

Jacek KAMIŃSKI*

Liberalizacja rynku energii elektrycznej a zużycie węgla kamiennego w sektorze elektroenergetycznym – ujęcie modelowe

STRESZCZENIE. W artykule opisano model matematyczny do ilościowej oceny wpływu liberalizacji rynku energii elektrycznej na zużycie węgla kamiennego w sektorze elektroenergetycznym. Przedstawiono ogólnie najważniejsze modele opracowane dla potrzeb długoterminowego prognozowania rozwoju sektora paliwowo-energetycznego. Następnie opisano koncepcję odwzorowania relacji występujących pomiędzy sektorami: dostawców paliw do produkcji energii elektrycznej i elektroenergetyką, wraz z ich matematycznym ujęciem w modelu. W dalszej części artykułu przedstawiono scenariusze badawcze, przeprowadzono analizę wyników obliczeń oraz zaprezentowano najważniejsze wnioski.

SŁOWA KLUCZOWE: liberalizacja rynku energii elektrycznej, węgiel kamienny, modelowanie matematyczne

Wprowadzenie

Badania nad sektorem paliwowo-energetycznym mają istotne znaczenie dla właściwego funkcjonowania każdego państwa, co wynika z kluczowej roli jaką pełni ten sektor

* Dr inż. — Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi PAN, Kraków.
e-mail: kamjacek@min-pan.krakow.pl

Recenzent: prof. dr hab. inż. Eugeniusz MOKRZYCKI

w gospodarce. Zachwianie dostaw paliw lub energii, czy też niestabilność cenowa nośników energii będące skutkiem podejmowania niewłaściwych decyzji mają zazwyczaj bardzo negatywny wpływ na gospodarkę. Większość decyzji związanych z funkcjonowaniem sektora paliwowo-energetycznego powinna być zbadana pod kątem celowości i skutków jeszcze przed ich wdrożeniem. Ze względu na złożoność oddziaływań występujących w sektorze paliwowo-energetycznym oraz relacje z innymi sektorami gospodarki skutki wszelkich decyzji są trudne do przewidzenia w średnim i długim okresie. Dlatego też w badaniach tego typu konieczne jest zastosowanie takiej metody badawczej, która umożliwia uwzględnienie wpływu wielu czynników na analizowany sektor oraz jego wpływ na inne sektory gospodarki. Metodą, zastosowaną w niniejszych badaniach jest analiza systemowa, której narzędziem oceny ilościowej są modele matematyczne, umożliwiające wielowariantową analizę zachodzących procesów. Najpopularniejsze modele wykorzystywane w świecie do prognozowania rozwoju sektora energetycznego to:

- ✧ PRIMES – model równowagi cząstkowej sektora energetycznego krajów Unii Europejskiej połączonych wspólnymi rynkami energii. Model ten wykorzystany był między innymi do szczegółowych analiz wpływu handlu emisjami na sektor energetyczny (Capros 1998);
- ✧ POLES (*Perspective Outlook on Long-term Energy Systems*) – symulacyjny model równowagi cząstkowej opracowany dla światowego rynku energii. Duży zasięg geograficzny modelu sprawia, że model ten nie umożliwia uzyskania tak dokładnych wyników dla krajów UE jak w przypadku modelu PRIMES (Criqui 2001);
- ✧ EFOM (*Energy Flow Optimisation Model*) – model, w którym system energetyczny jest opisany jako sieć powiązań pomiędzy pozyskaniem paliw pierwotnych, poprzez technologie zamiany na inne formy energii, do popytu na energię finalną (Bunn 1997);
- ✧ TIMES (*The Integrated MARKAL-EFOM System*) – model oparty na dwóch podstawowych grupach elementów: zasoby (nośniki energii, materiały, finanse, emisje) oraz procesy (definiujące transformację jednych zasobów na inne). Funkcją celu jest zdyskontowana nadwyżka przychodów nad kosztami (ETSAP 2004).

Istotne doświadczenia w zakresie praktycznego wykorzystania modelowania matematycznego w badaniach nad sektorem paliwowo-energetycznym ma Zakład Polityki Energetycznej i Ekologicznej Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN. Opracowano w nim szereg modeli, których konstrukcja uzależniona była od celów przeprowadzanych badań. Wśród najważniejszych wymienić można:

