



POLITECHNIKA
GDAŃSKA



MARCIN JASKÓLSKI

MODELOWANIE SYSTEMÓW
ENERGETYCZNYCH WYTWARZANIA
ENERGII ELEKTRYCZNEJ I CIEPŁA
DO CELÓW PLANOWANIA ROZWOJU –
WYBRANE ZAGADNIENIA

GDAŃSK 2023

PRZEWODNICZĄCY KOMITETU REDAKCYJNEGO
WYDAWNICTWA POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Dariusz Mikielewicz

REDAKTOR PUBLIKACJI NAUKOWYCH

Michał Szydłowski

REDAKTOR SERII

Jarosław Guziński

RECENZENCI

Wojciech Bujalski

Sławomir Cieślik

REDAKCJA JĘZYKOWA

Agnieszka Frankiewicz

PROJEKT OKŁADKI

Jolanta Cieślawska

Wydano za zgodą
Rektora Politechniki Gdańskiej

Oferta wydawnicza Politechniki Gdańskiej jest dostępna pod adresem
<https://www.sklep.pg.edu.pl>

Utwór nie może być powielany i rozpowszechniany, w jakiegokolwiek formie
i w jakiegokolwiek sposób, bez pisemnej zgody wydawcy.

© Copyright by Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2023

ISBN 978-83-7348-883-0

WYDAWNICTWO POLITECHNIKI GDAŃSKIEJ

Wydanie I. Ark. wyd. 6,9, ark. druku 8,75, 187/1163

Druk i oprawa: Volumina.pl sp. z o. o.

ul. Księcia Witolda 7-9, 71-063 Szczecin, tel. 91 812 09 08

Spis treści

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	5
1. WSTĘP	9
1.1. Znaczenie modelowania w planowaniu rozwoju systemów energetycznych	9
1.2. Transformacja i planowanie rozwoju systemów energetycznych	10
1.3. Pytania badawcze	11
1.4. Hipotezy badawcze	12
2. POLITYKA ENERGETYCZNA	14
2.1. Polityka energetyczna Unii Europejskiej	14
2.2. Program „Czysta energia dla wszystkich Europejczyków”	15
2.3. Promowanie stosowania energii ze źródeł odnawialnych i wysokosprawnej kogeneracji	16
2.4. Unijny system handlu uprawnieniami do emisji	18
2.5. Kontrola i ograniczanie emisji przemysłowych	20
2.6. „Energetyczna Mapa Drogowa do roku 2050”	21
2.7. Europejski Zielony Ład	21
2.8. Pakiet „Gotowi na 55”	21
2.9. Polityka energetyczna Polski do roku 2040	22
2.10. Podsumowanie	23
3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA PROCESÓW MODELOWANIA ROZWOJU SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH	24
3.1. Rozwój metod i narzędzi do planowania rozwoju systemów energetycznych ..	24
3.2. Klasyfikacja modeli rozwoju systemów energetycznych	26
3.3. Wybrane narzędzia modelowania rozwoju systemów energetycznych	29
3.3.1. Market Allocation (MARKAL)	29
3.3.2. Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impacts (MESSAGE)	34
3.3.3. Wien Automatic System Planning Package (WASP)	35
3.3.4. The Integrated MARKAL-EFOM System (TIMES)	36
3.3.5. Price-Induced Market Equilibrium System (PRIMES)	38
3.3.6. Open Source Energy Modelling System (OSeMOSYS)	40
3.3.7. A Model for Long-term Energy Demand Evaluation (MEDEE)	42
3.3.8. Model for Analysis of Energy Demand (MAED)	44
3.4. Analiza mocnych i słabych stron metod i narzędzi	45
3.5. Wybrane prace badawcze w zakresie tematyki monografii	46
3.6. Podsumowanie	47

