

doi:10.15199/48.2024.08.08

Wpływ przyłączania odnawialnych źródeł energii i magazynów energii na warunki pracy sieci rozdzielczej SN

Streszczenie. W artykule przedstawiono problematykę pracy źródeł energii elektrycznej oraz magazynów energii w sieci dystrybucyjnej i ich wpływ na różnicę bilansową oraz na straty energii. Na przykładzie rzeczywistej sieci SN TAURON Dystrybucja S.A. (TD S.A.) przedstawiono wpływ pracy OZE oraz magazynu energii na godzinowe straty energii.

Abstract. The paper presents some problems of electric energy sources and storage devices functioning in distribution networks. An influence of renewable electric sources and the storage devices on voltage terms and on electric energy losses in MV networks was presented. **(An influence of renewable energy source and energy storage devices on terms of distributions network action)**

Słowa kluczowe: straty energii, odnawialne źródła energii, magazyny energii.

Keywords: electric energy losses, renewable energy sources, energy storage devices

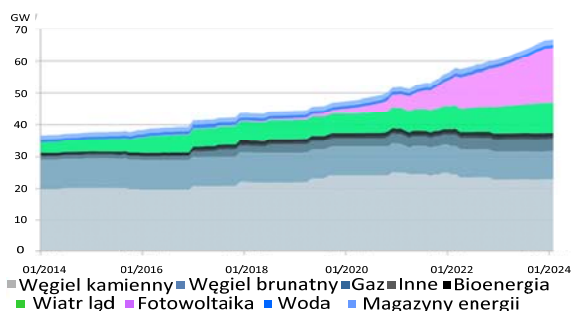
Wstęp

Funkcjonowanie systemu dystrybucyjnego, zarządzanego przez Operatora Systemu Dystrybucyjnego (OSD), jest oparte na Ustawie Prawo Energetyczne, Unijnej Dyrektywie w sprawie wspólnych zasad rynku wewnętrznego energii elektrycznej, Ustawie o Odnawialnych Źródłach Energii (OZE) oraz Rozporządzeniu w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. W dniu 17 maja 2016 r. weszło w życie Rozporządzenie Komisji (UE) 2016/631 z dnia 14 kwietnia 2016 r. ustanawiające Kodeks Sieci dotyczący przyłączenia jednostek wytwórczych.

Efektywność pracy sieci dystrybucyjnej zawiera w sobie element techniczny, wpływający na jakość dostarczanej energii elektrycznej, jak i ekonomiczny, związany z kosztami dostarczania energii, w tym bardzo istotny koszt różnicy bilansowej (RB). Poruszana w artykule problematyka wynika przede wszystkim z aktualności tematu oraz bardzo dużego zainteresowania inwestorów budową i przyłączeniem do sieci elektroenergetycznej nowych magazynów energii elektrycznej. Celem artykułu jest przedstawienie wpływu trybu pracy magazynu energii (ME) oraz obciążenia sieci rozdzielczej SN na wielkość strat energii elektrycznej.

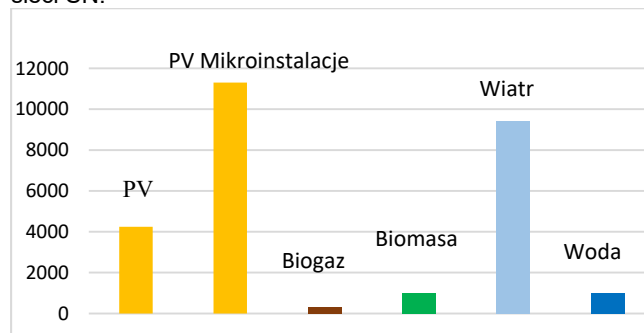
Wpływ OZE i magazynów energii (ME) na pracę sieci elektroenergetycznej i wolumen RB

Trwający proces wzrostu udziału energii pozyskiwanej z OZE, w tym zasadniczo z farm wiatrowych i słonecznych (Rys. 1, Rys. 2) wpływa na zmianę kierunków rozprawy mocy w sieci elektroenergetycznej, zwłaszcza w odniesieniu do energii pozyskiwanej ze słońca.



