

Nowoczesne Systemy Zarządzania
Zeszyt 19 (2024), nr 1 (styczeń-marzec)
ISSN 1896-9380, s. 55-74
DOI: 10.37055/nasz/192814

Modern Management Systems
Volume 19 (2024), No. 1 (January-March)
ISSN 1896-9380, pp. 55-74
DOI: 10.37055/nasz/192814



Instytut Organizacji i Zarządzania
Wydział Bezpieczeństwa, Logistyki i Zarządzania
Wojskowa Akademia Techniczna
w Warszawie

Institute of Organization and Management
Faculty of Security, Logistics and Management
Military University of Technology
in Warsaw

Odporność systemu dostaw energii na przykładzie systemu ciepłowniczego

The resilience of the energy supply system in the example of the heating system

Grzegorz Kunikowski

Politechnika Warszawska
Grzegorz.Kunikowski@pw.edu.pl; ORCID: 0000-0002-3660-7117

Abstrakt. Obecne trendy sektora energetycznego wiążą się z transformacją energetyczną, udziałem odnawialnych źródeł energii, efektywnością energetyczną, bezpieczeństwem, stabilnością i ciągłością dostaw. Wskutek wydarzeń ostatnich lat znaczenia nabrała odporność, czyli zdolność opierania się zakłóceniom. Celem artykułu jest próba sformułowania założeń odpornego systemu energetycznego oraz ilustracja podejścia na przykładzie systemu ciepłowniczego. W zaproponowanym podejściu odporność jest ujęta w trzech wymiarach: strukturalnym, dywersyfikacji oraz redundancji. W planowaniu strategicznym wówczas, gdy należy podejmować decyzje o dalekosiężnych skutkach, wykonywane są pogłębione analizy scenariuszy rozwoju odzwierciedlające prognozowane trendy i zagrożenia. W części badawczej artykułu przedstawiono wyniki scenariuszy symulacyjnych dla lat 2020-2050, modelowanych z wykorzystaniem systemu OSeMOSYS. Otrzymane wyniki pozwoliły na porównanie zmian technologii, emisji CO₂ oraz wysokości nakładów inwestycyjnych analizowanego systemu ciepłowniczego. Uzasadnieniem podjęcia badań metodą modelowania są korzyści, które wynikają z prac analitycznych. Z natury nie są one kosztowne, umożliwiając definiowanie szerokiego zakresu badań i interpretacji wyników. Proponowane założenia odpornego systemu energetycznego mogą być przydatne do stosowania w analitycznych badaniach sektora i przedsiębiorstw. Przyjęto, że uwzględnia ona trzy wymiary: strukturalny – technologiczno-organizacyjny; dywersyfikacyjny – dotyczy różnicowania dostaw paliw i wykorzystywanych technologii; redundantny – utrzymywania rezerw paliw i techniki.

Słowa kluczowe: modelowanie systemów energetycznych, odporność systemu energetycznego, OSeMOSYS, bezpieczeństwo energetyczne, zarządzanie strategiczne

Abstract. Current trends in the energy sector are related to energy transformation, the share of renewable energy sources, energy efficiency, security and continuity of supply. As a result of the events of recent years, resilience, i.e. the ability to resist disruptions, has become more critical. The article aims to attempt to formulate the assumptions of a resilient energy system and to illustrate the approach of the

example of the heating system. The proposed approach presents resilience in three dimensions: structural, diversification and redundancy. In strategic planning, when decisions with long-term effects need to be made, in-depth analyses of development scenarios are performed, reflecting forecasted trends and threats. The research part of the article presents the results of simulation scenarios for the years 2020-2050, modelled using the OSeMOSYS system. The results allowed for comparison of changes in technology, CO₂ emissions, and the investment outlays of the analysed heating system. The justification for undertaking research using the modelling method is the benefits of analytical work. By nature, they are not expensive and enable the definition of a wide range of tests and interpretation of results. The proposed framework of assumptions of a resilient energy system may be helpful for analytical studies of the sector and enterprises. It was assumed that it considers three dimensions: structural – technological and organizational; diversification – which concerns the diversification of fuel supplies and technologies used; redundancy – which involves fuel and technology reserves.

Keywords: energy system modelling, energy system resilience, OSeMOSYS, energy security, strategic management

Wprowadzenie

Przedmiotem przedstawionych w artykule badań jest próba zdefiniowania cech odpornego systemu energetycznego oraz techniczno-ekonomicznej oceny odporności przykładowego systemu energetycznego za pomocą metody o nazwie modelowanie systemu energetycznego. W literaturze przedmiotu i statystyce (GUS, 2022) używa się określenia „system paliwowo-energetyczny”, w artykule zaś będzie używane wyrażenie „system energetyczny”, w którym paliwa stanowią jego integralną część. Celem opracowania jest próba sformułowania założeń definicji odporności systemu energetycznego oraz prezentacja sformułowanych założeń na przykładzie systemu ciepłowniczego. Uzasadnieniem podjęcia badań metodą modelowania są korzyści, które wynikają z prac analitycznych. Z natury nie są kosztowne, umożliwiają definiowanie szerokiego zakresu badań i interpretacji wyników. Proponowane założenia odpornego systemu energetycznego mogą być przydatne do stosowania w analitycznych badaniach sektora i przedsiębiorstw. Przyjęto, że uwzględnia się trzy wymiary:

- strukturalny – technologiczno-organizacyjny;
- dywersyfikacyjny – dotyczy zróżnicowania dostaw paliw i wykorzystywanych technologii;
- redundantny – utrzymywania rezerw paliw i techniki.

Sformułowana definicja odporności zostanie przedstawiona za pomocą analizy systemu ciepłowni z wykorzystaniem modelu OSeMOSYS w latach 2020-2050. W pierwszej kolejności zostanie zdefiniowany model systemu ciepłowni. Na potrzeby modelowanego systemu zostanie opracowany model referencyjny, czyli modelowy system dla lat 2020-2050, wyznaczony jako optymalny pod względem kosztów. Uwzględnione będą koszty eksploatacyjne, w tym paliw, oraz nakłady inwestycyjne związane z odtwarzaniem mocy wytwórczych lub zmianą technologii. Następnie zostaną opracowane założenia dla scenariuszy: referencyjnego, zeroemisyjnego i odpornościowego.

