudniowym	S05	zł/kWh	0,13440
Opłata przesyłowa w pozostałych godzinach doby	S06	zł/kWh	0,02448
Opłata mocyowa	S07	zł/kWh	0,10280
Opłata jednoczesna	S08	zł/kWh	0,02421
Opłata kompensacyjna	S09	zł/kWh	0,00488
Opłata OZE	S10	zł/kWh	0,00080

Bo badań, jako model został przyjęty duży budynek o charakterze dydaktyczno-naukowym, którego roczne zapotrzebowanie na energię elektryczną jest na poziomie 1000 MW·h. Obiekt rozliczany jest według taryfy B23. Do wyliczeń przyjęto ceny umowne (rynkowe).

W okresie rocznym całkowite zużycie energii elektrycznej w poszczególnych strefach rozkładało się w następujący sposób:

- szczyt poranny – 27%;
- szczyt popołudniowy – 13%;
- pozostałe godziny – 60%.

Opłacie mocyowej podlegało – 55% rocznego zużycia.

Z zaprezentowanych w tabeli 1 stawek cenowych związanych z zakupem energii elektrycznej od wiodącego na rynku dostawcy, wynika, że najmniejszy koszt zakupu energii elektrycznej ponosi odbiorca w strefie nocnej poza godzinami obowiązywania opłaty mocyowej. Natomiast największy jest koszt zakupu energii elektrycznej w szczycie popołudniowym w godzinach objętych naliczaniem opłaty mocyowej.

Dla obu analizowanych okresów koszty jednostkowe zakupu energii elektrycznej wynoszą odpowiednio:

- najniższy koszt zakupu energii elektrycznej:

$$C_{\min} = S03 + S06 + S08 + S09 + S10$$

$$(1) \quad C_{\min} = 0,9145 \frac{zł}{kW \cdot h}$$

- najwyższy koszt zakupu energii elektrycznej:

$$C_{\max} = S02 + S05 + S07 + S08 + S09 + S10$$

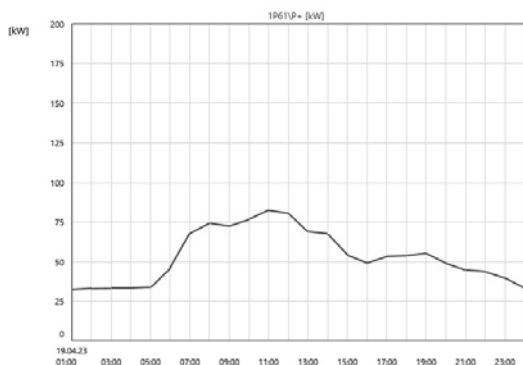
$$(2) \quad C_{\max} = 1,6151 \frac{zł}{kW \cdot h}$$

Z przeprowadzonego na podstawie (1) i (2) wyliczenia wynika, że różnica w cenie jednostkowej energii elektrycznej dla rozpatrywanego przypadku wynosi ok. 0,7zł/kW·h.

## Kształtowanie dobowej zmienności obciążenia za pomocą magazynu energii – studium przypadku

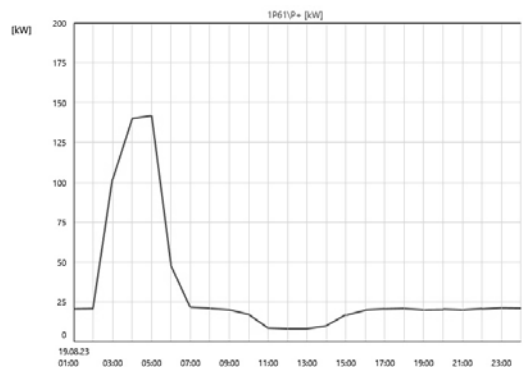
Funkcjonowanie u odbiorcy dużego magazynu energii umożliwia elastyczne wykorzystanie go do racjonalnego kształtowania krzywych zmienności obciążenia.

Na rys. 9 przedstawiono naturalną, krzywą dobowego przebiegu obciążenia dla dnia roboczego.

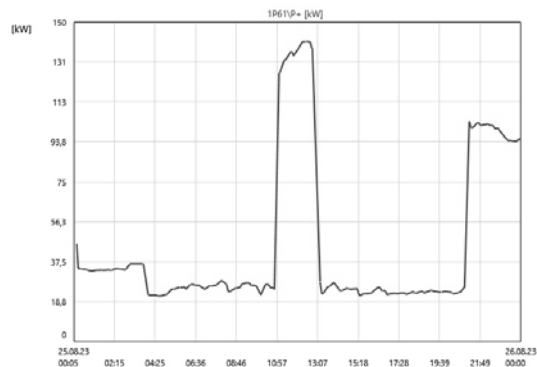


Rys. 9. Przykładowy rzeczywisty dobowy przebieg zmienności obciążenia odbiorcy w dzień roboczy

Na rys. 10 i rys. 11 przedstawiono wpływ użycia magazynu energii na krzywą przebiegu zmienności obciążenia u odbiorcy. Na rys. 10 magazyn jest ładowany jednokrotnie w ciągu dnia, przy najbardziej korzystnej cenie energii elektrycznej, natomiast na rys. 11 magazyn jest ładowany dwukrotnie w ciągu doby. Na rys. 10 i rys. 11 widać znaczne ograniczenie poboru energii elektrycznej w okresach szczytu przedpołudniowego i popołudniowego.