Rys. 1. Zainstalowana moc źródeł energii elektrycznej w Polsce [GW], stan dla lat 2018-2024, z podziałem na źródła – dane wg energy.instrat

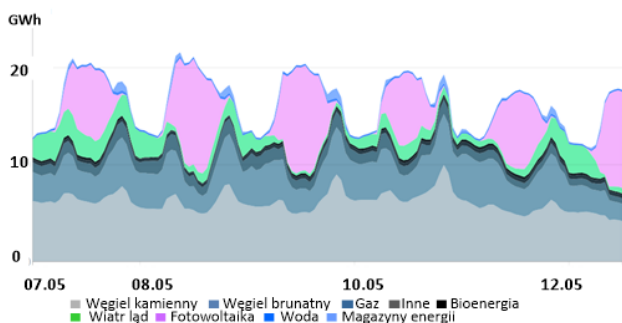
Dynamiczny wzrost przyłączanych w ostatnich latach instalacji fotowoltaicznych (PV), zwłaszcza mikroinstalacji, przyczynił się do zmian kierunków przepływu mocy z poziomu napięcia niskiego do napięć średnich i wysokiego. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że spośród prawie 15 GW zainstalowanej mocy w źródłach fotowoltaicznych 75% wytwarzania występuje w mikroinstalacjach. Oznacza to, że przeszło 11 GW zainstalowanej mocy w źródłach fotowoltaicznych generuje energię do sieci niskiego napięcia. Tak duży poziom generacji instalacji PV na niskim napięciu ma swoje konsekwencje. Nadwyżka energii przepływa poprzez stacje transformatorowe na linie średniego napięcia i dalej poprzez GPZ jest transformowana na poziom sieci wysokiego napięcia. Odwrócenie przepływów skutkuje problemami napięciowymi w sieciach nN. Nadmiar energii powoduje zawyżanie napięć w liniach nN, co skutkuje wyłączaniem inwerterów w mikroinstalacjach. W szczycie generacji fotowoltaicznej na dużą skalę następuje odwrócenie przepływów energii w transformatorach 110/SN, co skutkuje problemami z regulacją napięć na szynach GPZ potęgując dodatkowo problemy napięciowe w sieci SN.



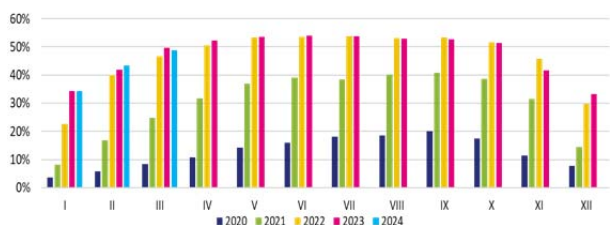
Rys. 2. Zainstalowana moc źródeł energii elektrycznej w Polsce [GW], stan na początku 2024 roku, z podziałem na źródła – dane wg URE oraz energy.instrat

Przyłączanie źródeł energii w pobliżu jej odbioru jest pozytywną sytuacją z punktu widzenia przepływów energii w sieci, ale tylko w sytuacji dostosowania ilości generowanej energii do wielkości jej poboru. Sytuacje te mające dotychczas charakter lokalny, w miarę przyrostu źródeł PV poszerzają swoje oddziaływanie na coraz większy obszar sieci, co niekorzystnie będzie wpływać na zmianę wskaźnika różnicy bilansowej w niektórych okresach. Obecnie mamy już do czynienia z sytuacjami

konieczności odstawiania z ruchu dużych farm PV w dni słoneczne o zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię elektryczną. Nie dotyczy to mikroinstalacji zasadniczo zlokalizowanych na napięciu niskim. W tych obszarach mamy do czynienia dla ww. dni z wyłączaniem się inwerterów po przekroczeniu dopuszczalnego poziomu napięcia 253 V (Rys. 3, 4 i 5).



Rys. 3. Produkcja energii elektrycznej z podziałem na rodzaje źródeł w okresie 08-12.04.2024 r. – dane wg energy.instrat



Rys. 4. Liczba stacji SN/nN za przepływami mocy z sieci nN w kierunku sieci SN dla TD S.A.



Rys. 5. Liczba stacji WN/SN za przepływami mocy z sieci SN w kierunku sieci WN dla TD S.A.