1. Podejście do odporności w literaturze przedmiotu

System energetyczny rozpatrywany jest w ujęciach systemowym i rodzajowym. W ujęciu systemowym model składa się z: technologii, obiektów, dóbr, procesów, informacji oraz zasobów (Suwała, 2009). Wymienione elementy tworzą system opisany za pomocą parametrów, które można pogrupować na kategorie: technologiczną, ekonomiczną i środowiskową. Z kolei w ujęciu rodzajowym używanych jest kilka klasyfikacji. Na przykład według kryterium rodzaju energii końcowej dostarczanej odbiorcy wyróżnia się systemy: elektroenergetyczne, ciepłownicze, przemysł paliw ciekłych. Systemy energetyczne podlegają poważnym i złożonym zmianom, które są określane ogólnym mianem transformacji energetycznej. Problematyka transformacji polskiego systemu jest opisywana w literaturze przedmiotu w wymiarze przekrojowym (Filipiak, Mielczarski, 2023; Kucharska, 2021) i branżowym (Paska, 2023). Przygotowywane są także sektorowe strategie, np. dla ciepłownictwa (MKiŚ, 2022a; MKiŚ, 2022b), rozwoju wodoru (MKiŚ, 2021b). Warto zauważyć, że „sprawiedliwa transformacja energetyczna” została ujęta w Polityce Energetycznej Polski do 2040 roku (PEP 2040) jako jeden z trzech filarów polityki. Dwa pozostałe filary to „zeroemisyjny system energetyczny” i „dobra jakość powietrza” (MKiŚ, 2021a). W deklarowanym zakresie aktualizacji mowa jest o suwerenności energetycznej, rozumianej jako „zapewnienie szybkiego uniezależnienia krajowej gospodarki od importowanych paliw kopalnych (węgiel, ropa naftowa i gaz ziemny) oraz pochodnych (LPG, olej napędowy, benzyna, nafta) z Rosji oraz innych krajów objętych sankcjami gospodarczymi. Chodzi o dywersyfikację dostaw, inwestycje w moce produkcyjne, infrastrukturę liniową i magazynowanie oraz w alternatywne paliwa” (gov.pl, 2023). W kontekście ciepłownictwa w założeniach przywołanej PEP 2040 jako jeden z celów przyjęto czterokrotny wzrost liczby efektywnych systemów ciepłowniczych do 2030 roku. Poza transformacją wskutek wydarzeń ostatnich lat znaczenia nabrała odporność, czyli zdolność opierania się zakłóceniom fizycznym i ekonomicznym. Obecny wzrost niepewności i potencjalnych kosztów społecznych zakłóceń w systemach energetycznych sprawia, że odporność jest jednym z głównych czynników branych pod uwagę w przypadku projektowania i działania systemów energetycznych (Jasiūnas, Lund, Mikkola, 2021, s. 14). Zagrożenia systemów energetycznych są zróżnicowane pod względem rodzajowym i z uwagi na rozmiar potencjalnych skutków. W literaturze przedmiotu wyróżnia się pod względem rodzajowym zagrożenia: awarii technicznych inicjujących efekt kaskadowy, ekstremalnych zjawisk pogodowych, intencjonalnych ataków fizycznych i cybernetycznych. W skali świata mamy zjawiska, takie jak burze słoneczne (Gholami, Shekari, Amirioun et al., 2018, s. 32038–32039), zagrożenia geopolityczne, a w wybranych regionach świata zagrożenia wynikające ze zmian klimatycznych (Jasiūnas, Lund, Mikkola, 2021, s. 2). Zagrożenia z uwagi na skutki mogą być pomijalne wówczas, gdy system działa bez spadku wydajności. W sytuacji poważnych skutków mogą one zagrażać społeczeństwu, a ich odbudowa trwa latami (Jasiūnas, Lund, Mikkola, 2021, s. 14).

Istotnym czynnikiem w budowaniu odporności jest zatem identyfikacja i ocena zagrożeń, a następnie przygotowanie się na ich materializację. Należy dodać, że istotnym wyzwaniem jest odporność systemów energetycznych w sferze informatycznej. W prezentowanym ujęciu cyberbezpieczeństwo jest rozważane w ograniczonym zakresie, co nie wynika z umniejszenia tego zagrożenia. Wręcz przeciwnie, cyberbezpieczeństwo z uwagi na specyfikę i istotność wymaga odrębnych badań.

Odporność systemów energetycznych zapewnia stabilność dostaw paliw i energii, co ma fundamentalne znaczenie dla społeczeństwa i gospodarki. Odporność dotyczy zdolności do przeciwdziałania zakłóceniom wskutek technicznych awarii, zjawisk pogodowych, katastrof oraz celowym działaniom, np. atakom cybernetycznym. Odporność uzyskuje się przez zapewnienie możliwości adaptacji do zakłóceń oraz możliwości dostosowania się do zmieniających się warunków. W kontekście transformacji energetycznej i rosnącego udziału niesterowalnych źródeł pogodowo zależnych wzrasta odporność w wymiarze dywersyfikacji i decentralizacji, ale powoduje inne ryzyka. Zarządzanie ryzykiem, które dotyczy m.in. identyfikacji, oceny, definiowania planów działania i monitorowania ryzyka, wnosi wkład w projektowanie i utrzymywanie odporności.

Wyróżnia się wiele podejść do pomiaru odporności systemów energetycznych. Z uwagi na cel artykułu należy przywołać pomiary odporności z wykorzystaniem modeli matematycznych i symulacji. Jedną z metod jest stosowanie krzywej odporności, która pozwala oceniać zmiany wydajności systemu podczas zakłócenia (Jasiūnas, Lund, Mikkola, 2021). Na potrzeby pomiaru odporności definiowane są przeznaczone specjalnie do tego współczynniki (metryki) (Gholami, Shekari, Amirioun, 2018). Wskaźniki do pomiaru odporności dotyczą wielowymiarowych ocen, na które składają się wskaźniki dotyczące ciągłości dostaw energii końcowej, takie jak SAIDI¹, SAFI², oraz wskaźniki pomiaru dywersyfikacji, np. indeks HHI³, i zmodyfikowane wskaźniki związane z koncentracją (Kunikowski, 2019).

W polskim ustawodawstwie w zakresie zarządzania kryzysowego i ochrony infrastruktury krytycznej nie jest uwzględniana odporność z wyjątkiem Narodowego Programu Ochrony Infrastruktury Krytycznej (RCB, 2023). Odporność była brana pod uwagę w ustawodawstwie dotyczącym cyberbezpieczeństwa. Zagadnienie odporności jest przedmiotem unijnych regulacji. Dyrektywa w sprawie odporności podmiotów krytycznych definiuje odporność jako „zdolność podmiotu krytycznego do zapobiegania incydentowi, ochrony przed nim, odpowiedzi na niego, stawiania mu oporu, łagodzenia i absorbowania incydentu oraz adaptacji i odtworzenia po incydencie” (UE, 2022). Dokument szczegółowo opisuje ramy i elementy służące budowie oraz zwiększaniu odporności podmiotów krytycznych (Wróbel, 2022, s. 169).

¹ Wskaźnik przeciętnego systemowego czasu trwania przerw długich.

² Wskaźnik przeciętnej systemowej częstości przerw długich.

³ Indeks Koncentracji Herfindahla-Hirschmana.

Koncepcja odporności jest stosowana w wielu dziedzinach. Znaczenie ma także wiedza o zagrożeniach wynikająca z różnych badań bezpieczeństwa energetycznego i niezawodności (Jasiūnas, Lund, Mikkola, 2021, s. 14). Cechą odpornego systemu jest jego elastyczność, rozumiana jako zdolność do absorbowania zakłóceń bez załamania oraz zdolność do odbudowy (Jasiūna, Lund, Mikkola, 2021, s. 14). Dla odporności systemu w skali mikro zostało opracowane podejście nazwane „wielofazowym trapezoidem odporności” (ang. *multi-phase resilience trapezoid*), które składa się z metryk (indeksów) i uwzględnia dynamikę przebiegu zakłócenia. Wyodrębnione są trzy fazy zakłócenia, tj. faza rozwijania się zakłócenia, zakłócenie, odtworzenie (Panteli, Mancarella, Trakas et al., 2017). Model jest rozwinięciem ramowego podejścia R4, stosowanego w przypadku infrastruktury krytycznej, na które składają się cztery wskaźniki: solidność (ang. *robustness*), redundancja (ang. *redundancy*), sprawność (ang. *resourcefulness*) i szybkość (ang. *rapidity*) (Tierney, Bruneau, 2007). Bilal M. Ayyub zaproponował systemową definicję odporności ukierunkowaną na zagrożenia środowiskowe, która uwzględnia wskaźniki (Ayyub, 2014). W przeglądzie teorii odporności adaptowalnych dla systemu energetycznego uwzględnia ona podatność systemów (ang. *vulnerability*) (Jesse, Heinrichs, Kuckshinrichs, 2019). Pojęcia bezpieczeństwa i odporności systemu energetycznego stosowane są zamiennie lub rozłącznie, co wynika z szerokich definicji obu koncepcji. Bernhard-Johannes Jesse, Heidi U. Heinrichs i Wilhelm Kuckshinrichs używają tych terminów zamiennie, dowodząc na podstawie przeglądu definicji, że koncepcja odporności w odróżnieniu od bezpieczeństwa odnosi się do zdarzeń ekstremalnych, nieoczekiwanych i nieznanych oraz na możliwości reagowania (Jesse, Heinrichs, Kuckshinrichs, 2019). Można zatem przyjąć, że bezpieczeństwo systemu energetycznego dotyczy zapobiegania, utrzymania ciągłości i stabilności dostaw. Odporność zaś jest zdolnością do działania w sytuacji zakłóceń oraz odbudowy.