4. METODA I MODEL ROZWOJU SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH	48
4.1. Metodyka	48
4.1.1. Wprowadzenie	48
4.2. Struktura modelu systemów energetycznych	48
4.2.1. Referencyjny System Energetyczny	48
4.2.2. Modelowanie systemu handlu uprawnieniami do emisji	54
4.2.3. Modelowanie układów wychwytu i składowania CO ₂	61
4.2.4. Uwzględnienie celów w zakresie odnawialnych źródeł energii i wysokosprawnej kogeneracji	61
4.3. Ogólne dane wejściowe	64
4.4. Prognozy finalnego zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło	72
4.5. Scenariusze i warianty obliczeniowe	79
4.5.1. Scenariusze	79
4.5.2. Warianty obliczeniowe	80
4.5.3. Modyfikacje modelu dla potrzeb scenariusza dekarbonizacji	80
4.6. Podsumowanie	83
5. WYNIKI BADAŃ I ANALIZY ROZWOJU SYSTEMÓW ENERGETYCZNYCH ...	84
5.1. Wytwarzanie energii elektrycznej	84
5.2. Wytwarzanie ciepła	87
5.3. Emisje zanieczyszczeń	88
5.4. Zużycie paliw do produkcji energii elektrycznej i ciepła	90
5.5. Wskaźniki ekonomiczne	90
5.6. Omówienie wyników	94
PODSUMOWANIE	96
BIBLIOGRAFIA	98
ZAŁĄCZNIK 1	112
ZAŁĄCZNIK 2	117
STRESZCZENIE W J. ANGIELSKIM	137
STRESZCZENIE W J. POLSKIM	137

SPIS WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

$a_{0,r}, a_{i,r}$	– wyraz wolny i współczynnik stojący przy i -tej zmiennej niezależnej w równaniu regresji dla sektora gospodarki r
$c_{kar(r,t,v)}$	– kara za brak przedstawienia do rozliczenia jednego uprawnienia do emisji substancji v , obowiązująca w czasie t [jednostka monetarna/EUA lub jednostka monetarna/t]
$c_{tow(r,t,s,l)}$	– cena pozyskania lub sprzedaży jednostki energii (towaru) [tys. €/TJ]
$c_{upr(r,t,v,l)}$	– cena (na poziomie cenowym l) jednego uprawnienia do emisji dla 1 t emisji substancji v w czasie t [jednostka monetarna/EUA lub jednostka monetarna/t]
d	– ogólna stopa dyskonta dla systemu energetycznego odwzorowanego w modelu [–]
$d_{r,p}$	– stopa dyskonta charakterystyczna dla technologii energetycznej [–]
$€_{2018}$	– euro roku 2018 (jednostka monetarna modelu)
e, E	– indeks i liczba nośników energii
E_b	– roczna produkcja energii elektrycznej brutto
$e_{CO_2(r,t,p)}$	– wskaźnik emisji CO_2 na jednostkę produkowanej energii elektrycznej
$E_{n(r,t,p,w)}$	– roczna produkcja netto energii [TJ/a]
$E_{pw(r,t,p)}$	– roczne zużycie energii elektrycznej na potrzeby własne
$E_{z(r,t)}^?, E_{z(r,t_0)}$	– roczne zapotrzebowanie na finalną energię elektryczną lub ciepło w sektorze gospodarki r , odpowiednio w czasie t i t_0
$G_{alok(r,t,v)}$	– roczny przydział uprawnień do emisji substancji v za darmo w czasie t [EUA/a lub t/a]
$G_{c(dus)}$	– roczna całkowita produkcja pyłu
$G_{e(CO)}$	– roczna emisja tlenku węgla
$G_{e(CO_2)}$	– roczna emisja dwutlenku węgla
$G_{e(NO_x)}$	– roczna emisja tlenków azotu
$G_{e(SO_2)}$	– roczna emisja dwutlenku siarki
$G_{r,t,v}$	– wielkość emisji zanieczyszczenia lub jej równoważnika (liczba wymaganych uprawnień do emisji) [t/a]
$G_{r,t,v}$	– ilość substancji v emitowana rocznie w czasie t [t/a]
$G_{supr(r,t,v,l)}$	– liczba uprawnień do emisji substancji v sprzedawana rocznie po cenie na poziomie l , w czasie t [EUA/a lub t/a]
$G_{w(dus)}$	– roczna całkowita ilość wychwyconego pyłu
$G_{zupr(r,t,v,l)}$	– liczba uprawnień do emisji substancji v zakupywana rocznie po cenie na poziomie l , w czasie t [EUA/a lub t/a]
i, I	– indeks i liczba zmiennych niezależnych w równaniu regresji
j, J	– indeks roku i liczba lat w jednym okresie planowania t
$K_{dost(r,t,p,e)}$	– roczne koszty dostawy paliwa lub energii do obiektów energetycznych
$k_{dost(r,t,p,e)}$	– jednostkowy koszt dostawy nośnika energii do obiektów wytwórczych [tys. €/TJ]