Jednym z możliwych rozwiązań zapobiegających tym zjawiskom jest instalacja magazynów energii, które gromadzą nadmiar produkowanej energii. Należy jednak pamiętać, że urządzenie to, zgodnie z obecnie obowiązującymi zasadami jego przyłączenia, jest zarówno odbiornikiem energii w sytuacji ładowania jak i źródłem energii w sytuacji rozładowania. Prowadzić to może do przeciążenia sieci w trybie ładowania magazynu lub nadmiaru energii w sieci dla trybu rozładowania magazynu. Należy mieć na względzie, że magazyny okresowo muszą dokonywać technologicznego procesu ładowania i rozładowania dla wydłużenia okresu żywotności baterii. W przypadku wykorzystania przez OSD ME jako elementów sieci stabilizujących ich pracę, należy się liczyć ze wzrostem różnicy bilansowej z tytułu określonej sprawności tych urządzeń.

Jednymi z narzędzi, które powinny przyczynić się do korzystnego z punktu widzenia sieci dystrybucyjnej, konfigurowania pracy magazynów energii mogą być w przyszłości ceny dynamiczne.

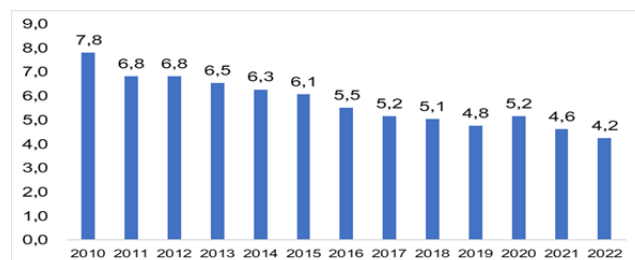
Praca magazynów energii w powiązaniu z odnawialnymi źródłami energii jest aktualnie przedmiotem wielu badań [1, 2, 3]. Ich celem jest optymalizacja pracy źródeł energii

i magazynów energii w celu zapewnienia pokrycia zmiennego zapotrzebowania na moc i stabilizacji pracy sieci, a także minimalizacji kosztów funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.

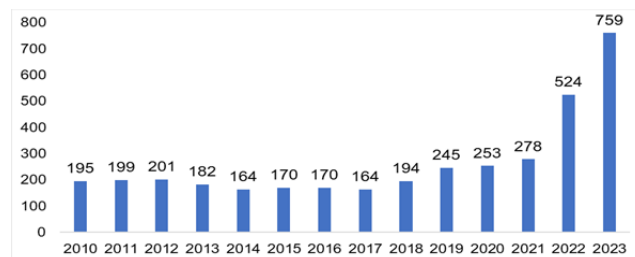
Koszty różnicy bilansowej, zmiana cen energii

Wielkość różnicy bilansowej jest parametrem charakteryzującym efektywność pracy sieci dystrybucyjnej zasadniczo w jej techniczno-ekonomicznym aspekcie. Analiza tej efektywności w poszczególnych obszarach sieci i poziomach napięć dostarcza informacji wskazujących na potrzebę analizy przyczyn zwiększonych wskaźników różnicy bilansowej dla określonych fragmentów sieci [4]. Działanie to ma na celu minimalizację kosztów zakupu energii na pokrycie różnicy bilansowej. Wpływ na ten koszt, oprócz wolumenu różnicy bilansowej, ma cena energii elektrycznej. Mimo malejącego od wielu lat współczynnika różnicy bilansowej, wskazującego na poprawę ogólnej efektywności sieci, który w przeciągu ostatnich lat zmniejszył się z poziomu 7,8% (2010 rok) do 4,24% (2022 rok) (Rys. 6) mieliśmy w ostatnim okresie do czynienia z wysokimi wzrostami cen energii z tytułu zmian kierunków pozyskiwania nośników energii, wynikających z sytuacji politycznej oraz trwającego w Unii Europejskiej procesu odchodzenia od wytwarzania energii elektrycznej z paliw kopalnych.

Zmiany cen energii w ostatnich latach (Rys. 7) wpływają na koszty różnicy bilansowej, które są przenoszone na odbiorców energii elektrycznej poprzez stawki opłat zawarte w taryfach. Aby je zmniejszyć, istotne staje się prowadzenie działań zmierzających do minimalizacji wolumenu różnicy bilansowej [4].



Rys. 6. Średnia wartość wskaźnika różnicy bilansowej [%] dla OSD w Polsce – dane wg Agencji Rynku Energii



Rys. 7. Średnia roczna cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym [zł/MWh] – dane wg Urzędu Regulacji Energetyki

W artykule przedstawiono osiem przypadków pracy rzeczywistego fragmentu sieci, w którym przyłączone są zarówno instalacje OZE w postaci źródeł PV jak i ME.