W odniesieniu do użytej metody należy zwrócić uwagę, że modelowanie systemów energetycznych z wykorzystaniem modeli klasy bottom-up jest uznanym podejściem, stosowanym również w Polsce. Jako przykłady można podać modele PRIMES i TIMES-PL (Wyrwa, Szurlej, Gawlik, Suwała, 2015) oraz model MESSSA opracowany na bazie otwartego modelu OSeMOSYS (Tatarewicz, Lewarki, Skwierz et al., 2022; Tatarewicz, Lewarski, Skwierz, 2020).

2. Metoda

W badaniu przeprowadzono analizę studium przypadku przykładowego systemu ciepłowniczego (zob. rys. 1). Przeprowadzone symulacje mają na celu analizę wariantów rozwoju spełniających wymagania środowiskowe oraz zaproponowane kryteria odporności. Dla wybranego przedsiębiorstwa zdefiniowano referencyjny system energetyczny, uwzględniający zapotrzebowanie na ciepło oraz założenia

technologiczne, ekonomiczne i środowiskowe. Następnie, po zdefiniowaniu scenariuszy, przeprowadzono modelowanie systemu w latach 2020-2050. Zastosowano ogólnodostępne narzędzie do modelowania systemów energetycznych Open Source Energy Modeling System (OSeMOSYS).

3. Model OSeMOSYS

OSeMOSYS jest otwartym narzędziem, generatorem modeli służącym do planowania energetycznego. Wykorzystuje algorytm oparty na programowaniu liniowym. Algorytm służy do rozwiązania problemu optymalizacji kosztów inwestycji i dystrybucji energii dostarczanej dla określonych w danym modelu sektorów. OSeMOSYS składa się z bloków funkcjonalności, które reprezentują różne elementy systemu energetycznego, takie jak koszty, magazynowanie, planowanie mocy, bilans energetyczny, ograniczenia i emisje (Groppi, Kumar Pinayur Kannan, Gardumi, Astiaso Garcia, 2023, s. 3). Użytkownik może włączać wybrane moduły do modelowanego systemu. Funkcja celu, która stanowi sumę kosztów ponoszonych w analizowanym czasie, jest minimalizowana, z zachowaniem zdefiniowanych ograniczeń. Szczegółowy opis wykorzystywanych w modelu równań jest dostępny w literaturze przedmiotu (Howells, Rogner, Strachan et al., 2011; KTH-dESA, 2023; Moksnes, Welsh, Gardumi et al., 2015).

W prezentowanych badaniach systemu ciepłowni (zob. rys. 1-2) minimalizowana funkcja celu uwzględnia sumę dyskontowanych kosztów systemu ciepłowniczego w przyjętym okresie modelowania. Na sumę dyskontowanych kosztów składają się koszty inwestycji w nowe moce wytwórcze oraz koszty operacyjne, w tym koszty paliw.

W obliczeniach nie uwzględniano innych dostępnych modułów, takich jak opłaty za emisję oraz wartości rezydualnej instalacji.

Ograniczenia, które zostały wykorzystane w obliczeniach i przy definiowaniu założeń dla scenariuszy, dotyczą:

- bilansowania popytu na ciepło z uwzględnianiem profilu zapotrzebowania;
- dostępności technologii i paliw w modelowanym okresie z uwzględnieniem strat związanych z efektywnością przemian energetycznych oraz strat w przesyle ciepła;
- limitu dopuszczalnych emisji CO₂ odniesionych do paliwa zgodnie ze standardową metodyką obliczania emisji według wsadu i wartości współczynników emisji⁴ (KOBiZE, 2012);
- wymagania utrzymania rezerwowej mocy.

⁴ Wartości współczynników emisji (KOBiZE, 2022).

Warunki ograniczające są zapisywane w postaci równań. Z uwagi na cel i zakres artykułu nie są przytaczane ich zapisy, które są dostępne w literaturze przedmiotu.

W analizowanym systemie ciepłowniczym stosowane są dwie technologie, tj. spalanie węgla i oleju opałowego w kotłach węglowych o łącznej mocy 300 MWt i w kotłach olejowych o mocy 200 MWt (zob. rys. 1). Kocioł olejowy jest rozwiązaniem rezerwowym. Następnie zdefiniowano system referencyjny na lata 2020-2050, w którym mogą być zastosowane również inne technologie energetyczne i paliwa, co przedstawia tabela 1 oraz rysunek 2.

Tabela 1. Technologie energetyczne i paliwa

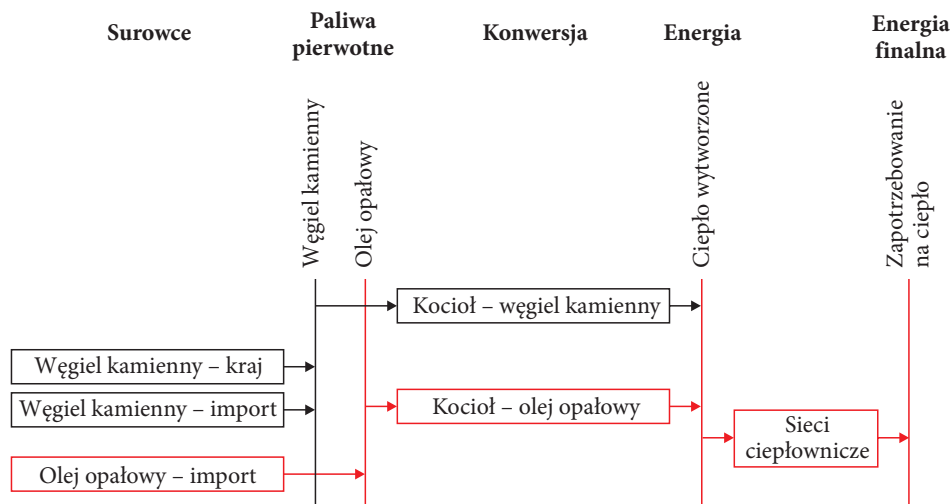
Technologie energetyczne		Paliwa	
Nazwa	Symbol	Nazwa	Symbol
Kocioł węglowy	BLRCOA	Węgiel kamienny z kraju	MINCOA
		Węgiel kamienny importowany	IMPCOA
Kocioł na gaz ziemny	BLRNGS	Gaz ziemny z importu	IMPNGS
Kocioł na olej opałowy	BLROIL	Olej opałowy z importu ⁵	IMPOIL
Kocioł na biomasę	BLRBIO	Biomasa krajowa	MINBIO
		Biomasa z importu	IMPBIO
Kocioł na paliwa odpadowe RDF ⁶	BLRRDF	Krajowe paliwa RDF	MINRDF
Kogeneracja ⁷ – węgiel	CHPCOA	Węgiel kamienny z kraju	MINCOA
		Węgiel kamienny importowany	IMPCOA
Kogeneracja – gaz ziemny	CHPNGS	Gaz ziemny z importu	IMPNGS
Kogeneracja – olej opałowy	CHPOIL	Olej opałowy z importu	IMPOIL
Kogeneracja – biomasa	CHPBIO	Biomasa krajowa	MINBIO
		Biomasa z importu	IMPBIO

Źródło: opracowanie własne

⁵ Import ropy naftowej przetworzonej w kraju.