Rys. 10. Wpływ zastosowania magazynu energii do regulacji przepływem energii między dostawcą a odbiorcą – ładowanie jednokrotne w ciągu doby



Rys. 11. Wpływ zastosowania magazynu energii do regulacji przepływem energii między dostawcą a odbiorcą – ładowanie dwukrotne w ciągu doby

## Podsumowanie

Zastosowanie magazynu energii daje możliwość realnego wpływu na kształtowanie dobowej zmienności obciążenia. Dzięki zastosowaniu magazynu energii o odpowiednio dużej pojemności odbiorca może stać się aktywnym uczestnikiem rynku.

Zastosowanie magazynu energii umożliwia nie tylko realizację funkcji umożliwiającej zwiększenie współczynnika autokonsumpcji, ale także dokonywanie planowych przepływów energii w celu zakupu energii elektrycznej po niższych kosztach.

Z analizy kosztów jednostkowych wynika, że koszt 1kW·h w okresach nocnych stanowi ok. 57% kosztu 1kW·h w okresach szczytu popołudniowego. Wynika z tego, że racjonalne może być wykorzystywanie magazynów energii elektrycznej od aktywnego działania na rynku energii elektrycznej w prowadzeniu efektywnych działań ekonomicznych.

W artykule nie analizowano opłacalności takiego rozwiązania w aspekcie uwzględniającym również kosztów inwestycyjnych (zakup magazynu). Zostały uwzględnione tylko potencjalne możliwości w przypadku posiadania magazynu energii przez odbiorcę.

**Finansowanie:** Fundusz dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Lubelskiej: **FD-20/EE-2/402** oraz **FD-20/EE-2/802**

**Autorzy:** dr inż. Marcin Buczaj, Politechnika Lubelska, Katedra Elektrotechniki i Elektrotechnologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: m.buczaj@pollub.pl; dr inż. Andrzej Sumorek, Politechnika Lubelska, Katedra Mechaniki Budowli, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin, E-mail: a.sumorek@pollub.pl; dr inż. Agnieszka Buczaj, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Katedra Podstaw Techniki; ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, agnieszka.buczaj@up.lublin.pl.

## LITERATURA

- [1] Buczaj M., Michalak D.: Smart City - Elementy zarządzania środowiskiem i infrastrukturą miasta inteligentnego. *Wydawnictwo Texter*, Warszawa 2018
- [2] Fatyga K., Zieliński D., Sensorless Current Pulsation Compensation in a Hybrid Energy Storage, *Applied Sciences*, nr 4, vol. 13/2023, 1-13
- [3] Horyński M., Majcher J. Application of cloud computing in programming intelligent electric networks in prosumers' households, *Journal of Ecological Engineering*, 17(5)/2016, 107-113
- [4] Majka K.: Systemy rozliczeń i taryfy w elektroenergetyce, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005
- [5] Maćków P., Guzdek P., Biskupski J., Grzesiak W., Innowacyjne magazyny energii wyposażone w funkcję monitorowania i nadzoru. Wybrane zagadnienia, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 9, 194-198
- [6] Makarski P., Ścibisz M., Kapica J., Superkondensator jako krótkookresowy magazyn energii dla generatora fotowoltaicznego zasilającego układy wentylacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), nr 10, 82-85
- [7] Plebankiewicz I., Przybył W., Solarny Magazyn Energii – rozwiązanie oparte na komercyjnych krzemowych ogniwach słonecznych i superkondensatorach, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 1, 139-142
- [8] Suresh V., Kaczorowska D., Janik P., Rezmer J., Load Flow Analysis in local microgrid with storage, *Przegląd Elektrotechniczny*, 95 (2019), nr 9, 98-102
- [9] Šimić Z., Topić D., Knežević G., Pelin D., Battery energy storage technologies overview, *International journal of electrical and computer engineering systems*, Vol. 12, Nr 1/2021, 53-65
- [10] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii. *Dz.U. 2015 poz. 478*
- [11] Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. Prawo energetyczne. *Dz. U. 1997 Nr 54 poz. 348*