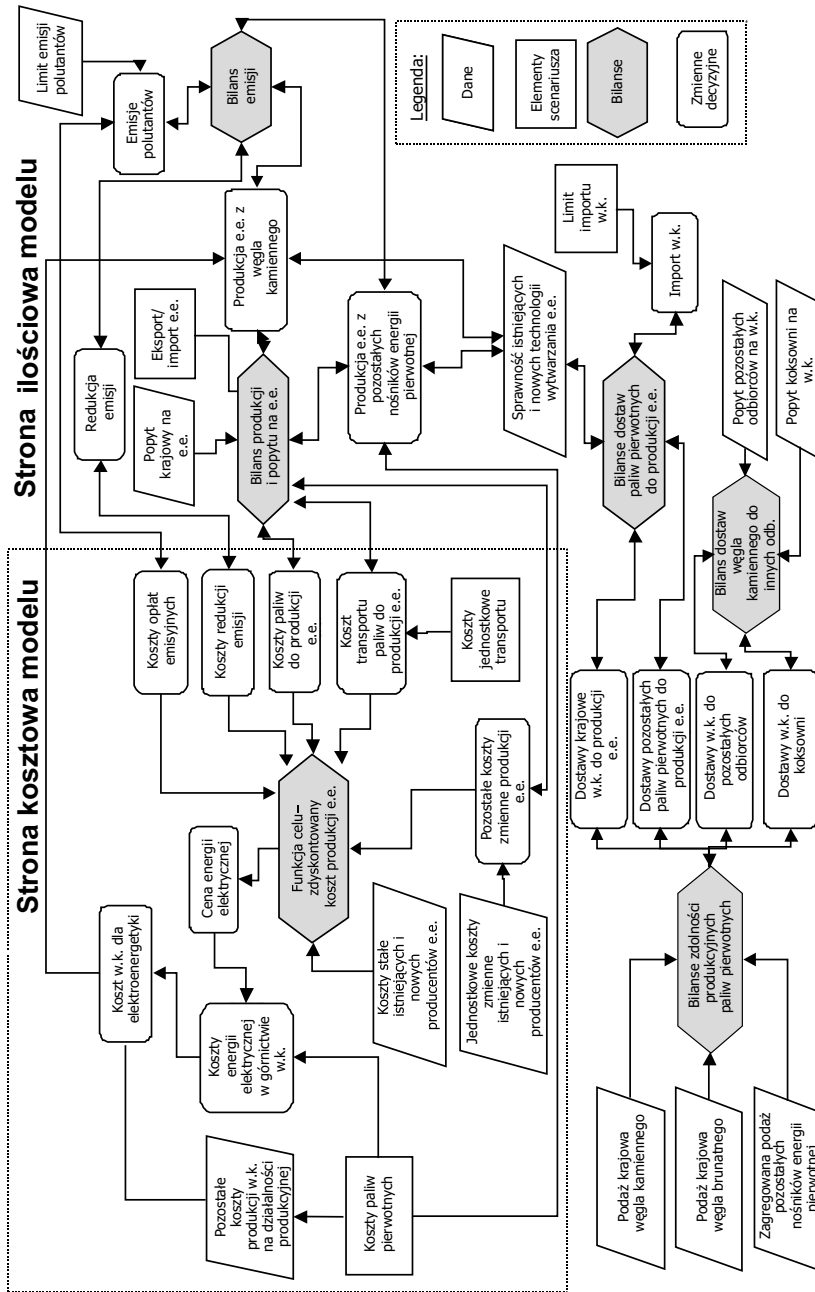
- ✧ modele górnictwa węgla kamiennego i dystrybucji węgla, których celem było określenie perspektyw górnictwa i rozwoju rynku węgla kamiennego w Polsce. Modele górnictwa pozwalały na analizę zmian w strukturze funkcjonowania tego sektora, w tym: likwidację i uruchamianie kopalń, budowę zakładów pogłębionego wzbogacania węgla oraz instalacji odsalania wód kopalnianych. Model górnictwa badał również konkurencyjność węgla krajowego w stosunku do importowanego. Model dystrybucji węgla kamiennego analizował te elementy rynku węgla, które wpływały na poziom cen, a więc koszty pozyskania węgla krajowego, koszty transportu oraz ceny węgla importowanego. Czynniki te determinowały poziom cen węgla na rynku oraz jego dystrybucję ze źródeł krajowych oraz importu (Suwała 1995);

- ✧ model do analizy i optymalizacji funkcjonowania górnictwa węgla kamiennego, którego głównym celem było stworzenie narzędzia do wspomagania procesów decyzyjnych w zakresie restrukturyzacji i programowania rozwoju na szczeblu całej branży wydobycia węgla kamiennego. Model ten miał za zadanie określenie racjonalnego zakresu restrukturyzacji zatrudnienia i ewentualnej likwidacji kopalń, przy różnych warunkach funkcjonowania górnictwa (Suwała i in. 2003);
- ✧ model do analizy rozwoju czystych technologii węglowych przy istotnych ograniczeniach wynikających z regulacji środowiskowych. W modelu tym uwzględniono najważniejsze czynniki wpływające na kształtowanie się wykorzystania nowych technologii węglowych do produkcji energii elektrycznej i ciepła dla różnych scenariuszy badawczych, odzwierciedlających założenia w kwestii kształtowania się regulacji środowiskowych oraz ewentualnych dotacji na zmianę technologii wytwarzania (Suwała i in. 2004, 2005);
- ✧ model efektywnej alokacji zasobów w krajowym systemie energetycznym, którego celem było określenie najkorzystniejszej ścieżki rozwoju krajowej energetyki według określonego kryterium (efektywności kosztowej, maksymalizacji dobrobytu prywatnego lub maksymalizacji dobrobytu społecznego), przy ograniczeniach wynikających z dostosowania polskiego systemu energetycznego do zmieniających się warunków gospodarczych i środowiskowych (Kudełko 2003);
- ✧ model opracowany we współpracy z Polskimi Sieciami Elektroenergetycznymi S.A. w latach 1998–2003, wykorzystywany do wyznaczania optymalnej struktury dostaw węgla do podsystemu wytwarzania energii elektrycznej z uwzględnieniem kryterium jakościowego i kosztowego (Kamiński i in. 2002).

1. Koncepcja odwzorowania oddziaływań między dostawcami paliw do produkcji energii elektrycznej i sektorem energetycznym

W prezentowanym modelu zaimplementowane zostały jedynie najważniejsze oddziaływania występujące pomiędzy dostawcami paliw do produkcji energii elektrycznej (ze szczegółowym odzwierciedleniem sektora węgla kamiennego) oraz wytwórcami energii elektrycznej. Z punktu widzenia teorii modelowania opracowany model jest sektorowym modelem równowagi cząstkowej (*partial equilibrium*). Schemat blokowy modelu przedstawiono na rysunku 1.