⁶ RDF – paliwo alternatywne z odpadów (ang. *refuse derived fuel*).

⁷ Kogeneracja – skojarzone (jednoczesne) wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła.



Rys. 1. Zakres analizowanego systemu ciepłowniczego
Źródło: opracowanie własne

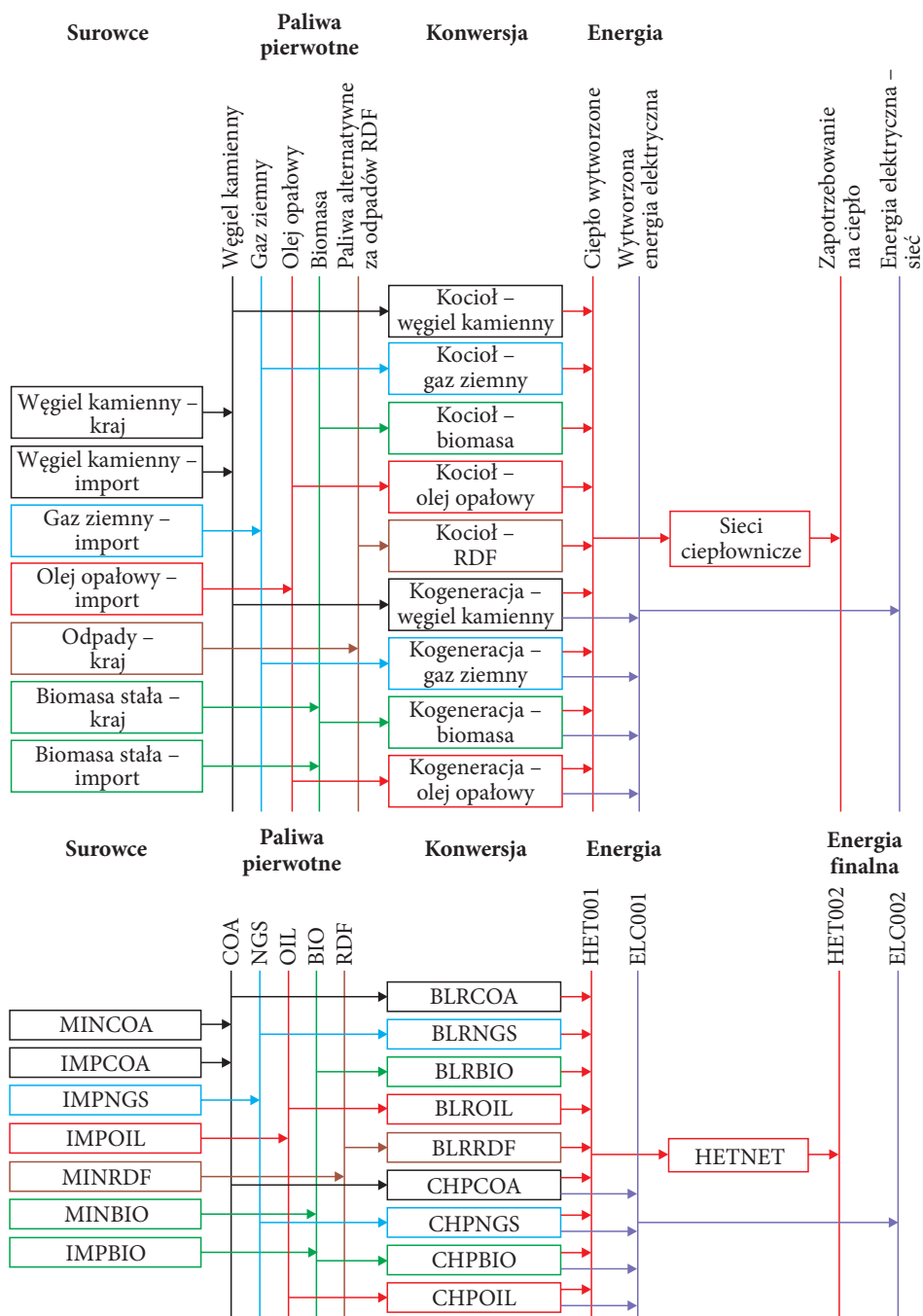
Możliwości stosowania technologii i paliw (zob. tabelę 1) przedstawiają schematy przygotowane w konwencji stosowanej w modelowaniu systemów energetycznych (zob. rys. 2).

W modelowaniu systemów energetycznych przyjmuje się „czasową” rozdzielczość modelu. Z uwagi na złożoność obliczeniową trzeba dokonać kompromisu pomiędzy dokładnością a możliwością wykonania obliczeń. Istotna jest także dostępność danych. W prezentowanych badaniach przyjęto standardową rozdzielczość czasową OSeMOSYS, każdy rok został podzielony na 96 okresów. Uwzględniono cztery pory roku i podział doby na dzień i noc (zob. tabelę 2). Przyjęty do obliczeń profil zapotrzebowania na ciepło w ciągu roku przedstawia rysunek 3.

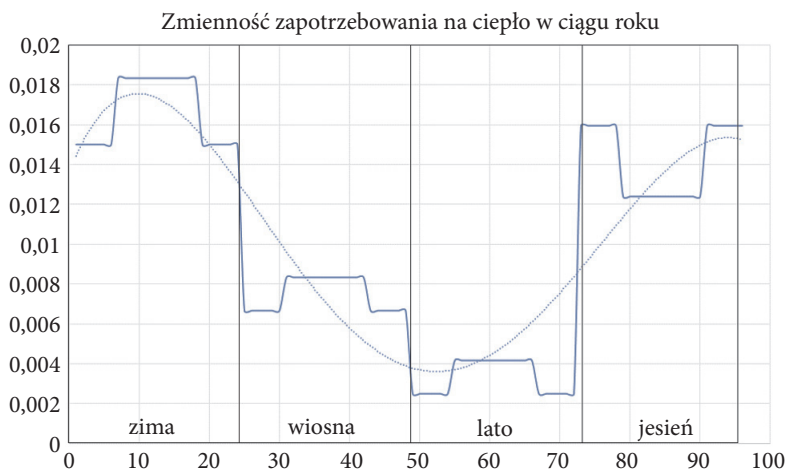
Tabela 2. Przyjęta zmienność zapotrzebowania na ciepło w ciągu roku

Typ i segment dnia	Udział [%]
Zima dzień	22
Zima noc	18
Wiosna dzień	10
Wiosna noc	8
Lato dzień	5
Lato noc	3
Jesień dzień	15
Jesień noc	19

Źródło: opracowanie własne



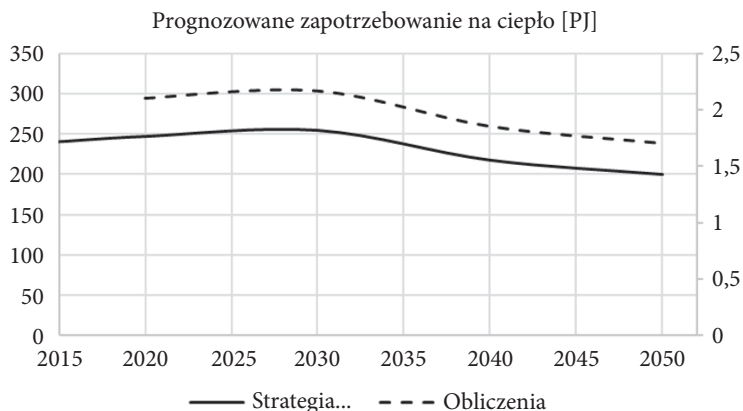
Rys. 2. Referencyjny model analizowanego systemu ciepłowniczego
 Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Profil zapotrzebowania na ciepło