Przykłady oszacowania godzinowych strat energii

Uproszczony schemat sieci SN, do której przyłączone jest analizowany magazyn energii przedstawiono na Rys.8. Kolorem czerwonym zaznaczono magazyny energii, dla których przeprowadzono analizę strat energii. Sieć dystrybucyjna o napięciu znamionowym 15 kV charakteryzuje się następującymi wielkościami:

- Suma mocy przyłączeniowych źródeł pracujących – 5 598 kW.

- Suma mocy przyłączeniowych źródeł planowanych do przyłączenia – 4 895 kW.
- Minimalne obciążenie GPZ – 3 305 kW.
- Maksymalne obciążenie GPZ – 11 550 kW.
- Moce znamionowe transformatorów 110 kV/15 kV – 25 000 kVA.
- Średnie obciążenie mocą czynną transformatorów 110 kV/15 kV: T1 – 4 000 kW, T2 – 6 100 kW.

Godzinowe straty energii elektrycznej obliczone są dla rzeczywistych obciążeń transformatorów 110 kV/15 kV, przedstawionych w tabeli 1. Są to obciążenia uwzględniające wpływ pracy OZE i źródeł konwencjonalnych z uwzględnieniem pory dnia.

Tabela 1. Rzeczywiste obciążenia transformatorów w aktualnym stanie sieci, przyjęte do obliczeń.

Dzień	Godzina	T1		T2	
		P [kW]	Q [kvar]	P [kW]	Q [kvar]
roboczy	7.15	4542	1829	5885	782
	11.30	1428	1937	4495	761
	19.30	5129	1378	7476	926
święteczny	10.45	-2256	-113	2047	-345
	1.00	-878	-132	2650	-312

Poziomy napięcia oraz godzinowe straty energii zostały obliczone dla różnych wielkości obciążenia oraz różnych trybów pracy magazynu energii. Warunki pracy analizowanej sieci zostały wskazane w tabelach 2 i 3, w których również zawarto wyniki obliczeń.

Wyniki obliczeń poziomów napięcia zamieszczono w tabeli 2, natomiast wyniki obliczeń przepływów prądu i mocy przez transformatory 110 kV/15 kV oraz godzinowych strat energii czynnej zamieszczono w tabeli 3.

Wnioski z przeprowadzonych obliczeń

Wyniki obliczeń wskazują, że poziomy napięcia w sieci SN w istotny sposób zależą od przepływów energii wynikających z mocy pracujących źródeł. W przypadku nadmiaru energii generowanej w sieciach nN i SN poziomy napięcia są zbyt wysokie i wymagają regulacji. W przypadku dużego obciążenia i braku generacji napięcia w sieciach maleją.

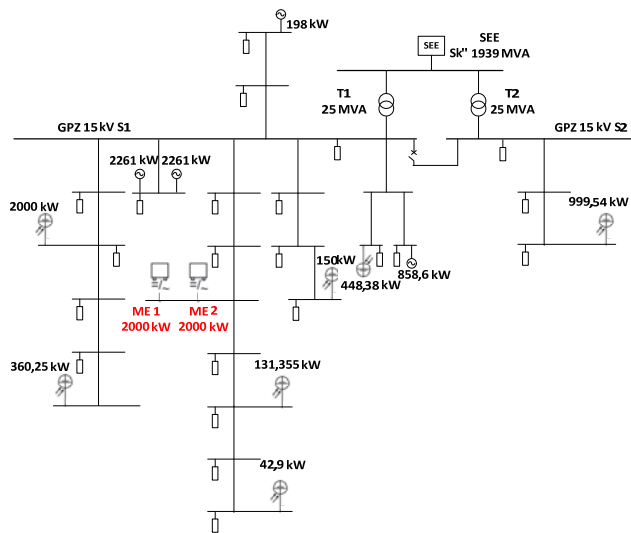
W sekcji SN w GPZ, do której jest przyłączony magazyn energii, kierunek przepływu energii przez transformator 110 kV/15 kV zależy od trybu pracy magazynu energii. Jeżeli pracuje on w trybie ładowania przy nadmiarze energii w sieci i w trybie rozładowania w szczytach obciążenia to parametry napięciowe się poprawiają oraz maleją straty.