$K_{es(r,t,p)}$	– roczne koszty eksploatacyjne stałe
$k_{es(r,t,p)}$	– jednostkowe roczne koszty eksploatacyjne stałe [tys. €/ (MW·a)]
$K_{cz(r,t,p)}$	– roczne koszty eksploatacyjne zmienne, nieuwzględniające kosztów paliwa
$k_{cz(r,t,p)}$	– jednostkowe roczne koszty eksploatacyjne zmienne [tys. €/TJ]
$K_{kap(r,t,p)}$	– roczne koszty obsługi kapitału
$k_{nd(r,t,p)}$	– wskaźnik jednostkowych zdyskontowanych nakładów inwestycyjnych [tys. €/MW]
$K_{\tau(r,t)}$	– koszty roczne funkcjonowania systemu energetycznego w regionie r w roku należącym do okresu planowania t [tys. €/a]
$K_{\dot{s}r(r,t,v)}$	– roczne koszty obciążenia środowiska
$k_{\dot{s}r(r,t,v)}$	– jednostkowy koszt emisji zanieczyszczenia [tys. €/t]
$K_{tow(r,t,s)}$	– roczne koszty zakupu lub sprzedaży albo pozyskania (wydobycia lub produkcji) towaru lub nośnika energii
$K_{upr(r,t,v)}$	– koszty i korzyści roczne wynikające z uczestnictwa podmiotów energetycznych w EU ETS dla typu emisji v w czasie t [(jednostka monetarna)/a]
l	– poziom cenowy dla towaru
L_t	– liczba ludności w roku t [tys.]
$n_{r',t}$	– liczba samochodów w podsektorze r' (samochody osobowe lub ciężarowe) w roku t na 1000 osób
n_s	– szczytowy stopień wyzyskania mocy osiągalnej netto
p, P	– indeks i liczba technologii
$P_{n(r,t,p)}$	– całkowita moc netto [MW]
$q_{r,t,p,e}$	– jednostkowe zużycie nośnika energii w obiektach wytwórczych [TJ/TJ]
$Q_{r,t,s,l}$	– roczna ilość energii (towaru) pozyskiwanej lub sprzedawanej w ramach opcji dostawy [TJ/a]
r, R	– indeks i liczba regionów (obszarów geograficznych) odwzorowanych w modelu
$r_{kap(r,t,p)}$	– rata kosztów kapitałowych [1/a]
s, S	– indeks i liczba opcji pozyskania lub dostawy energii (imp – zakup spoza rozpatrywanego obszaru (import), eksp – sprzedaż poza rozpatrywany obszar (eksport), min – wydobycie paliw nieodnawialnych, rnw – pozyskanie energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych)
t, T	– indeks i liczba okresów planowania
t_0	– numer roku, do którego odnoszone są wartości zapotrzebowania na energię elektryczną lub ciepło (rok początkowy – 2005)
t_{start}	– pierwszy rok modelu, w którym technologia jest dostępna
$u_{r',t}$	– udział samochodów elektrycznych w całkowitej liczbie pojazdów w podsektorze r' [%]
u_s	– stopień wyzyskania mocy osiągalnej netto w czasie trwania szczytu zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym
v, V	– indeks i liczba typów emitowanych zanieczyszczeń
w	– indeks przedziału czasowego wg podziału roku na pory roku i strefy dobowe