Źródło: opracowanie własne

Przyjęto, że roczne zapotrzebowanie na ciepło w roku bazowym 2020 wynosi 2,1 PJ. W kolejnych latach nieznacznie wzrasta, a następnie do roku 2050 obniża się do poziomu 1,7 PJ (zob. rys. 4). Trend ten został przyjęty na podstawie prognoz przedstawionych w Strategii dla ciepłownictwa do 2030 r. z perspektywą do 2040 r. (MKiŚ, 2022b, 2022a). Całkowite zapotrzebowanie (brutto) uwzględnia sektory o różnej zmienności wykorzystania ciepła (mieszkalnictwo, rolnictwo, przemysł itd.), co odzwierciedla profil zapotrzebowania, będący wypadkową potrzeb w poszczególnych sektorach (zob. tabelę 2). Sektor przemysłowy w odróżnieniu od mieszkalnictwa wykorzystuje ciepło w procesach technologicznych. W rezultacie poza sezonem grzewczym również występuje zapotrzebowanie na ciepło.



Rys. 4. Przyjęty trend zapotrzebowania na ciepło w latach 2020-2050

Źródło: opracowanie własne na podstawie (MKiŚ, 2022a, s. 20)

Dla analizowanych scenariuszy przyjęto następujące założenia:

- straty ciepła w sieciach przesyłowych i dystrybucyjnych na poziomie 10%;
- działające kotły węglowe o łącznej mocy 300 MWt oraz kotły olejowe (rezerwowe) o mocy 200 MWt mogą być eksploatowane maksymalnie do roku 2030. Po tym czasie z powodów technicznych muszą być zastąpione. W zależności od założeń przyjętych w scenariuszach zmiana może nastąpić wcześniej i może wynikać z rachunku ekonomicznego (stosowanie tańszego paliwa) lub ograniczeń środowiskowych (wymóg całkowitego ograniczenia emisji CO₂ może spowodować konieczność zmiany technologii na zero-emisyjną, odnawialną);
- wybranym technologiom energetycznym (zob. tabelę 1) przypisano status technologii odnawialnej. Komentarza wymaga wykorzystanie biomasy. Na podstawie wytycznych KOBiZE przyjęto zerowy wskaźnik emisji CO₂ dla biomasy⁸.

Założenia dla scenariuszy

Głównym celem analizy scenariuszy symulacyjnych w prezentowanym badaniu jest ocena odporności systemu energetycznego. Przyjęty w analizie horyzont czasowy wskazuje na strategiczny charakter prezentowanego podejścia. W celu analizy odporność została scharakteryzowana z wykorzystaniem parametrów odzwierciedlających zaproponowane wymiary odporności: strukturalny, dywersyfikacyjny i redundantny. Wymienione wymiary zostały ujęte w następujący sposób:

- **wymiar strukturalny:** za wymiar odpowiada topologia systemu. Implementacja w modelu jest zrealizowana przez dopuszczenie alternatywnych do dotychczas wykorzystywanych technologii i paliw. W modelu za wymiar ten odpowiada system referencyjny, co widać w porównaniu schematów stanu obecnego (zob. rys. 1) i modelu referencyjnego (zob. rys. 2). Wymiar strukturalny wiąże się z odpornością systemu na zakłócenia ciągłości działania w wymiarze technicznym. Zwiększenie odporności może wynikać z decentralizacji systemu, zastosowania większej liczby instalacji o mniejszych mocach w różnych lokalizacjach i rozbudowy infrastruktury sieci dystrybucyjnych;
- **wymiar dywersyfikacyjny:** wymiar ten można określić zróżnicowanym. Dywersyfikacja ogranicza uzależnienie od pojedynczego dostawcy i tym samym zwiększa odporność na zakłócenia dostaw paliw. W modelu są

⁸ „Emisji CO₂ ze spalania biomasy (drewna opałowego i odpadów pochodzenia drzewnego, odpadów komunalnych biogenicznych i biogazu) nie wlicza się do sumy emisji ze spalania paliw, zgodnie z zasadami ustalonymi w systemie handlu uprawnieniami do emisji. Podejście to jest równoważne ze stosowaniem zerowego wskaźnika emisji dla biomasy” (KOBiZE, 2022, s. 3).

uwzględnione dzięki zastosowaniu ograniczenia maksymalnego udziału dane technologii (parametr TotalAnnualMaxCapacity). Obniżenie dopuszczalnej wartości udziału pojedynczej technologii wymusza dywersyfikację techniki, która powoduje dywersyfikację paliw. Warto dodać, że podobne podejście można zastosować również bezpośrednio do paliw z uwzględnieniem importu i dostępnych krajowych zasobów. W prezentowanych badaniach uwzględniano dywersyfikację technologii;

- **wymiar redundantny (rezerwy):** utrzymywanie rezerw paliw i mocy jest praktyką wynikającą z ustawowych wymagań utrzymania obowiązkowych rezerw paliw oraz ze standardów technicznych utrzymywania rezerwy mocy. W modelowanym systemie wykorzystano dwa parametry: parametr binarny, ReserveMarginTagTechnology – przypisuje technologii status „rezerwowej”; parametr ReserveMargin – wskazuje na minimalną wartość rezerwy, która ma być utrzymywana w zadanym czasie. Podobnie jak w przypadku wymiaru dywersyfikacji, rezerwę można także przypisać do paliw. W prezentowanym badaniu ograniczono się do technologii.

W opisanym wyżej kontekście odporności, biorąc pod uwagę wymagania związane z transformacją energetyczną, zdefiniowane zostały trzy scenariusze. Należy podkreślić, że w scenariuszach celowo wyeksponowano wybrane kryteria. Na przykład całkowite ograniczenie emisji CO₂ jest założeniem hipotetycznym i mało prawdopodobnym. Podejście ma na celu wyeksponowanie różnic pomiędzy scenariuszami i ocenę wielkości nakładów inwestycyjnych, które należy ponieść. Tym samym założenia nie odzwierciedlają realizacji celów polityki energetycznej kraju, a jedynie do nich nawiązują.

Charakterystyka scenariuszy:

- **S0: scenariusz referencyjny:** zakłada prymat kryterium ekonomicznego. Nie są nakładane restrykcje środowiskowe, nie ogranicza się wykorzystywanych technologii. Ciepło ma być dostarczane z wykorzystaniem rozwiązań technologicznych i paliw, które są najbardziej efektywne kosztowo. Scenariusz ma charakter utrzymania stanu aktualnego, nie są uwzględniane założenia polityki energetycznej PEP 2040 i transformacji energetycznej;
- **S1: scenariusz środowiskowy (intensywnej transformacji):** zakłada, że od roku 2040 emisja CO₂ ma być całkowicie wyeliminowana. Scenariusz odzwierciedla intensyfikację polityki klimatycznej przez drastyczne ograniczenie dopuszczalnej emisji CO₂;
- **S2: scenariusz odpornościowy:** zakłada konieczność zróżnicowania technologii od 2040 r. Zróżnicowanie technologii wiąże się z mniejszą mocą kotłów ciepłowniczych, co w efekcie podwyższa jednostkowe nakłady inwestycyjne.

Tabela 3 przedstawia zestawienie parametrów dla założeń poszczególnych scenariuszy.