Udział godzinowych strat energii w transformatorach 110 kV/15 kV nie przekracza 10% łącznych godzinowych strat energii w analizowanej sieci. Osiągają największe wartości w przypadku, gdy nie pracują OZE i równocześnie nie pracuje magazyn energii oraz w przypadku, gdy nie pracują OZE a magazyn energii pracuje w trybie rozładowania (godz. 19.30 w dniu roboczym). W pozostałych przypadkach są znacznie mniejsze.

Godzinowe straty energii w liniach SN osiągają najmniejsze wartości w przypadku, gdy OZE pracują z pełną mocą, natomiast nie pracuje magazyn energii (dzień świąteczny godz. 10.45 i dzień roboczy godz. 11.30). W pozostałych analizowanych przypadkach straty energii w liniach SN są zbliżone, przy czym największe wartości osiągają w przypadku ładowania magazynu.

Łączne godzinowe straty energii osiągają najmniejsze wartości w przypadku, gdy OZE pracują z pełną mocą, natomiast nie pracuje magazyn energii (dzień świąteczny godz. 10.45 i dzień roboczy godz. 11.30). W pozostałych przypadkach wielkości tych strat są zbliżone do siebie, przy

czym największe wartości osiągają w przypadku ładowania magazynu.



Rys.8. Schemat analizowanej sieci SN (opracowanie własne na podstawie danych OSD)

Wnioski ogólne

Na podstawie przedstawionych ogólnych rozważań i przeprowadzonych obliczeń stwierdza się, że:

- Różnica bilansowa w sieciach nN z mikroinstalacjami do pewnego poziomu energii wprowadzonej z mikroinstalacji w stosunku do energii pobranej z sieci RB maleje.
- Zbyt duża ilość energii wprowadzonej do sieci przez mikroinstalacje PV i ME wynikająca z przewymiarowania generacji mocy oraz niskiej autokonsumpcji (okresowo) powoduje występowanie nadwyżki, która jest oddawana do sieci SN, a w skrajnych przypadkach - po zbilansowaniu na poziomie SN, jest transferowana do sieci WN. Zjawiska te powodują wzrost RB powyżej pewnego progu energii wprowadzonej do nN.
- Dołączenie magazynów do pracujących mikroinstalacji powoduje wzrost autokonsumpcji, skutkującej brakiem zbędnych przepływów w sieci i oddawania nadwyżek do WN, a w konsekwencji obniżenie RB.
- Dołączanie do sieci magazynów będących własnością OSD skutkuje korzystną poprawą parametrów jakościowych (symetryzacja, obniżenie napięć) oraz poprawą rozptyłów w sieci. Jednocześnie energia pobrana na potrzeby własne magazynu skutkuje wzrostem RB.
- Przyłączenie ME lub źródeł PV na końcach linii może wpłynąć na wzrost RB w przypadku niekorzystnego rozlokowania znaczących poborów energii, np. w innych liniach w tym obszarze sieci.
- Wpływ OSD na pracę ME jest bardzo ograniczony. Konieczne są dodatkowe mechanizmy np. finansowe (taryfy dynamiczne) dające wymierne korzyści finansowe właścicielom magazynów w przypadku akumulacji energii w godzinach szczytu i oddawania energii w szczytach obciążenia. Taka praca magazynów wspomagałaby pracę sieci SN, obniżając nakłady potrzebne dla przystosowania ich do rosnącej generacji OZE.
- OSD powinien zwiększać zainteresowanie przyłączaniem ME do sieci dystrybucyjnej, pracujących jako elementy stabilizujące jej pracę.

