

# Analiza potrzeb wdrożenia magazynów energii w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym

**Streszczenie.** Zapewnienie zbilansowania działania systemu elektroenergetycznego przy znacznym udziale odnawialnych źródeł energii wymaga bufora energii, którego rolę mogą pełnić magazyny energii elektrycznej. W artykule przedstawiono podejście analityczne zmierzające do oceny skali oraz doboru technologii magazynowania energii w systemie polskim. Przedstawione założenia i podjęte prace stawiają sobie za cel zapewnienie zbilansowanego funkcjonowania systemu w długiej perspektywie czasu przy zachowaniu zasad efektywności ekonomicznej oraz uwzględnieniu rozwoju technologii.

**Abstract.** Ensuring the balanced operation of the power system with a significant share of renewable energy sources requires an energy buffer, the role of which can be played by electricity storage. The article presents an analytical approach aimed at assessing the scale and selection of energy storage technologies in the Polish power system. The presented assumptions and undertaken works aim to ensure balanced functioning of the system in the long term while maintaining the principles of economic efficiency and taking into account the development of technology. (**Analysis of the needs for the implementation of energy storage in the National Power System**).

**Słowa kluczowe:** system elektroenergetyczny, magazyny energii, odnawialne źródła energii, analizy długoterminowe.

**Keywords:** power system, energy storage, renewable energy sources, long-term analyses.

## Wstęp

Poszukiwanie alternatywnych źródeł energii, ich wykorzystanie oraz odnowa systemu energetycznego staje się jednym z najważniejszych zadań transformacji energetycznej. Odnawialne źródła energii (OZE), takie jak energia słoneczna, wiatrowa, wodna czy biomasa, mają potencjał do zastąpienia paliw kopalnych i zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Jednak OZE charakteryzują się zmienną i nieprzewidywalną produkcją, co z perspektywy bilansowania podaży z popytem wymaga uzupełnienia o technologie zapewniające dodatkową generację w okresach niskiej produkcji energii z OZE. Magazyny energii elektrycznej mogą być istotnym elementem ułatwiającym integrację i wykorzystanie OZE w systemie elektroenergetycznym. Pozwalają one na przechowywanie nadwyżek energii w okresach nadprodukcji i wykorzystanie odpowiednio w okresach deficytu. Magazyny energii mogą również poprawiać jakość i niezawodność dostaw energii, redukować koszty operacyjne i inwestycyjne systemu, a także wspierać rozwój energetyki prosumenckiej i mobilności elektrycznej.

Jednocześnie dynamiczny rozwój OZE, przy jednoczesnym wygaszaniu kolejnych bloków elektrowni węglowych stanowi coraz większą trudność dla stabilizacji pracy polskich sieci oraz utrzymania parametrów jakościowych energii elektrycznej. Dodatkowym czynnikiem stanowiącym wyzwanie dla utrzymania jakości dostaw energii elektrycznej jest czasowa zmienność zapotrzebowania na energię elektryczną. W tym zakresie krajowy system elektroenergetyczny (KSE) powinien charakteryzować się odpornością na zmiany sezonowe, jak i te dobowe – w tym poranne i wieczorne szczyty popytu na energię elektryczną. Zapewnienie płynności działania systemu wymaga zastosowania bufora energii, którego rolę z powodzeniem mogą pełnić magazyny energii elektrycznej.

## Wykorzystanie magazynów w KSE

Aktualnie w Polsce zastosowanie znalazły dwie technologie magazynowania energii:

- elektrownie szczytowo-pompowe, które są najbardziej rozpowszechnioną i sprawdzoną technologią magazynowania energii na dużą skalę, wykorzystującą grawitację i różnicę poziomów wody w zbiornikach górnych i dolnych;

- baterie elektrochemiczne, które są coraz częściej wykorzystywane do magazynowania energii z fotowoltaiki i wiatru, zarówno na poziomie gospodarstw domowych, jak i na poziomie systemowym.