Tabela 3. Zestawienie parametrów dla analizowanych scenariuszy

Wymiar odporności	Opis/Parametr	2020	S0: referencyjny	S1: środowiskowy	S2: odpornościowy
Strukturalny	Liczba technologii	2	9	9	9
	Paliwa	2	5	5	5
Dywersyfikacyjny	TotalAnnual-MaxCapacity	-	-	-	0,02*
Redundantny	ReserveMargin	-	-	-	150%**
	CapitalInvestment	-	-	-	+50%
Środowisko	Annual-EmissionLimit	-	-	0***	-

* od roku 2031 (wartość wyrażona w GWt)

** od roku 2025

*** od roku 2045

Źródło: opracowanie własne

W przygotowaniu danych do obliczeń⁹ korzystano z ogólnodostępnych danych statystycznych, krajowych strategicznych dokumentów sektora paliwowo-energetycznego i sektora ciepłownictwa (MKiŚ, 2022a; MKiŚ, 2022b; PTEZ, 2019; IGCP, 2020). Przyjęte do obliczeń wartości parametrów oraz wyniki są udostępnione na platformie ZENODO¹⁰.

4. Wyniki

W analizie wyników poszczególnych scenariuszy porównano dla lat 2020-2050 trzy wielkości:

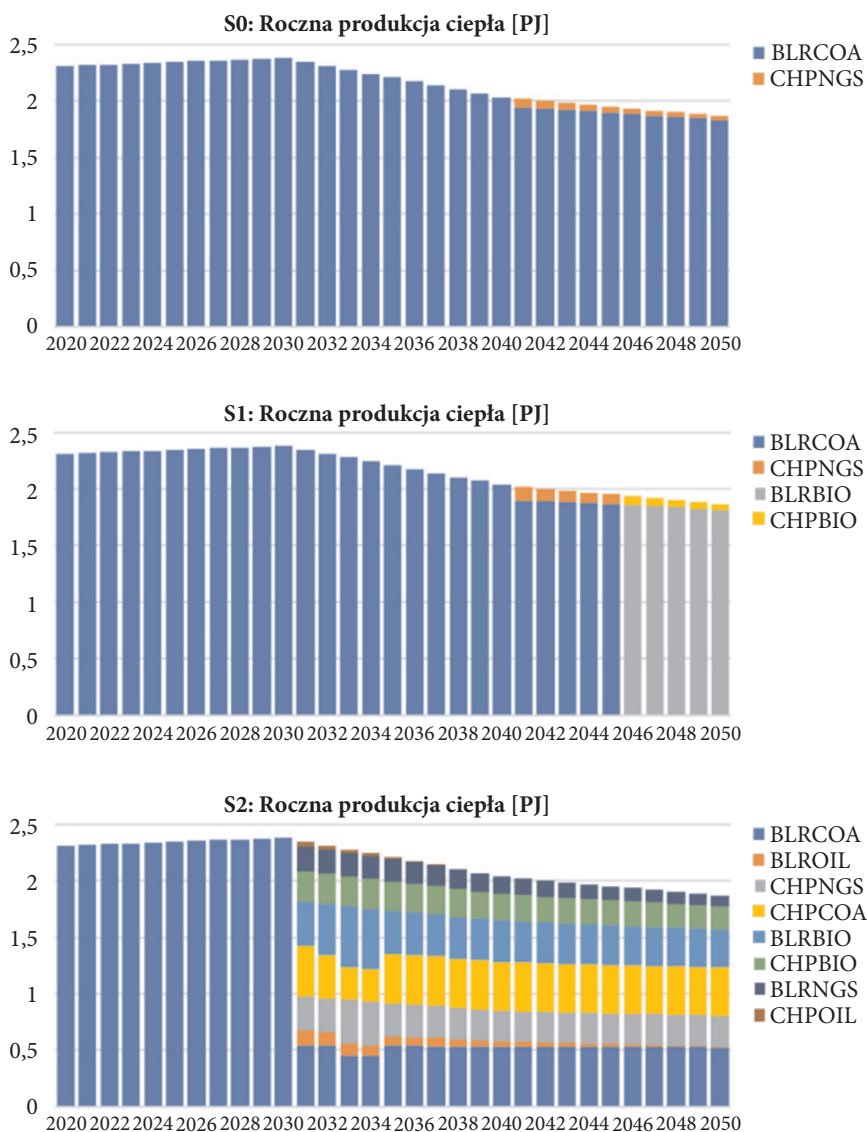
- roczną produkcję ciepła według technologii (zob. rys. 5);
- roczną emisję CO₂ według technologii (zob. rys. 6);
- ponoszone nakłady inwestycyjne (zob. tabelę 4).

We wszystkich scenariuszach największy udział w strukturze paliw ma węgiel. Wynika to z posiadanej infrastruktury wytwórczej (zob. rys. 1). Wymagania, wyrażone w modelu warunkami ograniczającymi, wymuszają zmiany technologii. W scenariuszu środowiskowym (S1) przez ograniczenie emisji wymuszona jest zmiana paliwa, a w rezultacie technologie wytwarzania. Węgiel i gaz ziemny są zastępowane biomasą. Należy wspomnieć o kontrowersjach, które są związane z tym paliwem. Wątpliwości budzi import i niekorzystny efekt środowiskowy, wynikający z importu i przewożenia surowca na duże odległości oraz z przejmowania wartościowego

⁹ Na przykład jednostkowych nakładów inwestycyjnych, kosztów operacyjnych, prognoz cen paliw, wskaźników emisji CO₂.

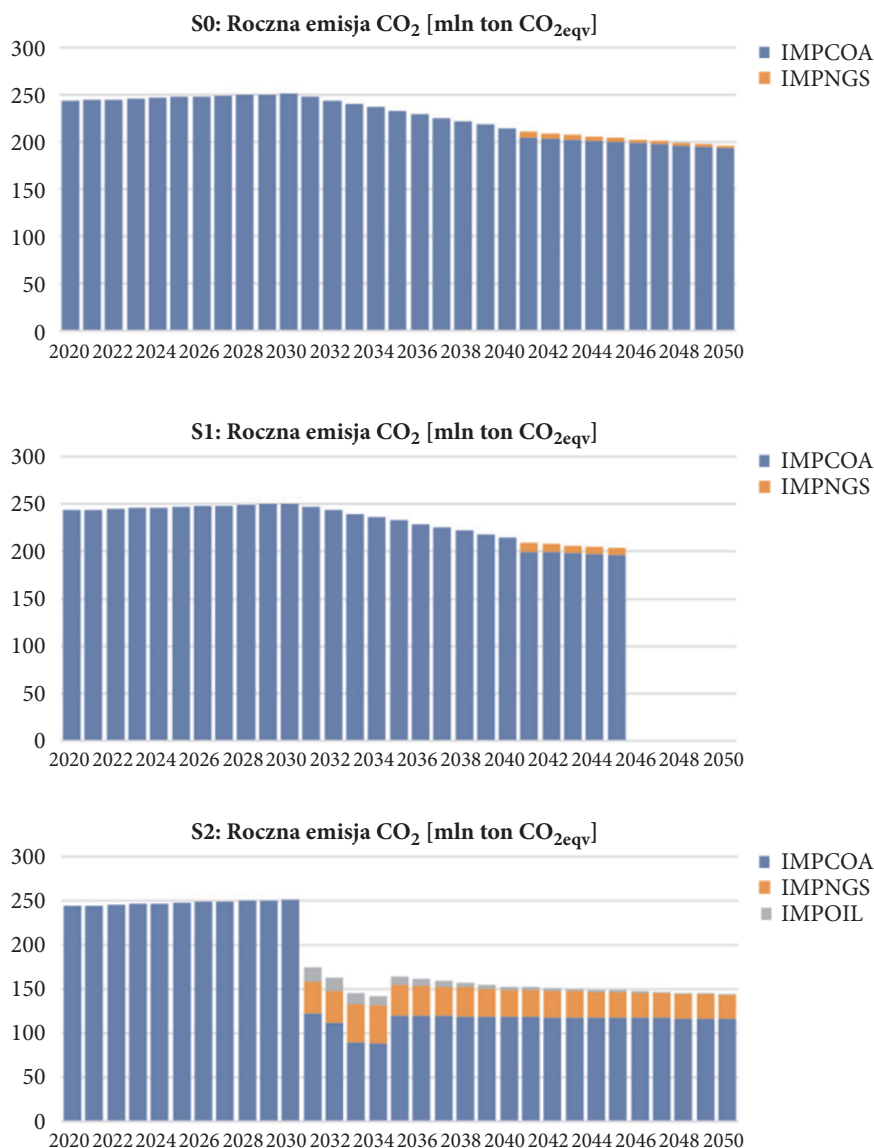
¹⁰ Szczegółowe wyniki są dostępne na platformie ZENODO (DOI: 10.5281/zenodo.10460014).