Tabela 2. Wyniki obliczeń poziomów napięcia

Rodzaj dnia	Opis układu	Przepływy przez transformator T1 110 kV/15 kV			Przepływy przez transformator T2 110 kV/15 kV			Godzinowe straty energii czynnej		
		I	P	Q	I	P	Q	T1, T2	Linie	Łącznie
		A	kW	kvar	A	kW	kvar	kWh	kWh	kWh
roboczy	Obciążenie godz. 7.15, OZE załączone z mocą 0,5 P _n , ME 4000 kW rozładowanie	-54	-939	1098	197	5293	624	8,1	219,4	227,5
	Obciążenie godz. 11.30, OZE załączone z pełną mocą, ME nie pracuje	-197	-5350	199	38	1001	-265	7,8	166,7	174,5
	Obciążenie godz. 11.30, OZE załączone z pełną mocą, ME 4000 kW ładowanie	132	2399	2587	131	3503	445	7,1	282,8	290,0
	Obciążenie godz. 19.30, OZE nie pracują, ME 4000 kW rozładowanie	43	1152	316	280	7480	953	12,9	231,4	244,4
	Obciążenie godz. 19.30, OZE nie pracują, ME nie pracuje	194	5111	1663	280	7480	955	17,8	189,9	207,7
święto	Obciążenie godz. 10.45, OZE załączone z pełną mocą, ME 4000 kW ładowanie	-77	-1210	1679	38	1001	-264	3,6	274,9	278,5
	Obciążenie godz. 10.45, OZE załączone z pełną mocą, ME nie pracuje	-76	-1720	1111	130	3502	444	5,6	172,5	178,2
	Obciążenie godz. 1.00, OZE nie pracują, ME 4000 kW ładowanie	142	3219	2030	77	2056	-315	6,0	272,8	278,8

Tabela 3. Wyniki obliczeń przepływów prądu i mocy przez transformatory 110 kV/15 kV oraz godzinowych strat energii czynnej

Rodzaj dnia	Opis układu	Poziomy napięcia		
		GPZ S1	GPZ S2	PCC ME
		kV	kV	kV
roboczy	Obciążenie godz. 7.15, OZE załączone z mocą 0,5 P _n , ME 4000 kW rozładowanie	15,590	15,600	15,900
	Obciążenie godz. 11.30, OZE załączone z pełną mocą, ME nie pracuje	15,672	15,689	15,635
	Obciążenie godz. 11.30, OZE załączone z pełną mocą, ME 4000 kW ładowanie	15,470	15,608	15,030
	Obciążenie godz. 19.30, OZE nie pracują, ME 4000 kW rozładowanie	16,050	15,571	16,338
	Obciążenie godz. 19.30, OZE nie pracują, ME nie pracuje	15,931	15,558	15,854
święto	Obciążenie godz. 10.45, OZE załączone z pełną mocą, ME 4000 kW ładowanie	15,560	15,680	15,120
	Obciążenie godz. 10.45, OZE załączone z pełną mocą, ME nie pracuje	15,593	15,621	15,552
	Obciążenie godz. 1.00, OZE nie pracują, ME 4000 kW ładowanie	15,516	15,675	15,063

Autorzy: dr hab. inż. Barbara Kaszowska, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: B.Kaszowska@po.edu.pl; mgr inż. Dariusz Jeziorny, TAURON Dystrybucja S.A., pl. Powstańców Śląskich 20, 53-314 Wrocław, E-mail: dariusz.jeziorny@tauron-dystrybucja.pl; mgr inż. Ryszard Stolarczyk, TAURON Dystrybucja S.A., ul. Dajwór 27, 31-060 Kraków, E-mail: ryszard.stolarczyk@tauron-dystrybucja.pl; mgr inż. Wojciech Schab, TAURON Dystrybucja S.A., ul. Dajwór 27, 31-060 Kraków, E-mail: wojciech.schab@tauron-dystrybucja.pl

LITERATURA

- [1] Rocha L. C. S., Rotella P., Aquika G., Maheri A. Optimization of hybrid wind-photovoltaic plants with battery energy storage system: Current situation and possible regulatory changes. *Journal of Energy Store*, vol. 51 (2022).
- [2] Seyyedi A. Z. G., Armand M., Akbari E., Moosanezhad J., Khorasani F., Raeesinia M., A non-linear resilient-oriented planning of energy hub with integration of energy storage systems and flexible loads. *Journal of Energy Store*, vol. 51 (2022).
- [3] Janiga K., Metody obniżania napięcia w sieciach z mikroinstalacjami PV – symulacje w programie POWERFACTORY, *Rynek Energii*, nr 5 (162), 2022.
- [4] Praca zbiorowa pod redakcją Jerzego Kulczyckiego, *Straty Energii Elektrycznej w Sieciach Elektroenergetycznych*, PTPIREE, 2009.
- [5] info@instrat.pl, Fundacja Instrat; <https://energy.instrat.pl/>
- [6] Stowarzyszenie Elektryków Polskich Oddział w Krakowie – materiały seminaryjne – *Wpływ fotowoltaiki na pracę sieci energetycznych*