$y_{i,r,t}$	– wartość i -tej zmiennej niezależnej równania regresji w czasie t dla sektora gospodarki r
z	– wartość funkcji celu równa zaktualizowanej wartości netto (NPV) kosztów systemu energetycznego, odwzorowanego w modelu [tys. €]
$Z_{r,t}$	– zmienna zależna opisująca zapotrzebowanie na energię elektryczną lub ciepło bądź dynamikę jego zmian w odniesieniu do wartości z z wybranego roku analizy
$\Delta P_{n(r,t,p)}$	– przyrost mocy netto [MW]
$\varepsilon_{r',t}$	– średnie roczne zużycie energii elektrycznej przez jeden samochód elektryczny z podsektora r' [GWh/a]
$\eta_{d(r,t)}$	– wartość sprawności użytkowania finalnej energii elektrycznej w sektorze gospodarki r
$\eta_{e(r,t,p)}$	– sprawność netto wytwarzania energii elektrycznej
$\lambda_{r,p}$	– okres eksploatacji [a]
σ_p	– wskaźnik skojarzenia

Spis ważniejszych skrótów i skrótowców

BAT	– <i>best available techniques</i> (najlepsze dostępne techniki)
CCGT	– <i>combined cycle gas turbine</i> (układ kombinowany gazowo-parowy)
CCS	– <i>carbon capture and storage</i> (wychwyt i składowanie związków węgla)
CHP	– <i>combined heat and power</i> (skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła)
ec, EC	– elektrociepłownie
EFOM	– <i>energy flow optimization model</i>
el.	– elektrownie
ERM	– Energy Roadmap („Energetyczna Mapa Drogowa”)
EU ETS, ETS	– European Union Emission Trading Scheme (unijny system handlu uprawnieniami do emisji)
EUA	– European Emission Allowance (europejskie uprawnienie do emisji)
FBC	– <i>fluidized bed combustion</i> (spalanie w złożu fluidalnym)
GAMS	– General Algebraic Modelling System
GEM	– General Equilibrium Models (modele ogólnej równowagi)
GHG	– <i>greenhouse gases</i> (gazy cieplarniane)
IGCC	– <i>integrated gasification combined cycle</i> (układ kombinowany zintegrowany ze zgazowaniem)
LCP	– <i>large combustion plants</i> (duże źródła spalania)
MAE	– Międzynarodowa Agencja Energii
MAED	– Model for Analysis of Energy Demand
MARKAL	– Market Allocation
MESSAGE	– Model for Energy Supply System Alternatives and their General Environmental Impacts
MIP	– <i>mixed integer programming</i> (programowanie mieszane całkowitoliczbowe)
ORC	– <i>organic Rankine cycle</i> (organiczny obieg Rankine’a)

OSeMOSYS	– Open Source Energy Modelling System
OZE, OZE-E	– odnawialne zasoby energii, odnawialne źródła energii, energia elektryczna z odnawialnych źródeł energii
PCC	– <i>pulverized coal combustion</i> (spalanie pyłu węglowego)
PEM	– <i>proton exchange membrane</i> (elektrolit polimerowy, membrana wymiany kationów wodorowych)
PEP2040	– Polityka Energetyczna Polski do 2040 roku
PWR	– <i>pressurized water reactor</i> (reaktor wodny ciśnieniowy)
RSE, RES	– Referencyjny System Energetyczny, Reference Energy System
SMR	– <i>small modular reactor, small and medium reactors</i> (mały reaktor modułowy, reaktory małej i średniej mocy)
TIMES	– The Integrated MARKAL-EFOM System
URE	– Urząd Regulacji Energetyki