Na schemacie wyróżniono dwie strony modelu (ilościową i kosztową) wraz z wzajemnymi powiązaniem między nimi. Strona ilościowa odpowiedzialna jest za zapewnienie wymaganego poziomu wielkości zmiennych decyzyjnych poprzez ich zbilansowanie w zaimplementowanych w modelu bilansach ilościowych. Najważniejszym elementem strony kosztowej jest funkcja celu, na której wartość wpływają elementy modelu występujące po



Rys. 1. Schemat modelu
 Źródło: Opracowanie własne (szerzej Kamiński, 2006)

Fig. 1. The structure of the model

stronie ilościowej. Model optymalizując funkcję celu, którą jest zdyskontowany koszt produkcji energii elektrycznej, dobiera wartości zmiennych decyzyjnych tak, aby koszt ten był jak najmniejszy, przy spełnieniu wszystkich ograniczeń.

Część podaży modelu reprezentują dostawcy paliw pierwotnych do produkcji energii elektrycznej. W szczególności uwzględniono dostawców: węgla kamiennego (indywidualne kopalnie zagregowane do poziomu spółek węglowych i samodzielnych kopalń oraz źródła dostaw importowych), węgla brunatnego (indywidualne kopalnie), gazu ziemnego (dane zagregowane z podziałem na kraj i import), ropy naftowej (dane zagregowane z podziałem na kraj i import) oraz potencjał energii wodnej, energii słonecznej oraz biomasy. Możliwości dostaw paliw są ograniczone maksymalną podażą roczną, natomiast rzeczywiste dostawy paliw do produkcji są zmiennymi decyzyjnymi obliczanymi w modelu.

Strona popytowa została w modelu szczegółowo zaimplementowana jedynie w odniesieniu do sektora elektroenergetycznego. Dokonano podziału na dwie ogólne kategorie:

- ✧ istniejących producentów energii elektrycznej (uwzględniające planowane przez nich inwestycje modernizacyjne i odtwórcze),
- ✧ nowych producentów lub nowe inwestycje nie uwzględnione w dotychczasowych planach modernizacyjnych i odtwórczych przez funkcjonujących na rynku producentów.

W odniesieniu do pierwszej kategorii zaimplementowano: elektrownie i elektrociepłownie zawodowe na węgiel kamienny, węgiel brunatny, gaz ziemny; przemysłowe na węgiel kamienny, gaz ziemny, biomasę, elektrownie wiatrowe, elektrownie wodne. Jedynie w odniesieniu do elektrowni i elektrociepłowni na węgiel kamienny i brunatny zaimplementowano każdego z producentów osobno. Pozostali producenci reprezentowani są w modelu w postaci zagregowanej.

W odniesieniu do drugiej kategorii zaimplementowano możliwość funkcjonowania nowych technologii wytwarzania energii elektrycznej. Wybrano następujące technologie: konwencjonalna technologia wytwarzania energii elektrycznej z węgla brunatnego LCT (*Lignite Conventional Technology*), konwencjonalna technologia wytwarzania energii elektrycznej z węgla kamiennego CCT (*Coal Conventional Technology*), technologia wytwarzania energii elektrycznej z węgla kamiennego z wykorzystaniem kotłów fluidalnych na parametry nadkrytyczne PFBC (*Pressurized Fluidised Bed Combustion*), technologia zintegrowanego zgazowania węgla w cyklu kombinowanym IGCC (*Integrated Gasification Combined Cycle*), technologia gazowa GCT (*Gas in Conventional Gas Turbine*), technologia gazowa GGC (*Gas in Gas Turbine Combined Cycle*), wytwarzania energii elektrycznej z biomasy, wytwarzania energii elektrycznej z wody, wytwarzania energii elektrycznej z wiatru.

2. Formuły matematyczne modelu

Formuły matematyczne modelu zaprezentowano poniżej w podziale na funkcję celu oraz równania bilansowe. Równania te przedstawiono na podstawie przyjętego systemu oznaczeń (tab. 1).

TABELA 1. Wykaz oznaczeń stosowanych w opisie modelu

TABLE 1. The symbols used for algebraic representation of the model

Oznaczenie	Opis
1	2
Indeksy	
t	Okres obliczeniowy $t \in T = \{2004, 2005, \dots, 2020\}$
f	Paliwo pierwotne $f \in F = \{\text{GRU_SR, KOKS, 171612, } \dots, 242409, \text{EN_INNE, WB_BEL, WB_TUR, WB_KON, WB_ADA, GAZ, BIOMASA, WODA, WIATR, SŁONCE}\}$
d	Dostawca paliwa pierwotnego do produkcji energii elektrycznej $d \in D = \{\text{JS, KH, BU, BO, SJ, KW, IS, IG, IM, AD, TU, KO, BE, GAZKRA, GAZIMP, ROPKRA, ROPIMP, BIO, WOD, WIA, SLO}\}$
z(d)	Dostawca węgla importowanego = $\{\text{IS, IG, IM}\}$
m	Polutant zanieczyszczający atmosferę w wyniku spalania paliw pierwotnych $m \in M = \{\text{SO}_2, \text{NO}_x, \text{pył, CO}_2\}$
p	Producent energii elektrycznej $p \in P = \{\text{KOZIENICE, LAZISKA, } \dots, \text{WIATR, WODA, LCT_1000, } \dots, \text{LCT_300, CCT_1000, } \dots, \text{CCT_100, PFC_1000, } \dots, \text{PFC_100, ICG_1000, } \dots, \text{ICG_100, GCT_500, } \dots, \text{GCT_5, GGC_500, } \dots, \text{GGC_5, BIO_200, } \dots, \text{BIO_5, WOD_200, } \dots, \text{WOD_5, WIATR_200, } \dots, \text{WIATR_5}\}$
s(p)	Istniejący producenci energii elektrycznej (wraz z planowanymi modernizacjami) = $\{\text{KOZIENICE, } \dots, \text{WODA}\}$
n(p)	Nowe technologie wytwarzania energii elektrycznej = $\{\text{LCT_1000, } \dots, \text{WIATR_5}\}$
o(p)	Producent energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych = $\{\text{WIATR, WODA, BIO_200, BIO_100, BIO_50, BIO_5, WOD_200, WOD_100, WOD_50, WOD_5, WIATR_200, WIATR_100, WIATR_50, WIATR_5}\}$
i	Sektory popytu na węgiel kamienny innych niż elektroenergetyka odbiorców $i \in I = \{\text{koksownie, pozostali odbiorcy}\}$
Parametry technologiczne	
PODAZ_PALIW _{d,f,t}	Podaż paliwa f od dostawcy d w okresie t [PJ]
ZUZYCIE_EE _{d,t}	Zużycie energii elektrycznej u dostawcy d (tylko dostawcy węgla kamiennego) w okresie t [TW·h]
POPYT_INNI _{i,t}	Popyt krajowy innych odbiorców i na węgiel kamienny w okresie t [PJ]
POPYT_ENELE _t	Popyt krajowy na energię elektryczną brutto w okresie t [PJ]
BIL_EKSPIMPEE _t	Bilans eksportu i importu energii elektrycznej (wielkość dodatnia oznacza eksportera netto) w okresie t [PJ]
MAKS_IMPOWK _{z(d),t}	Maksymalny dopuszczalny w ramach danej struktury funkcjonowania sektora wytwarzania energii elektrycznej import węgla kamiennego ze źródła dostaw $z(d)$ w okresie t [PJ]
UDZ_SPOT _t	Udział sprzedaży węgla kamiennego po cenie krótkoterminowej w całkowitej sprzedaży węgla kamiennego do elektroenergetyki w okresie t [%]
ZDOLPROD _{p,t}	Zdolności produkcyjne wytwarzania energii elektrycznej danego producenta lub danej technologii p w okresie t [PJ]
SPRAWNOSC _{p,t}	Sprawność wytwarzania energii elektrycznej danego producenta lub danej technologii p w okresie t [%]