surowca drzewnego na cele energetyczne. W scenariuszu odpornościowym (S2) widzimy zróżnicowany mix paliw spalanych w kotłach jednopaliwowych oraz w kogeneracji. W związku z nieuwzględnieniem ograniczenia emisji CO₂ węgiel nie został wyeliminowany, ale jego zużycie jest ograniczone na rzecz innych paliw, tj. gazu ziemnego, biomasy i oleju opałowego.



Rys. 5. Wytwarzanie ciepła w latach 2015-2050 w scenariuszach S0, S1 i S2

Źródło: opracowanie własne



Rys. 6. Emisja CO₂ w latach 2015-2050 w scenariuszach S0, S1 i S2

Źródło: opracowanie własne

W scenariuszu referencyjnym (S0) roczna emisja CO₂ kształtuje się na poziomie od 243 mln ton do 195 mln ton i jest proporcjonalna do wolumenu wytwarzanego ciepła. W scenariuszu środowiskowym (S1), zgodnie z przyjętym założeniem i warunkiem ograniczającym, emisja od roku 2045 będzie zerowa. W przypadku scenariusza odpornościowego (S2) emisja CO₂ jest znacząco zredukowana

już od roku 2031, gdy następuje dywersyfikacja paliw i technologii. Warto zwrócić uwagę, że całkowita emisja CO₂ w całym okresie modelowania (lata 2020-2050) jest niższa od założonej w scenariuszu środowiskowym (S1) ZENODO (DOI: 10.5281/zenodo.10460014). Oznacza to współzależność rozważanych trendów ujętych w scenariuszach S1 i S2, czyli transformacji i zwiększania odporności.

Ponoszone nakłady inwestycyjne przedstawia tabela 4.

Tabela 4. Zestawienie nakładów inwestycyjnych w scenariuszach S0, S1 i S2

Scenariusz	Rok inwestycji	Technologia	Wartość [mln zł]	Wartość [mln zł]
S0	2041	BLRCOA	180,88	190,96
		CHPNGS	10,08	
S1	2041	BLRCOA	171,68	472,76
		CHPNGS	12,94	
	2046	BLRBIO	245,30	
		CHPBIO	42,84	
S2	2031	BLRCOA	48,3	349,91
		BLROIL	27,6	
		CHPNGS	15	
		CHPCOA	60	
		BLRBIO	69	
		CHPBIO	63	
		BLRNGS	20,7	
		CHPOIL	46,31	

Źródło: opracowanie własne

Najwyższe nakłady inwestycyjne zostały poniesione w scenariuszu środowiskowym S1. Inwestycje będą realizowane najpóźniej (w 2041 r. i 2046 r.) i będą dostępne przez dłuższy okres, poza czasem analizy. Scenariusz odpornościowy S2 pomimo wymuszenia warunkami ograniczającymi dywersyfikacji paliw i technologii nie wiąże się z najwyższymi nakładami inwestycyjnymi, ale w rozpatrywanym horyzoncie czasowym do roku 2050. Dywersyfikacja technologii i paliw spowodowała natychmiastowe ograniczanie emisji CO₂. W scenariuszu tym założono, że jednostkowe nakłady inwestycyjne będą wyższe o 50%, ponieważ w przypadku mniejszych instalacji zmniejszy się efekt skali.

Podsumowanie

Transformacja energetyczna oznacza wyzwania związane z nowymi technologiami, współzależnościami decentralizowanych systemów, cyfryzacją i uzależnieniem od globalnych łańcuchów dostaw. Transformacja może jednak być prowadzona w taki sposób, by kontrolować koszty i poszukiwać rozwiązania synergiczne ze zwiększaniem odporności.

Sformułowane założenia dotyczące odporności systemu energetycznego w wymiarach strukturalnym, dywersyfikacyjnym oraz redundantnym zilustrowano na przykładzie scenariuszy symulacyjnych. W scenariuszu środowiskowym S1 efektem całkowitego ograniczenia emisji CO₂ są najwyższe nakłady inwestycyjne i biomasa jako paliwo poza limitem emisji. Scenariusz S2 z wprowadzonymi założeniami odpornościowymi, wskutek zróżnicowania paliw i technologii, okazał się w rozpatrywanym horyzoncie czasowym mniej kosztowny pod względem nakładów inwestycyjnych. Dywersyfikacja powoduje znaczącą redukcję emisji, ale kosztem podwyższenia cen paliw.

Redundancja powinna być stosowana z uwzględnieniem akceptowalnych kosztów zwiększania odporności. W tym kontekście rekomendowane są analizy licznych scenariuszy uzupełnione ocenami ryzyka. Należy pamiętać, że w modelowaniu przyjęto istotne uproszczenia dotyczące działalności ciepłowni i realizacji procesów inwestycyjnych. W rzeczywistości gospodarczej rozważane są scenariusze. Z uwagi na niepewność wdrażane są jednak działania pośrednie. W kontekście prezentowanego badania decyzje inwestycyjne byłyby wypadkową założeń zdefiniowanych scenariuszy.

Na zakończenie warto przytoczyć stwierdzenie dotyczące przezorności i znaczenia problematyki odporności systemów energetycznych. Do przyszłych ocen odporności należy podchodzić ostrożnie, ponieważ fałszywe poczucie bezpieczeństwa samo w sobie jest główną luką w zabezpieczeniach. Nie można także zapominać, że zmiany skali mogą prowadzić do zmiany charakteru zagrożeń. W szczególności rosnące wzajemne powiązania systemów zwiększają złożoność ukrywającą luki w zabezpieczeniach i rosnącą wielkość kosztów w najgorszym przypadku, które mogą natychmiast pozbawić wszelkich oszczędności wynikających z łączenia systemów (Jasiūnas, Lund, Mikkola, 2021, s. 14).