Rozdział 1

WSTĘP

1.1. Znaczenie modelowania w planowaniu rozwoju systemów energetycznych

Tematyka niniejszej monografii jest poświęcona modelowaniu rozwoju systemów energetycznych w zakresie struktury wytwarzania energii elektrycznej i ciepła sieciowego. Problematyka monografii wpisuje się w ideę zrównoważonego rozwoju i pomaga wyznaczyć cele krajowej strategii energetyczno-klimatycznej. Konieczność redukcji emisji gazów cieplarnianych i emisji przemysłowych w celu poprawy jakości powietrza i zahamowania zmian klimatu została odzwierciedlona w dokumentach prawnych i strategicznych Unii Europejskiej [40, 42, 46, 47]. Jest ona stymulowana m.in. poprzez funkcjonowanie unijnego systemu handlu uprawnieniami do emisji (EU ETS). Wymusza to zastosowanie źródeł wykorzystujących technologie nisko- i zeroemisyjne, w tym oparte na odnawialnych zasobach energii, których zmienność mocy wytwarzanej charakteryzuje się intermitencją (zachowaniem polegającym na przełączaniu trybu pracy złożonego układu pomiędzy dwoma typami – prawie periodycznym i prawie chaotycznym). Implementacja nowoczesnych technologii jest zatem sporym wyzwaniem, ponieważ odnawialne źródła energii często nie zapewniają dostawy nośników energetycznych przy stałym poziomie mocy, tak jak są w stanie robić elektrownie podstawowe. Aby było możliwe zbilansowanie systemów elektroenergetycznych w każdej chwili czasowej, muszą funkcjonować źródła energii o różnym charakterze pracy. Przewidywany wzrost liczby i mocy zainstalowanej źródeł intermitentnych wymaga poszukiwania sposobów efektywnego magazynowania energii elektrycznej. Rynek bateryjnych zasobników energii obecnie rozwija się dynamicznie, choć i to może nie zagwarantować stabilnej pracy systemu elektroenergetycznego, w którym przeważać będą pogodozależne źródła wytwarzania. Wzrastające zainteresowanie bezemisyjnymi środkami transportu, w szczególności pojazdami elektrycznymi, z pewnością przyczyni się do znaczącego wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną. Jednocześnie wzrośnie zapotrzebowanie na baterie, co może ograniczyć ich dostępność dla elektroenergetyki.

Potrzeba stosowania lokalnych odnawialnych zasobów energii oraz ograniczania strat w systemach dostawy nośników energii wymaga transformacji tych systemów od struktury tradycyjnej, scentralizowanej do systemów, w których istnieje synergia pomiędzy systemami scentralizowanymi i zdecentralizowanymi, planowanymi i koordynowanymi na poziomie lokalnym. Uwzględniając jednak ograniczenia w postępie technologicznym w zakresie magazynowania energii, układów sterowania systemami energetycznymi oraz będącą w fazie „kiełkowania” świadomość energetyczną i aktywność w zakresie wytwarzania energii w spo-

łączeństwie, autor spodziewa się, że proces ten będzie trudny, i uważa, że wymaga on sporządzenia odpowiednich planów, wspartych wiedzą ekspercką.

Systemy elektroenergetyczne rozwinęły się dynamicznie w latach 60. i 70. XX wieku. Początkowo oparte były głównie na paliwach kopalnych, z czasem w niektórych krajach europejskich wprowadzono energetykę jądrową. Obecnie wiele spośród tych systemów wymaga modernizacji, zwłaszcza w zakresie struktury wytwarzania energii elektrycznej. Podobny problem dotyczy systemów ciepłowniczych. W Polsce wciąż dominują w tym zakresie ciepłownie i elektrociepłownie węglowe. Konieczność zmian w sposobie wytwarzania i dostarczania energii odbiorcom końcowym stwarza szansę na zbudowanie systemu energetycznego przyjaznego środowisku naturalnemu. Wcześniejsze badania autora [78] wykazały, że odtworzenie systemu elektroenergetycznego opartego na paliwach kopalnych również wiąże się z wysokimi kosztami wytwarzania energii elektrycznej. Postawienie na źródła zero- i niskoemisyjne stanowi też wyzwanie finansowe, ale warto wziąć pod uwagę pozatechniczne aspekty wytwarzania energii, w tym pogorszenie zdrowia i utratę życia ludzkiego będące konsekwencją zanieczyszczonego środowiska.

Planowanie rozwoju systemów energetycznych to proces wielokryterialny, z dużą liczbą niepewnych zmiennych. Długi horyzont czasowy, konieczność podejmowania decyzji politycznych oraz potrzeba uwzględnienia nowych technologii wymagają opracowania modeli systemów energetycznych, które lepiej niż dotychczas będą wspomagały procesy planowania. Modele te muszą właściwie odwzorowywać obecnie istniejącą infrastrukturę wytwórczą, a także zawierać zestawy nowych technologii, które są przewidywane do wprowadzenia. Ponadto powinny uwzględniać reprezentacje mechanizmów handlu uprawnieniami do emisji oraz cele w zakresie redukcji emisji i udziałów energii ze źródeł odnawialnych.