TABELA 1. cd.

TABLE 1. cont.

1	2
Parametry ekonomiczne	
DYSKONTO _t	Czynnik dyskontujący dla każdego okresu $t \in T$
STOPA _t	Stopa dyskontowa w okresie t
KOSZT_PALIW _{d,f,t}	Koszt dostaw paliwa f pochodzącego od dostawcy d w okresie t [zł/GJ]
KOSZT_TRANSP _{d,p,f,t}	Koszt transportu paliwa f od dostawcy d do producenta energii elektrycznej p w okresie t [mln zł/PJ]
UDZ_EE _{d,t}	Udział kosztów energii elektrycznej w kosztach produkcji węgla kamiennego u dostawcy d (tylko dostawcy węgla kamiennego) w okresie t [%]
UDZ_KS _t	Udział kosztu stałego w kosztach całkowitych produkcji węgla kamiennego w okresie t [%]
OPEMI _m	Oплата za emisję 1 kton polutanta m (dla CO ₂ – оплата за emisję 1 mln ton) [mln zł]
KOSZTREDEMISJI _{m,t}	Koszty redukcji emisji 1 kton polutanta m w okresie t [mln zł/kton] (dla CO ₂ – mln zł/mln ton)
KOSZT_ZINNE _{p,t}	Koszty zmienne pozostałe (w tym koszty materiałów) producenta energii elektrycznej p w okresie t [zł/MW·h]
KOSZT_SWYN _{p,t}	Koszty stałe wynagrodzeń producenta energii elektrycznej p w okresie t [mln zł]
KOSZT_SAMORT _{p,t}	Koszty stałe amortyzacji producenta energii elektrycznej p w okresie t [mln zł]
KOSZT_SINNE _{p,t}	Pozostałe koszty stałe producenta energii elektrycznej p w okresie t [mln zł]
OPLATA_PRZESYL _t	Opłaty przesyłowe [zł/MWh]=[mln zł/TW·h]
Parametry emisyjne	
WSPEMISJI _{d,f,m,t}	Współczynnik emisji polutanta m ze spalania paliwa f od dostawcy d w okresie t [g/GJ]
REDEMI _{p,m,t}	Redukcja emisji polutanta m spalane go przez producenta p w okresie t
LIMITKRAJ _{m,t}	Krajowy limit emisji polutanta m w okresie t [kton] (dla CO ₂ [mln ton])
Zmienne decyzyjne	
DOSTAWY _{d,p,f,t}	Dostawy paliwa f do producentów energii elektrycznej p od dostawcy d w okresie t [PJ]
DOSTINNI _{d,i,f,t}	Dostawy węgla kamiennego do innych odbiorców [PJ]
STANPROD _{p,t}	Zmienna binarna określająca stan producenta energii elektrycznej p w okresie t (0 – nie produkuje 1 – produkuje)
PRODENELE _{p,t}	Produkcja energii elektrycznej przez producenta p w okresie t [PJ]
EMISJA _{p,m,t}	Emisja polutanta m ze spalania paliw pierwotnych przez producenta p w okresie t [kton] (dla CO ₂ – [mln ton])
REDEMINST _{p,m,t}	Redukcja emisji polutanta m przez producenta p w okresie t [kton]
SKL_KOSZT_EE _{d,t}	Składnik kosztów energii elektrycznej w koszcie paliwa od dostawcy d w okresie t [mln zł]
KOSZT	Zdyskontowane koszty funkcjonowania sektora wytwarzania energii elektrycznej – funkcja celu [mln zł]