Poza powyższymi technologiami magazynowania w krajowych planach rozwoju energetyki rozważa się również inne technologie spotykane na świecie [1,2]. Są to:

- magazyny sprężonego powietrza, gdzie spręża się powietrze w zbiornikach a następnie uwalnia w celu napędzania turbin generujących energię elektryczną;
- magazyny grawitacyjne, w których wykorzystuje się różnice energii potencjalnej, przy wykorzystaniu przykładowo dawnych szybów kopalnianych;
- magazyny termiczne, które wykorzystują ciepło lub zimno do magazynowania energii, np. w postaci lodu, wody gorącej, soli topionej lub parafiny;
- magazyny wodorowe, które polegają na wykorzystaniu nadwyżek energii elektrycznej do elektrolizy wody i uzyskiwania wodoru, który może być następnie przechowywany, transportowany lub wykorzystany do wytwarzania energii elektrycznej lub ciepła.

Realny wybór technologii magazynowania energii stosowanych w systemie elektroenergetycznym zależy od wielu czynników [3] i parametrów, takich jak [4]:

- Cel i funkcja magazynu energii, np. stabilizacja pracy sieci, rezerwa mocy, integracja OZE, poprawa jakości energii, zwiększenie niezawodności dostaw, optymalizacja kosztów systemowych, itp.
- Pojemność i moc magazynu energii, czyli ilość energii, która może być zmagazynowana i oddana do sieci w określonym czasie.
- Czas ładowania i rozładowania magazynu energii, czyli szybkość, z jaką można przechowywać i wykorzystywać energię.
- Sprawność magazynu energii, czyli stosunek ilości energii oddanej do sieci do ilości energii pobranej z sieci.
- Koszt magazynu energii, czyli suma nakładów inwestycyjnych, kosztów operacyjnych i utrzymaniowych magazynu energii.
- Trwałość i niezawodność magazynu energii, czyli czas i liczba cykli ładowania i rozładowania, po których magazyn energii zachowuje swoje parametry.

- Wpływ na środowisko, czyli emisja zanieczyszczeń i gazów cieplarnianych, zużycie surowców i energii, zajmowana przestrzeń, hałas, itp.

Różnicowane technologie magazynowania energii mają różne zalety i ograniczenia, dlatego wybór odpowiedniej technologii wymaga analizy kosztów i korzyści, uwzględniającej aspekty techniczne, ekonomiczne, społeczne i środowiskowe. Wybór ten musi być rozważany na tle potrzeb i transformacji energetycznej systemu elektroenergetycznego.

Stąd podjęte analizy dotyczące wykorzystania magazynów energii są ważnym zadaniem, które pozwala na lepsze zrozumienie i wykorzystanie możliwości magazynowania energii w systemach elektroenergetycznych. Modelowanie magazynów energii wymaga uwzględnienia wielu parametrów, które mają wpływ na ich działanie, efektywność, i opłacalność.

### Założenia wykonanych analiz scenariuszowych

Analiza scenariuszowa to metoda, która polega na tworzeniu i zbadaniu wielu możliwych do wystąpienia w przyszłości zdarzeń (w układzie tzw. scenariuszy). Celem tej metody jest mitygowanie niepewności związanej z planowanym przedsięwzięciem i dostosowanie strategii postępowania do różnych warunków otoczenia. Idea analizy scenariuszowej jest taka, że nie można przewidzieć dokładnie, co się wydarzy w przyszłości, ale można przygotować się na różne sekwencje zdarzeń i uwzględnić prawdopodobny zakres przyszłych warunków poprzez prowadzenie analiz w ramach więcej niż jednego scenariusza. Analiza scenariuszowa pomaga zrozumieć otaczającą nas rzeczywistość, identyfikować szanse i zagrożenia, poszerzać zakres podejmowanych opcji działania i ulepszać przewidywane strategie pod względem odporności i elastyczności.

W celu oszacowania zapotrzebowania na magazyny energii w Polsce rozpatrzono 4 główne scenariusze, zróżnicowane ze względu na wielkość zapotrzebowania na energię elektryczną oraz rozwój energetyki jądrowej, zestawione w tabeli 1. Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu narzędzia PLEXOS modułem LT Plan.