1.2. Transformacja i planowanie rozwoju systemów energetycznych

Założenia strategii energetycznych, które szczegółowo omówiono w rozdziale 2, wskazują na potrzebę dokonania transformacji technologicznej w elektroenergetyce, po to by zmniejszyć niekorzystny wpływ tego sektora na środowisko. Jednoczesne uwzględnienie wszystkich długoterminowych celów polityki energetycznej przy poszukiwaniu „optymalnej” struktury wytwarzania energii jest procesem skomplikowanym. Dokumenty strategiczne mogą się opierać na błędnych założeniach i kreować niewłaściwe impulsy inwestycyjne, bez poparcia ich dogłębnymi analizami o charakterze systemowym. Dlatego zalecane jest stosowanie narzędzi wspomagających planowanie rozwoju systemów energetycznych. Po pierwsze, narzędzia te są w stanie przetwarzać ogromne ilości danych dotyczących systemów energetycznych. Po drugie, wykorzystywane w nich metody są obiektywne, dobrze rozpoznane i podlegają ciągłemu procesowi recenzowania w czasopismach naukowych. Po trzecie, dają one możliwość graficznego przedstawiania danych wejściowych i wyników, a także angażowania grup interesów o różnym stopniu wiedzy z dziedziny energetyki [165]. Narzędzia te mają zazwyczaj postać pakietów obejmujących modele optymalizacyjne lub symulacyjne systemu energetycznego takie jak MARKAL (Market Allocation), EFOM (Energy Flow Optimization Model), MESSAGE (Model for Energy Supply System Alternatives

and their General Environmental Impacts) lub TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System).

W Polsce, gdzie produkcja energii elektrycznej jest zdominowana przez technologie spalające węgiel kamienny i brunatny, spodziewane są wysokie koszty tzw. głębokiej dekarbonizacji [75]. Z drugiej strony, jako Państwo Członkowskie UE, Polska zaimplementowała w krajowym prawie unijny system handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych [158]. Istniejące polskie elektrownie w większości bazują na rozwiązaniach z lat 70. i 80. XX wieku i wycofanie wielu bloków z eksploatacji będzie rozważone w najbliższych latach [136]. W ostatnich latach (2015–2020) większość projektów budowy nowych bloków energetycznych dużej mocy (400–1000 MW) realizowanych w naszym kraju stanowiły elektrownie kondensacyjne węglowe i elektrociepłownie opalane gazem, z niewielkim udziałem jednostek spalających biomasę [3, 137]. Ich nieukończenie mogło powodować problemy z bilansem mocy [2]. Konieczność wyłączenia przestarzałych elektrowni węglowych stwarza jednak okazję do transformacji podsektora wytwarzania energii elektrycznej w kierunku technologii niskoemisyjnych i bezemisyjnych. W poszukiwaniu takich opcji rząd Rzeczypospolitej Polskiej przyjął w 2013 roku program budowy elektrowni jądrowej (EJ) [125], a w 2020 roku nastąpiła jego aktualizacja [140], która jedynie usystematyzowała terminy realizacji poszczególnych etapów programu, ale niewiele wniosła do samego projektu budowy EJ.

Z uwagi na długoterminowy charakter decyzji w zakresie przyszłej struktury wytwarzania energii elektrycznej istnieje potrzeba opracowania metod i narzędzi wspomagających planowanie rozwoju zintegrowanych systemów energetycznych, obejmujących nie tylko system elektroenergetyczny, ale także systemy ciepłownicze. Te ostatnie powinny być uwzględnione przynajmniej w zakresie umożliwiającym odwzorowanie układów skojarzonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Metody te powinny być oparte na przejrzystych i obiektywnych zasadach.

Metody i analizy przedstawione w niniejszej monografii stanowią nowe, ulepszone ujęcie problematyki rozwoju sektora elektroenergetycznego w horyzoncie długoterminowym w stosunku do analiz zaprezentowanych zarówno w projektach polityki energetycznej Polski [119–121, 123, 124], jak i aktualnie obowiązującym dokumencie [140]. Perspektywa planowania jest dłuższa niż w przyjętej polityce energetycznej, przede wszystkim z uwagi na uwzględnienie technologii jądrowych, charakteryzujących się długimi okresami budowy i eksploatacji.