Źródło: Opracowanie własne

2.1. Kryterium optymalizacji – funkcja celu

Funkcją celu – kryterium optymalizacji – była minimalizacja zdyskontowanych kosztów wytwarzania energii elektrycznej wyrażona następującym równaniem:

$$\begin{aligned}
 KOSZT = & \sum_{t \in T} DYSKONTO_t \cdot \left[\sum_{d \in D} SKL_KOSZT_EE_{d,t} + \right. \\
 & + \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \left(DOSTAWY_{d,p,f,t} \cdot KOSZT_PALIW_{d,f,t} \cdot (1-UDZ_SPOT_d) \cdot (1-UDZ_EE_{d,t}) \right) + \\
 & + \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} \left(DOSTAWY_{d,p,f,t} \cdot KOSZT_PALIW_{d,f,t} \cdot UDZ_SPOT_d \cdot (1-UDZ_KS_{d,t}) \cdot (1-UDZ_EE_{d,t}) \right) + \\
 & + \sum_{d \in D} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} (DOSTAWY_{d,p,f,t} \cdot KOSZT_TRANSP_{d,p,f,t}) + \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{m \in M} (EMISJA_{p,m,t} \cdot OPLEMI_m + REDEMISJI_{p,m,t} \cdot KOSZTREDEMISJI_{m,t}) + \\
 & + \sum_{p \in P} (PRODENELE_{p,t} / 3,6 \cdot KOSZT_ZINNE_{p,t}) + \\
 & \left. + \sum_{p \in P} \left(STANPROD_{p,t} \cdot (KOSZT_SWYN_{p,t} + KOSZT_SAMORT_{p,t} + KOSZT_SINNE_{p,t}) \right) \right] \Rightarrow \min
 \end{aligned}$$

Koszty składnika kosztów energii elektrycznej w koszcie węgla kamiennego $SKL_KOSZT_EE_{d,t}$ zostały wydzielone, aby możliwe było uwzględnienie wpływu liberalizacji na koszty energii elektrycznej zakupywanej przez górnictwo węgla kamiennego, a w konsekwencji na koszty produkcji węgla, co ma istotny wpływ na konkurencyjność węgla kamiennego w porównaniu z pozostałymi nośnikami energii pierwotnej, a tym samym wpływa na wielkość zużycia węgla w sektorze energetycznym.

W funkcji celu wydzielono również koszty zakupu węgla kamiennego po cenie długoterminowej oraz koszty zakupu po cenie krótkoterminowej, co wynikało z konieczności uwzględnienia różnych zachowań producentów energii elektrycznej działających w analizowanych strukturach rynkowych. Wydzielenie to umożliwiło przeanalizowanie poprzez scenariusze badawcze skutków sprzedaży określonej procentowo ilości węgla kamiennego do produkcji energii elektrycznej po różnych cenach. Zastosowano następujące założenia w celu obliczenia wspomnianych cen:

- ✧ cena długoterminowa – równa długoterminowemu kosztowi krańcowemu powiększona o zysk producenta,

✧ cena krótkoterminowa (cena rynku *spot*) – równa krótkoterminowemu kosztowi krańcowemu.

Koszty opłat emisyjnych obliczono jako iloczyn emisji $EMISJA_{p,m,t}$ wyrażonej w tysiącach ton oraz opłat emisyjnych $OPLMI_m$. Dodatkowo, ze względu na najbardziej obciążający producentów energii elektrycznej krajowy limit emisji konieczne było uwzględnienie kosztów dodatkowej redukcji emisji obliczonych jako iloczyn dodatkowej redukcji emisji $REDEMINST_{p,m,t}$ oraz jednostkowego kosztu uśrednionego $KOSZTREDEMISJI_{m,t}$.

Zmienna $STANPROD_{p,t}$ określa czy w danym okresie producent wytwarza energię elektryczną, zakupując tym samym paliwo do produkcji, czy też nie. Zmienna ta ma postać binarną i jest konieczna w celu uwzględnienia w rachunku funkcji celu tylko tych kosztów stałych, które są ponoszone przez funkcjonujących producentów energii elektrycznej. Należy podkreślić, że problem ten dotyczy w głównej mierze nowych technologii wytwarzania energii elektrycznej. Dla istniejących producentów wartość $STANPROD_{p,t}$ założona została na poziomie 1, co oznacza że koszty stałe tych producentów są uwzględnione w całym okresie analizy jeśli tylko producenci ci byli uwzględnieni w prognozie produkcji energii elektrycznej.

Obliczenia przeprowadzane zostały w oparciu o rachunek dyskonta, umożliwiający uwzględnienie zmian wartości pieniądza w czasie. Funkcja celu została zdyskontowana na początek okresu analizy (2004 r.) czynnikiem dyskontującym $DYSK_t$ obliczonym według poniższej zależności:

$$\forall_{t \in T} \text{DYSK}_t = (1 + \text{STOPA}_t)^{-O}$$

gdzie O jest liczbą lat od początku analizy do roku, dla którego czynnik dyskontujący jest obliczany.

2.2. Równania bilansowe

Bilans zdolności produkcyjnych paliw pierwotnych wymusza, że suma dostaw paliw pierwotnych do producentów energii elektrycznej oraz suma dostaw węgla kamiennego do innych odbiorców w określonym roku nie może przekroczyć maksymalnej podaży paliw pierwotnych. Zależność ta ma następującą postać matematyczną:

$$\forall_{d \in D} \forall_{f \in F} \forall_{t \in T} \left(\sum_{p \in P} \text{DOSTAWY}_{d,p,f,t} + \sum_{i \in I} \text{DOSTINNI}_{d,i,f,t} \right) \leq \text{PODAZ_PALIW}_{d,f,t}$$

Bilans dostaw węgla kamiennego do innych odbiorców warunkuje, że dostawy węgla kamiennego do innych odbiorców (pozostali odbiorcy krajowi w tym przemysł i gospodarstwa domowe) muszą być równe popytowi zgłaszanemu przez tych odbiorców w danym okresie. Zapis matematyczny tego bilansu ma następującą postać:

$$\forall_{i \in I} \forall_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} DOSTINNI_{d,i,f,t} = POPYT_INNI_{i,t}$$