Tabela 1. Konstrukcje scenariuszy

Parametr	Scenariusz			
	SC1	SC2	SC3	SC4
Zapotrzebowanie	Niski	Wysoki	Niski	Wysoki
Energetyka jądrowa	Tak	Tak	Nie	Nie

W scenariuszach nieparzystych (SC1 oraz SC3) przyjęto zapotrzebowanie bazowe (niskie), a w scenariuszach parzystych (SC2 oraz SC4) zapotrzebowanie wysokie. Wykorzystano w tym celu dane z Planu rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2023-2032 opracowanego przez PSE S.A. [5].

Elektrownie jądrową uwzględniono w scenariuszu SC1 oraz SC2, natomiast jej brak założono w SC3 i SC4 (obecnie w Polsce nie ma elektrowni jądrowej). Budowa elektrowni jądrowej została przyjęta przy założeniu umiarkowanego tempa rozwoju, a mianowicie deterministycznie przyjęto 6 bloków o mocy 1100 MW każdy poczynając od 2033 r. do 2043 r., przy czym budowa bloków następuje co 2 lata.

We wszystkich scenariuszach założono identyczne ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> przyjęte na podstawie projektu European Resource Adequacy Assessment 2023 prowadzonego przez ENTSO [6].

Podobnie również we wszystkich scenariuszach przyjęto identyczną dostępność gazu ziemnego oraz możliwość

inwestycji w magazyny energii. W zakresie gazu ziemnego w celu oszacowania dostępności tego paliwa posłużono się prognozą zużycia tego paliwa przez sektor energetyczny opracowaną przez spółkę Gaz System S.A. i opublikowaną w ramach dokumentu „Krajowy dziesięcioletni plan rozwoju systemu przesyłowego. Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na paliwa gazowe na lata 2022-2031” [7]. Do analiz symulacyjnych przyjęto górny limit dostępności gazu według prognozy W2.

Potencjały magazynów energii przyjęto na podstawie raportu przygotowanego przez ekspertów z Polskiego Stowarzyszenia Magazynowania Energii oraz Akademii Górniczo-Hutniczej: „Wpływ rozbudowy infrastruktury magazynów energii na rozwój gospodarczy w Polsce - prognoza do 2040 r.” [8]. Raport ocenia potencjał nowych pojemności zainstalowanych w podziale na 2 rodzaje magazynów: magazyny prosumenckie oraz magazyny wielkoskalowe. Na potrzeby analiz symulacyjnych przyjęto wykorzystanie wyników scenariusza PEP2040, zakładającego, że rozwój będzie przebiegał zgodnie z założeniami oraz uwarunkowaniami prawnymi i rynkowymi określonymi w Polityce Energetycznej Polski do 2040 r. Potencjał przyrostu pojemności magazynów w latach 2041-2050 przyjęto identyczny jak w latach 2036-2040.

Tabela 2. Zakładany rozwój pojemności magazynów energii w KSE wg scenariusza PEP2040 [9]

Okres	Przyrosty pojemności [MWh]	
	Magazyny prosumenckie	Magazyny wielkoskalowe
2021-2025	610	2440
2026-2030	990	3960
2031-2035	1510	6040
2036-2040	1290	5160
2041-2050	1290	5160

Wartości pojemności magazynów prosumenckich przypisano bezpośrednio do technologii BESS Li-ion Prosum. W przypadku magazynów wielkoskalowych rozpatrzono dwie technologie: A-CAES oraz BESS LiFePO<sub>4</sub>. Technologii A-CAES przypisano potencjał pojemności 1000 MWh od roku 2031 a następnie pojemności 2000 MWh od roku 2036. Pozostały potencjał odnosi się do technologii BESS LiFePO<sub>4</sub>.

Moc magazynów prosumenckich została skalkulowana przyjmując relację mocy do pojemności magazynu równą 1:2 (praca magazynu z pełną mocą przez max.2 godz.) Do obliczenia potencjału mocy magazynów przemysłowych w technologii LiFePO<sub>4</sub> przyjęto relację 1:2, a magazynów A-CAES w relacji 150:500 (relacja wynikająca z wcześniej rozpoznanych parametrów magazynów w tej technologii). Dodatkowo założono że magazyny przemysłowe i wielkoskalowe mogą powstać dopiero od roku 2026 r.