Podziękowania

Artykuł przygotowany w ramach V Międzynarodowej Konferencji „Dylematy Współczesnej Obronności i Bezpieczeństwa”. Projekt dofinansowany ze środków budżetu państwa, przyznanych przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach Programu „Doskonała Nauka II”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AYYUB, B.M., 2014. Systems Resilience for Multihazard Environments: Definition, Metrics, and Valuation for Decision Making, *Risk Analysis*, vol. 34, nr 2, s. 340-355.
- [2] FILIPIAK, I., MIELCZARSKI, W., 2023. *Energetyka w okresie transformacji*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [3] GHOLAMI, A., SHEKARI, T., AMIRIOUN, M.H., AMINIFAR, F., AMINI, M.H., SARGOLZAEI, A., 2018. Toward a Consensus on the Definition and Taxonomy of Power System Resilience, *IEEE Access*, nr 6, s. 32035-32053.
- [4] GOV.PL, 2023. Założenia do aktualizacji Polityki Energetycznej Polski do 2040 r. (PEP2040) – wzmocnienie bezpieczeństwa i niezależności energetycznej, Kancelaria Prezesa Rady Ministrów, <https://www.gov.pl/web/premier/zalozenia-do-aktualizacji-polityki-energetycznej-polski-do-2040-r-pep2040--wzmocnienie-bezpieczenstwa-i-niezaleznosci-energetycznej> (dostęp: 25.01.2024).
- [5] GROPPI, D., KUMAR PINAYUR KANNAN, S., GARDUMI, F., ASTIASO GARCIA, D., 2023. Optimal planning of energy and water systems of a small island with a hourly OSeMOSYS model, *Energy Conversion and Management*, nr 276.
- [6] GUS, 2022. Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2020 i 2021, Warszawa: Główny Urząd Statystyczny.
- [7] HOWELLS, M., ROGNER, H., STRACHAN, N., HEAPS, C., HUNTINGTON, H., KYPREOS, S., HUGHES, A., SILVEIRA, S., DECAROLIS, J., BAZILLIAN, M., ROEHL, A., 2011. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System: An introduction to its ethos, structure and development, *Energy Policy*, vol. 39, nr 10, s. 5850-5870.
- [8] IGCP, 2020. Raport o ciepłownictwie, Warszawa: Izba Gospodarcza „Ciepłownictwo Polskie”.
- [9] JASIŪNAS, J., LUND, P.D., MIKKOLA, J., 2021. Energy system resilience – A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, nr 150.
- [10] JESSE, B.-J., HEINRICHS, H.U., KUCKSHINRICHS, W., 2019. Adapting the theory of resilience to energy systems: A review and outlook, *Energy, Sustainability and Society*, vol. 9, nr 1.
- [11] UE, 2022. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2022/2557 z dnia 14 grudnia 2022 r. w sprawie odporności podmiotów krytycznych i uchylająca dyrektywę Rady 2008/114/WE (Tekst mający znaczenie dla EOG) (Dz. Urz. UE L 333 z 27.12.2022, s. 164-198).
- [12] KOBIZE, 2012. Wytyczne – Rozporządzenie w sprawie monitorowania i raportowania – Ogólne wytyczne dotyczące instalacji, Warszawa: Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami.
- [13] KOBIZE, 2022. Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2020 do raportowania w ramach Systemu Handlu Uprawnieniami do Emisji za rok 2023, KOBiZE IOŚ-PIB.
- [14] KTH-dESA, 2023. *OSeMOSYS Documentation*, <https://buildmedia.readthedocs.org/media/pdf/osemosys/latest/osemosys.pdf> (dostęp: 25.01.2024).
- [15] KUCHARSKA, A., 2021. *Transformacja energetyczna: Wyzwania dla Polski wobec doświadczeń krajów Europy Zachodniej*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [16] KUNIKOWSKI, G., 2019. Przegląd ilościowych metod ocen stanu bezpieczeństwa energetycznego, *Roczniki Kolegium Analiz Ekonomicznych*, nr 54, s. 171-182.
- [17] MKiŚ, 2021a. Polityka energetyczna Polski do 2040 r. Załącznik do uchwały nr 22/2021 Rady Ministrów z dnia 2 lutego 2021 r., Warszawa: Ministerstwo Klimatu i Środowiska.
- [18] MKiŚ, 2021b. Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040 r. [Załącznik do uchwały nr 149 Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 r. (poz. 1138)], Warszawa: Ministerstwo Klimatu i Środowiska.

- [19] MKiŚ, 2022a. Strategia dla ciepłownictwa do 2030 r. Z perspektywą do 2040 r. – Załącznik analityczny. Projekt, Warszawa: Ministerstwo Klimatu i Środowiska, <https://bip.mos.gov.pl/strategie-plany-programy/strategia-dla-cieplownictwa-do-2030-r-z-perspektywa-do-2040-r/> (dostęp: 25.01.2024).
- [20] MKiŚ, 2022b. Strategia dla ciepłownictwa do 2030 r. Z perspektywą do 2040 r. Projekt, Warszawa: Ministerstwo Klimatu i Środowiska, <https://bip.mos.gov.pl/strategie-plany-programy/strategia-dla-cieplownictwa-do-2030-r-z-perspektywa-do-2040-r/> (dostęp: 25.01.2024).
- [21] MOKSNES, N., WELSCH, M., GARDUMI, F., SHIVAKUMAR, A., BROAD, O., HOWELLS, M., TALLOTIS, C., SRIDHARAN, V., 2015. *2015 OSeMOSYS User Manual*, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, Politecnico di Milano, http://www.osemosys.org/uploads/1/8/5/0/18504136/new-website_osemosys_manual_-_working_with_text_files_-_2015-11-05.pdf (dostęp: 25.01.2024).
- [22] PANTELI, M., MANCARELLA, P., TRAKAS, D.N., KYRIAKIDES, E., HATZIARGYRIOU, N.D., 2017. Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, nr 6, s. 4732-4742.
- [23] PASKA, J., 2023. *Odnawialne i rozproszone źródła energii w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym – uwarunkowania i wyzwania*, [w:] Wojtkowska-Łodej, G. (red.), *Transformacja rynków energii. Gospodarka – Klimat – Technologia – Regulacje*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza SGH.
- [24] PTEZ, 2019. Raport o kogeneracji w ciepłownictwie 2019, Warszawa: Polskie Towarzystwo Elektrociepłowni Zawodowych, <https://www.gov.pl/attachment/1b0d1dfe-9ad4-4e78-a895-21f8413b85d0> (dostęp: 25.01.2024).
- [25] RCB, 2023. Narodowy Program Ochrony Infrastruktury Krytycznej – Tekst jednolity 2023, Warszawa: Rządowe Centrum Bezpieczeństwa.
- [26] SUWAŁA, W., 2009. Typowe elementy i modele systemów paliwowo-energetycznych, *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, nr 76, s. 5-16.
- [27] TATAREWICZ, I., LEWARSKI, M., SKWIERZ, S., 2020. *The MEESA Model, version 1.0.*, Warsaw: Institute of Environmental Protection – National Research Institute/National Centre for Emissions Management (KOBiZE).
- [28] TATAREWICZ, I., LEWARSKI, M., SKWIERZ, S., PYRKA, M., BORATYŃSKI, J., JESZKE, R., WITAJEWSKI-BALTVILKS, J., SEKUŁA, M., 2022. *POLSKA NET-ZERO 2050: Transformacja sektora energetycznego Polski i UE do 2050 roku*, Warszawa: KOBiZE IOŚ-PIB.
- [29] TIERNEY, K., BRUNEAU, M., 2007. Conceptualizing and Measuring Resilience: A Key to Disaster Loss Reduction, *TR News*, nr 250.
- [30] WRÓBEL, R., 2022. Budowa i wzmacnianie odporności podmiotów krytycznych w Polsce, *Zeszyty Naukowe Pro Publico Bono*, nr 1 (1), s. 163-176.
- [31] WYRWA, A., SZURLEJ, A., GAWLIK, L., SUWAŁA, W., 2015. Energy scenarios for Poland-a comparison of PRIMES and TIMES-PL modeling results, *Journal of Power of Technologies*, <https://www.semanticscholar.org/paper/Energy-scenarios-for-Poland-a-comparison-of-PRIMES-Wyrwa-Szurlej/b71d602590c98aa21ac93db4a0af1fa85e1e113f> (dostęp: 25.01.2024).