Ograniczenie importu węgla kamiennego limituje dopływ węgla z importu w ramach określonej struktury funkcjonowania górnictwa węgla kamiennego oraz sektora wytwarzania energii elektrycznej (według przyjętych scenariuszy badawczych). Przyjęto, że dostawy węgla kamiennego z importu nie mogą przekroczyć maksymalnych możliwości importowych. Ograniczenie to ma następującą postać matematyczną:

$$\forall_{z(d) \in D} \forall_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F} DOSTAWY_{z(d),p,f,t} \leq MAKS_IMPOWK_{z(d),t}$$

Jednym z najistotniejszych bilansów funkcjonujących w skonstruowanym modelu jest bilans dostaw paliw pierwotnych do produkcji energii elektrycznej. Bilans ten określa, że produkcja energii elektrycznej u wytwórcy p w okresie t jest nie mniejsza niż iloczyn ilości zużytej energii pierwotnej $DOSTAWY_{d,p,f,t}$ i sprawności przemian energetycznych $SPRAWNOSC_{p,t}$. Zależność ta ujęta jest w poniższym wyrażeniu matematycznym:

$$\forall_{p \in P} \forall_{t \in T} \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} (DOSTAWY_{d,p,f,t} \cdot SPRAWNOSC_{p,t}) \geq PRODENELE_{p,t}$$

Ograniczenie maksymalnych zdolności produkcji energii elektrycznej określa możliwe wykorzystanie zasobów posiadanych przez producentów energii elektrycznej. Przyjęto, że roczna produkcja energii elektrycznej $PRODENELE_{s(p),t}$ przez dostawcę s nie może przekroczyć wielkości o 10% wyższej w stosunku do prognozowanej zdolności produkcyjnej każdego z istniejących producentów w danym okresie $ZDOLPROD_{s(p),t}$. Matematyczna postać tej zależności jest następująca:

$$\forall_{s(p) \in P} \forall_{t \in T} PRODENELE_{s(p),t} \leq 1,1 \cdot ZDOLPROD_{s(p),t}$$

Ograniczenie minimalnej produkcji energii elektrycznej określa dolną granicę wykorzystania zasobów mocy produkcyjnej posiadanych przez istniejących producentów energii elektrycznej. Współczynnik ML jest uzależniony od struktury w jakiej funkcjonuje sektor wytwarzania energii elektrycznej i przyjmuje wartość 0,9 dla scenariusza MON i 0 dla scenariusza LIB. Zapis matematyczny tego warunku przyjmuje następującą postać:

$$\forall_{s(p) \in P} \forall_{t \in T} PRODENELE_{s(p),t} \leq ML \cdot ZDOLPROD_{s(p),t}$$

Kolejnym bilansem funkcjonującym w modelu jest bilans zdolności produkcyjnych nowych technologii. Ogranicza on produkcję energii elektrycznej w nowych technologiach do maksymalnych zdolności produkcyjnych dla zdefiniowanych w modelu technologii. Bilans ten ma następującą postać matematyczną:

$$\forall_{n(p) \in P} \forall_{t \in T} PRODENELE_{n(p),t} \leq STANPROD_{n(p),t} \cdot ZDOLPROD_{n(p),t}$$

Aby zapewnić utrzymanie produkcji w nowych technologiach i wykluczyć sytuacje, w których funkcjonuje ona tylko w jednym roku i później zaprzestaje produkcji, co jest rozwiązaniem bardzo rzadko spotykanym w rzeczywistości, konieczne okazało się wprowadzenie warunku, zgodnie z którym jeśli nowa technologia rozpoczyna produkcję energii, to w kolejnym roku musi ona produkować co najmniej tyle co w roku poprzednim. Zaimplementowano to w modelu poprzez bilans utrzymania produkcji w nowych technologiach, który ma następującą postać matematyczną:

$$\forall_{n(p) \in P} \forall_{t \in T} \text{PRODENELE}_{n(p),t} \geq \text{PRODENELE}_{n(p),t-1}$$

Bilans produkcji i popytu na energię elektryczną określa, że krajowa produkcja energii elektrycznej $\text{PRODENELE}_{p,t}$ musi być co najmniej tak duża, aby pokryć popyt krajowy oraz eksport netto energii elektrycznej, co przedstawiono w poniższej zależności matematycznej:

$$\forall_{t \in T} \sum_{p \in P} \text{PRODENELE}_{p,t} \geq \text{POPYT_ENELE}_t + \text{BIL_EKSPIMPEE}_t$$

Osobną grupę równań bilansowych, ściśle związaną z użytkowaniem węgla przez elektroenergetykę stanowią równania odniesione do uwarunkowań środowiskowych. Pierwszym z nich jest równanie emisji polutantów, w którym obliczana jest wielkość ich emisji do atmosfery. Uwzględnia on wielkość dostaw paliw do produkcji energii elektrycznej ($\text{DOSTAWY}_{d,p,f,t}$), emisyjność paliwa f spalane u wytwórcy p ($\text{WSPEMISJI}_{d,f,m,t}$), zainstalowane instalacje redukcji emisji o określonym współczynniku redukcji ($\text{REDEMI}_{p,m,t}$) oraz ewentualną, dodatkową redukcję emisji $\text{REDEMINST}_{p,m,t}$. Równanie to ma następującą postać matematyczną:

$$\forall_{p \in P} \forall_{m \in M} \forall_{t \in T} \text{EMISJA}_{p,m,t} = \sum_{d \in D} \sum_{f \in F} \text{DOSTAWY}_{d,p,f,t} \cdot \text{WSPEMISJI}_{d,f,m,t} \cdot (1 - \text{REDEMI}_{p,m,t}) / 1000 - \text{REDEMINST}_{p,m,t}$$