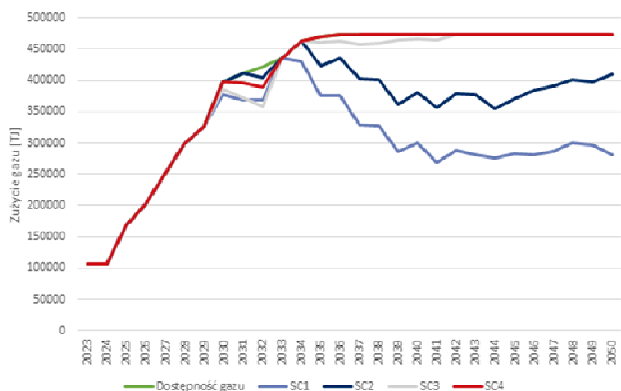
### Wybrane wyniki

Poniżej porównano wybrane wyniki uzyskane dla całego horyzontu obliczeń do 2050 roku (bez rozbicia na poszczególne lata) co pozwala ocenić wpływ przyjętych parametrów w poszczególnych scenariuszach.

Jednym z analizowanych parametrów była ocena wykorzystania gazu ziemnego do produkcji energii elektrycznej w poszczególnych scenariuszach. Uzyskane wyniki w tym zakresie przedstawiono na rysunku 1.

Do roku 2029 r. w każdym z analizowanych scenariuszy jednostki gazowe wykorzystują cały dostępny założony wolumen gazu ziemnego. Po roku 2029 w scenariuszach z elektrownią jądrową, niezależnie od poziomu

zapotrzebowania, wykorzystanie gazu jest znacznie poniżej dopuszczalnego limitu. W przypadku braku technologii jądrowej w systemie wykorzystywany jest cały dostępny wolumen gazu ziemnego (przy czym w scenariuszu SC3 z bazowym poziomem zapotrzebowania pozostaje w latach 2030-2032 oraz 2035-2041 niewielki zapas paliwa do ewentualnego wykorzystania).

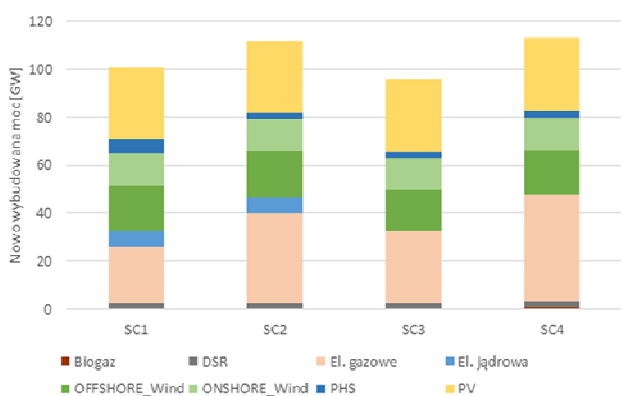


Rys. 1. Dostępność i zużycie gazu ziemnego

W tabeli 3 oraz na rysunku 2 przedstawiono nowo wybudowane moce w poszczególnych technologiach w rozpatrywanych scenariuszach.

Tabela 3. Wolumen nowych mocy wytwórczych [MW] w poszczególnych scenariuszach na koniec okresu analizy

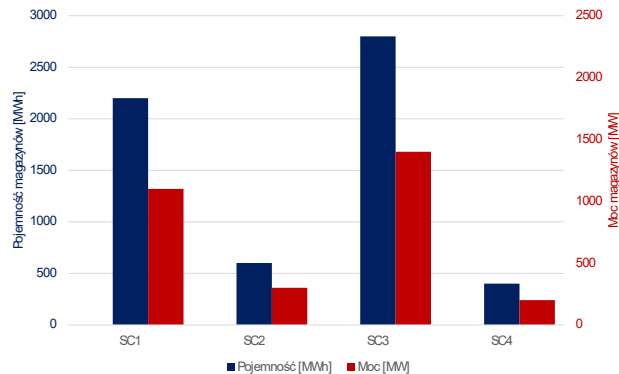
Technologia	SC1	SC2	SC3	SC4
Biogaz	0,0	10,5	0,0	930,0
DSR	2 500,0	2 500,0	2 500,0	2 500,0
El. gazowe	23 621,4	37 552,2	30 392,2	44 671,4
El. jądrowa	6 600,0	6 600,0	0,0	0,0
OFFSHORE_Wind	19 032,5	19 232,5	16 732,5	18 032,5
ONSHORE_Wind	13 400,0	13 400,0	13 400,0	13 400,0
PHS	5 407,6	2 490,0	2 490,0	3 490,0
PV	30 200,0	30 200,0	30 200,0	30 200,0
SUMA	100 761,5	111 985,2	95 714,7	113 223,9