1.3. Pytania badawcze

W odniesieniu do powyższych rozważań autor monografii sformułował następujące pytania badawcze:

1. Jakie technologie należy wybrać, aby wypełnić cele wskaźnikowe w zakresie odnawialnych źródeł energii?
2. Czy struktura wytwarzania energii elektrycznej powinna się przekształcić z wysoce scentralizowanej w zdecentralizowaną?

3. Kiedy i w jakich warunkach ekonomicznych zasadna będzie budowa elektrowni jądrowej?
4. Jaką rolę powinien pełnić węgiel w trakcie transformacji polskiego sektora elektroenergetycznego?
5. Czy możliwa jest budowa systemu energetycznego neutralnego klimatycznie? A może raczej: w jakich warunkach jest to możliwe?

Aby uzyskać odpowiedzi na wskazane pytania, autor opracował metodykę modelowania rozwoju systemów energetycznych z uwzględnieniem nowoczesnych technologii. Głównym celem monografii jest przedstawienie opracowania i zastosowania metod modelowania rozwoju systemów energetycznych, w których dostawa nośników odbywa się za pośrednictwem sieci elektroenergetycznych i ciepłowniczych. Ich rozwój będzie badany w perspektywie długoterminowej, tj. do 2060 roku. Metodyka modelowania ma w swoim założeniu stanowić narzędzie wspomagające decyzje w zakresie planowania inwestycji i eksploatacji obiektów energetycznych. Inwestycje te powinny doprowadzić do stworzenia zrównoważonych systemów energetycznych w perspektywie długoterminowej, tak aby istniejące zasoby paliw kopalnych mogły służyć zaspokajaniu potrzeb następnych pokoleń, w zakresie nie tylko dostaw energii, ale także produkcji innych dóbr. Opracowane modele uwzględniają aktualny stan polityki energetycznej zarówno w Polsce, jak i w Unii Europejskiej. W monografii zawarto także opis procesu modelowania systemów energetycznych na potrzeby planowania ich rozwoju w nowych uwarunkowaniach społecznych, gospodarczych i politycznych.

1.4. Hipotezy badawcze

Autor monografii postawił następujące hipotezy badawcze:

1. Technologiami o kluczowym znaczeniu dla wypełnienia celów wskaźnikowych w odniesieniu do udziałów odnawialnych źródeł energii będą elektrownie wiatrowe – zarówno lądowe, jak i morskie. Przewidywana jest także istotna rola farm słonecznych, przydomowych instalacji fotowoltaicznych oraz elektrowni i elektrociepłowni na biomasę.
2. Wykorzystanie lokalnych odnawialnych zasobów energii przyczyni się do zwiększenia roli źródeł energetyki rozproszonej. Źródła podstawowe będą wspierały źródła rozproszone w zapewnieniu krótkoterminowego bezpieczeństwa elektroenergetycznego.
3. Wobec konieczności transformacji polskiego systemu elektroenergetycznego, wymuszonej strategią dekarbonizacji w UE, uzasadniona będzie budowa elektrowni jądrowych. Wysokie ceny na rynku uprawnień do emisji CO₂ będą skłaniać do wykorzystania energii jądrowej w energetyce.
4. W trakcie transformacji polskiego sektora elektroenergetycznego wysokosprawne elektrownie węglowe, które można wyposażyć w układy wychwyty i składowania CO₂ (CCS), mogą pełnić rolę technologii „pomostowej”, a ich udział powinien być stopniowo redukowany. W warunkach wysokich cen uprawnień, a także ograniczeń w dostępie do paliw stałych może się jednak okazać, że elektrownie węglowe, niezależnie od ich wyposażenia w układy CCS, nie będą opłacalne na rynku energii.

5. Budowa w Polsce systemu neutralnego klimatycznie jest możliwa do 2050 roku. Całkowita neutralność klimatyczna wymagałaby zmian na skalę globalną w kierunku systemów opartych głównie na odnawialnych zasobach energii i energii jądrowej.

Hipotezy te będą testowane za pomocą metod rozwiniętych przez autora w monografii.