Krajowy limit emisji polutantów, bardzo silnie wpływający na możliwe zapotrzebowanie elektroenergetyki na węgiel kamienny, został zaimplementowany w modelu poprzez bilans krajowego limitu emisji¹, o następującej matematycznej postaci:

$$\forall_{m \in M} \forall_{t \in T} \sum_{p \in P} \text{EMISJA}_{p,m,t} \leq \text{LIMITKRAJ}_{m,t}$$

Ostatnim z bilansów koniecznym do zdefiniowania w modelu jest bilans obowiązkowego udziału energii elektrycznej wytworzonej ze źródeł odnawialnych w całkowitej sprzedaży energii elektrycznej do odbiorców finalnych, który wymusza produkcję energii

¹ Oprócz krajowego limitu emisji obowiązują normy obiektowe, jednak te ostatnie pozwalają na większe emisje niż limit ustalony dla kraju w negocjacjach akcesyjnych.

elektrycznej ze źródeł odnawialnych według zobowiązań wynikających z rozporządzeń. W skonstruowanym modelu matematycznym zapisano go w następującej postaci:

$$\forall_{t \in T} \sum_{o(p) \in P} PRODENELE_{o(p),t} \geq UDZ_ODNAW_t \cdot \left(\sum_{p \in P} PRODENELE_{p,t} - BIL_EKSPIMPEE_t \right)$$

Zdefiniowane według powyższego opisu równania bilansowe oraz funkcja celu pozwalają na wybranie odpowiedniego rodzaju programowania matematycznego w celu przeprowadzenia obliczeń, w wyniku których uzyskane zostanie rozwiązanie optymalne. Dzięki zastosowaniu pewnych uproszczeń w definicji funkcji celu oraz równań bilansowych możliwe było zastosowanie metody programowania mieszanego (liniowego i całkowitoliczbowego).

3. Scenariusze badawcze

Opracowano dwa bazowe scenariusze badawcze: scenariusz *MON* odzwierciedla w modelu funkcjonowanie sektora elektroenergetycznego w strukturze zintegrowanego pionowo monopolu państwowego, natomiast założenia przyjęte w scenariuszu *LIB* odpowiadają warunkom funkcjonowania rynku zliberalizowanego. Najważniejsze założenia odnoszące się do tak zdefiniowanych scenariuszy badawczych zestawiono w tabeli 2.

4. Implementacja komputerowa modelu

Odwzorowanie powiązań jakie występują między górnictwem węgla kamiennego i elektroenergetyką wymagało zastosowania odpowiedniego narzędzia. W prezentowanych badaniach wykorzystano system GAMS (*General Algebraic Modelling System*) (Brook i in. 1992), który jest powszechnie używany do rozwiązywania złożonych zadań optymalizacyjnych wymagających przetworzenia dużej ilości danych. GAMS współpracuje z programami do wykonywania obliczeń optymalizacyjnych (*solwerami*), które umożliwiają rozwiązanie zadań programowania liniowego, nieliniowego oraz mieszanego liniowego lub nieliniowego ze zmiennymi całkowitoliczbowymi.

Obliczenia modelowe przeprowadzono na komputerze wyposażonym w procesor INTEL PENTIUM IV 3 GHz z pamięcią 2 GB, pracującym pod systemem operacyjnym Windows XP. Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano najnowszą wersję systemu GAMS 2.0.31.8 wraz z solverem Cplex w wersji 9.1.2 umożliwiającym rozwiązanie modelu ze zmiennymi całkowitoliczbowymi. Czas obliczeń dla wszystkich scenariuszy badawczych wyniósł około 1 godziny.

TABELA 2. Założenia dotyczące scenariuszy badawczych

TABLE 2. Scenarios assumptions

Wyszczególnienie	Scenariusz MON	Scenariusz LIB
1	2	3
Prywatyzacja i komercjalizacja		
Import węgla kamiennego do produkcji energii elektrycznej	Brak możliwości zakupu węgla importowanego	Możliwość zakupu węgla z importu
Koszty wynagrodzeń	Brak działań optymalizujących wielkość zatrudnienia – koszty wynagrodzeń producentów energii elektrycznej na ustalonym (dotychczasowym) poziomie	Koszty wynagrodzeń producentów energii elektrycznej obniżone w stosunku do scenariusza MON, jako skutek restrukturyzacji zatrudnienia
Konkurencja w sektorze wytwarzania energii elektrycznej		
Wielkość produkcji energii elektrycznej	Zdeterminowana – niewielka możliwość zmiany produkcji energii elektrycznej u poszczególnych wytwórców związanych kontraktami długoterminowymi, w których ustalona jest ilość produkowanej energii. W scenariuszu MON przyjęto, że każdy producent może wytwarzać energię w zakresie od 90 do 110% założonych zdolności produkcyjnych	Uzależniona od popytu na energię elektryczną danego producenta zgłaszanego przez odbiorców. Preferowani są wytwórcy o niskich kosztach produkcji, zdolni do zaoferowania niższej ceny na rynku. W scenariuszu LIB założono, że każdy producent może produkować energię elektryczną w zakresie od 0 do 110% założonych zdolności produkcyjnych
Ceny nośników energii pierwotnej do produkcji energii elektrycznej	Cena paliwa przenoszona bezpośrednio na cenę energii elektrycznej. Producenci nie muszą ze sobą konkurować, przez co zazwyczaj nie szukają korzystniejszych opcji produkcji energii elektrycznej na innych paliwach i pozostają przy produkcji energii elektrycznej w oparciu o dotychczas wykorzystywane nośniki. Scenariusze MON_WK, MON_WB, MON_GAZ pozwoliły ocenić jak wzrost cen wybranych nośników energii pierwotnej (o 20% w stosunku do scenariuszy bazowych) wpływa na wielkość zużycia węgla kamiennego przez wytwórców funkcjonujących w ramach założeń przyjętych dla scenariusza MON	Na producentów silnie oddziałują zmiany cen paliw do produkcji energii elektrycznej, dlatego rozważają oni możliwość wykorzystania technologii produkcji energii w oparciu o inne paliwa pierwotne. Producenci mają pełną dowolność w wyborze najbardziej opłacalnego paliwa pierwotnego. Scenariusze LIB_WK, LIB_WB, LIB_GAZ pozwoliły ocenić jak wzrost cen wybranych nośników energii pierwotnej (o 20% w stosunku do scenariuszy bazowych) wpływa na wielkość zużycia węgla kamiennego przez wytwórców na konkurencyjnym rynku energii
Stabilność dostaw paliw	Cały węgiel sprzedawany jest do wytwórców energii elektrycznej w kontraktach długoterminowych, po cenach opartych na kosztach krańcowych długoterminowych	Jako skutek częściowego odejścia od kontraktów długoterminowych na rynku konkurencyjnym i wywierania presji na górnictwo, aby sprzedawało węgiel taniej, 10% węgla kamiennego sprzedawanego jest po cenach opartych na krótkoterminowych kosztach krańcowych.