Rys. 2. Struktura nowych mocy wytwórczych w scenariuszach

Wolumen nowych mocy wytwórczych w scenariuszach z niskim zapotrzebowaniem (SC1, SC3) jest niższy niż w scenariuszach z wysokim zapotrzebowaniem, a w scenariuszach bez elektrowni jądrowej występują nowe moce w elektrowniach gazowych. Jednostki biogazowe powstają wyłącznie w scenariuszach z wysokim zapotrzebowaniem, przy czym w SC2 moc wybudowanych

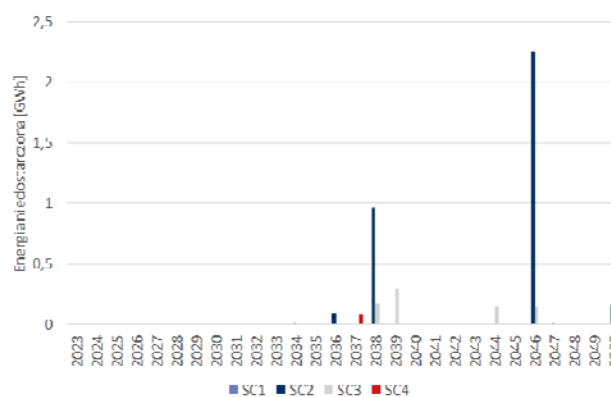
jednostek jest znikoma i wynosi tylko 10,5 MW. W SC4 wolumen ten jest większy i wynosi 930 MW. Niezależnie od scenariusza źródła fotowoltaiczne oraz wiatrowe na lądzie zostały wykorzystane w całym dopuszczalnym zakresie wynikającym z oszacowanego potencjału tych technologii. Na tle nowo wybudowanych mocy w źródłach wytwórczych interesującym aspektem jest wolumen budowanych magazynów. Na rysunku 3 przedstawiono moc i pojemność wybudowanych magazynów na koniec okresu analizy.



Rys. 3. Wybudowane magazyny z wyróżnieniem mocy i pojemności

Zasadniczo jedyną technologią, która została wybrana w wyniku optymalizacji kosztowej była technologia BESS LiFePO4. Znikomy wolumen technologii prosumenckich BESS Li-on Prosum pojawił się w SC2, gdzie wybudowało się 1,06 MW tych baterii (nie widoczne na rysunku 3 ze względu na skalę). W żadnym ze scenariuszy nie wybudował się magazyn w technologii A-CAES. Największe sumaryczne potrzeby w zakresie magazynów zostały zidentyfikowane w SC3 gdzie pojawia się łącznie 1400 MW mocy w magazynach (przy pojemności rzędu 2,8 GWh). Warty odnotowania jest fakt, że większy dobrany potencjał elektrowni gazowych przy wysokim zapotrzebowaniu ogranicza budowę magazynów energii..

Odpowiadając na pytanie czy w wyniku doboru nowych mocy wytwórczych oraz magazynów energii w systemie stwierdzono występowanie energii niedostarczonej opracowano rysunek 4, gdzie przedstawiono ilość tejże energii w poszczególnych latach oraz scenariuszach.

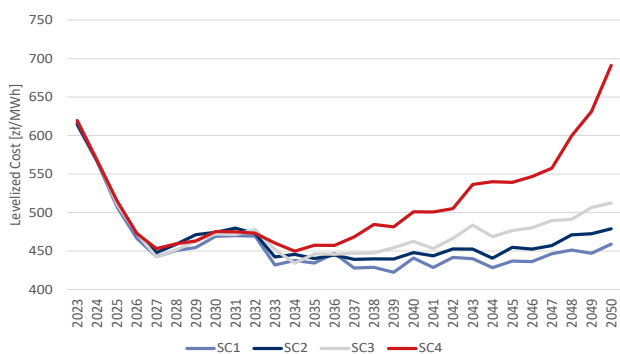


Rys. 4. Energia niedostarczona w scenariuszach

W horyzoncie do 2033 r. w żadnym ze scenariuszy nie stwierdzono energii niedostarczonej. W przypadku scenariusza SC1 taka sytuacja dotyczy całego rozpatrywanego horyzontu. Największa sumarycznie energia niedostarczona występuje w scenariuszu SC2, w którym stwierdzono prawie 3,5 GWh energii

niedostarczonej. Negatywnie pod tym względem wyróżnił się rok 2046 r. na którego przypadło prawie 65% wolumenu energii niedostarczonej. Niemniej jednak w skali rocznej odpowiada to niepokryciu poniżej 1% zapotrzebowania.

Aby ocenić jak optymalny wolumen dobranych nowych mocy wytwórczych oraz magazynów energii przełożył się na średni koszt energii elektrycznej wyznaczono wielkość Levelized Cost. Zgodnie z definicją koszt ten jest obliczany jako roczny stosunek kosztów całkowitych systemu do całkowitej generacji energii w systemie. Z kolei całkowite koszty systemu obejmują koszty generacji (stałe, zmienne, zannualizowane koszty budowy) oraz koszty emisji. Tak oszacowany Levelized Cost przedstawia rysunek 5.



Rys.5. Roczny koszt średni (Levelized Cost) w scenariuszach

W horyzoncie do 2032 r. średni koszt energii był zbliżony w każdym z rozpatrywanych scenariuszy. W kolejnych latach można zauważyć, iż na skutek braku budowy elektrowni jądrowej średni koszt energii jest większy w scenariuszach SC3 i SC4, co wyraźniej jeszcze można zaobserwować w scenariuszu z wysokim zapotrzebowaniem (scenariusz SC4) w końcowych latach analizy, gdzie średni koszt energii zbliża się do poziomu ok. 700 zł/MWh.

Przeliczono również udział kosztu magazynów energii (stałych, zmiennych oraz zannualizowanych kosztów budowy) w średnim koszcie systemowym. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że występująca różnica jest niewielka. Jest to efektem dużo niższych kosztów magazynów względem kosztów generacji w KSE. Skalę powstającej różnicy można zaobserwować porównując koszty uśrednione dla całego rozpatrywanego horyzontu. W tabeli 4 zestawiono uśrednione roczne koszty systemowe w całym horyzoncie bez oraz z uwzględnieniem kosztów magazynów.

Tabela 4. Uśrednione roczne koszty systemowe [zł/MWh] bez i z uwzględnieniem kosztów magazynów energii w okresie analizy

Scenariusz	Koszty systemu bez uwzględnienia magazynów	Koszty systemu z uwzględnieniem magazynów
SC1	456,98	457,04
SC2	467,47	467,50
SC3	477,44	477,47
SC4	513,63	513,68

Budowa i działanie magazynów w rozpatrywanych przypadkach prowadzi do wzrostu średnich kosztów energii zaledwie o kilka groszy w stosunku do średnich kosztów bez uwzględniania kosztów magazynów, co wynika z niewielkiej skali ich rozwoju w relacji do mocy źródeł wytwórczych.

#### Wnioski i podsumowanie

W świetle uzyskanych wyników można wyraźnie zaobserwować, iż transformacja energetyki nie może być

się bez źródeł sterowalnych o stabilnej generacji. W głównej mierze w analizowanym systemie produkcję przejmują elektrownie gazowe (oraz elektrownia jądrowa w scenariuszach SC1 i SC2). Elektrownie gazowe w scenariuszach z wysokim zapotrzebowaniem (scenariusze SC2 i SC4) w pełni wykorzystują dostępny potencjał paliwa jakim jest gaz ziemny. Wynika z tego, że ograniczenie dostępności paliwa gazowego prowadzi do braku pokrycia możliwości zbilansowania systemu i wystąpienia energii niedostarczonej.

W zakresie magazynów energii elektrycznej wiodącą rolę pełnią magazyny średnioskalowe w technologii BESS LiFePO<sub>4</sub>, które zostały wybudowane w każdym scenariuszu. Pozostałe technologie zaczynają odgrywać zauważalną rolę w przypadkach szczególnych, takich jak brak elektrowni jądrowej bądź ograniczenie dostępności gazu. Warto zaznaczyć, iż magazyny energii nie mogą być traktowane na równi z nowymi mocami wytwórczymi, bowiem nie wytwarzają energii elektrycznej, a służą jedynie do jej przechowywania i przesunięcia jej zużycia na bardziej dogodny okresy z punktu widzenia systemu elektroenergetycznego lub rynku (wyższe ceny).

Przeprowadzone analizy wpisują się w program badania nad transformacją energetyczną KSE w Polsce. Przedstawione wyniki mają charakter wstępny i zostały uzyskane z wykorzystaniem zaawansowanego modelu do optymalizacji miksu energetycznego. Modele tej klasy nie są jednak w stanie odwzorować w pełni poprawnie współpracy źródeł OZE z magazynami i źródłami konwencjonalnymi. Z tego powodu obecnie trwają prace nad rozwinięciem metodyki badawczej o zagadnienia szczegółowej weryfikacji bilansowania KSE z wysokim udziałem źródeł OZE i wykorzystaniem magazynów energii.

**Autorzy:** dr hab. inż. Maksymilian Przygrodzki, PSE Innowacje Sp z o.o., E-mail: [maksymilian.przygrodzki@pse.pl](mailto:maksymilian.przygrodzki@pse.pl); mgr inż. Rafał Gwóźdź, PSE Innowacje Sp. z o.o., E-mail: [rafał.gwozdź@pse.pl](mailto:rafał.gwozdź@pse.pl); dr inż. Bolesław Jankowski, NCAE, PSE S.A., E-mail: [bolesław.jankowski@pse.pl](mailto:bolesław.jankowski@pse.pl).

#### LITERATURA

- [1] Electricity Storage Technology Review, Prepared for US Department of Energy Office of Fossil Energy, June 2020
- [2] Emrani A., Berrada A., Bakhouya M., Modeling and Performance Evaluation of the Dynamic Behavior of Gravity, Energy Storage with a Wire Rope Hoisting System, *Journal of Energy Storage*, 33 (2021) 102154
- [3] Przygrodzki M., Gwóźdź R., Czapaj R., Modelowanie i adekwatność magazynów energii elektrycznej w badaniach systemowych, Aktualne problemy pracy systemów elektroenergetycznych, monografia pod red. Ryszarda Zajczyka, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2023
- [4] Farah S., Andresen G. B., Investment-based optimisation of energy storage design parameters in a grid-connected hybrid renewable energy system, *Applied Energy*, Volume 355, 1 February 2024
- [5] Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na energię elektryczną na lata 2023-2032, PSE S.A., Listopad 2022
- [6] European Resource Adequacy Assessment, 2023 Edition, <https://www.entsoe.eu/outlooks/eraa/2023/>
- [7] Krajowy dziesięcioletni plan rozwoju systemu przesyłowego. Plan rozwoju w zakresie zaspokojenia obecnego i przyszłego zapotrzebowania na paliwa gazowe na lata 2022-2031, GAZ – SYSTEM S.A., Warszawa, Październik 2021
- [8] Kopec S., Lach Ł., Adamska B., Wrocławski M., Szczeciński P., Wpływ rozbudowy infrastruktury magazynów energii na rozwój gospodarczy w Polsce - prognoza do 2040 r., PSME, *Analizy AGH* 2/2022
- [9] Polityka energetyczna Polski do 2040 r., <https://www.gov.pl/web/klimat/polityka-energetyczna-polsk>