TABELA 2. cd.

TABLE 2. cont.

1	2	3
Dostęp do kapitału inwestycyjnego na nowe moce wytwórcze	Duża dostępność do kapitału inwestycyjnego dzięki możliwości zabezpieczenia spłaty kredytów kontraktami długoterminowymi na sprzedaż energii. Możliwość wyboru wszystkich rodzajów inwestycji bez względu na koszty inwestycyjne i okres spłaty kredytów. W scenariuszu tym, ze względu na wysokie bariery wejścia, założono także ograniczone możliwości rozwoju generacji rozproszonej	Dostęp do kapitału inwestycyjnego bardzo ograniczony. Preferowane są inwestycje o niższych kosztach inwestycyjnych, a w związku z tym o niższej mocy zainstalowanej. W modelu zaimplementowano możliwość wyboru technologii o mocach nie przekraczających 500 MW
Regulacje w zakresie ochrony środowiska	Dostosowanie do regulacji w zakresie ochrony środowiska w elektroenergetyce dokonywane jest poprzez przeprowadzenie inwestycji w instalacje redukcji emisji, przy utrzymaniu produkcji energii elektrycznej w oparciu o dotychczas wykorzystywane nośniki energii pierwotnej, głównie węgla. Dodatkowo, poprzez scenariusz MON_CO2TAX oceniono wpływ wdrożenia podatku od CO ₂ w wysokości 10 EUR/tonę CO ₂ na popyt na węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej w porównaniu ze scenariuszem MON	Pełna dowolność w wyborze sposobu sprostania regulacjom w zakresie ochrony środowiska. Możliwa jest zarówno inwestycja w instalacje redukcji emisji, zmiana technologii produkcji energii elektrycznej jak i zmiana paliwa do produkcji energii elektrycznej. Dodatkowo, poprzez scenariusz LIB_CO2TAX oceniono wpływ wdrożenia podatku od CO ₂ w wysokości 10 EUR/tonę CO ₂ na popyt na węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej w porównaniu ze scenariuszem LIB
Rozdział działalności i zasada dostępu stron trzecich do sieci		
Możliwość zakupu energii elektrycznej bezpośrednio u wytwórców	Brak możliwości zakupu przez spółki węglowe/kopalnie energii elektrycznej bezpośrednio u wytwórcy. Możliwy jest jedynie zakup energii elektrycznej z zakładów energetycznych po cenach wynikających z taryf zatwierdzanych przez regulatora	Skorzystanie z zasady TPA i wejście na konkurencyjny rynek energii elektrycznej, a przez to kupowanie energii elektrycznej poniżej cen wynikających z taryfy. Założono, że w scenariuszu LIB cała energia elektryczna jest kupowana przez producentów węgla kamiennego po cenie równej kosztowi technicznemu wytworzenia. Konsekwencją jest obniżenie składnika kosztów energii w kosztach produkcji węgla kamiennego, a w związku z tym zwiększenie zysku spółek węglowych
Import i eksport energii elektrycznej na europejskim rynku energii elektrycznej	Eksport energii elektrycznej ograniczony do poziomu 80% eksportu w scenariuszu LIB, co jest skutkiem utrzymywania sztucznych barier wejścia na inne rynki krajowe	Eksport energii elektrycznej na poziomie eksportu z 2004 r.

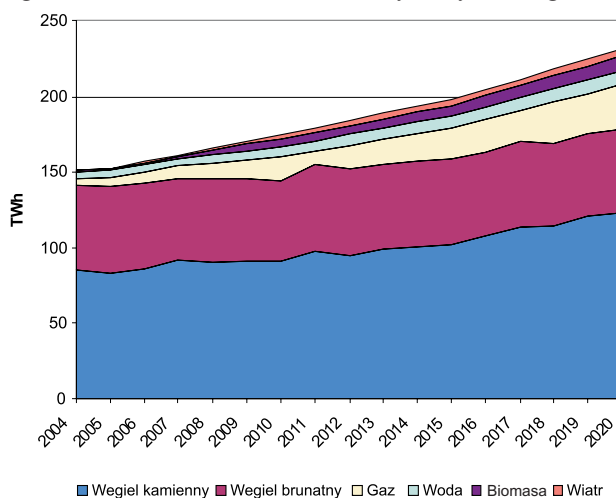
Źródło: Opracowanie własne

5. Ocena wpływu liberalizacji rynku energii elektrycznej na zużycie węgla kamiennego na podstawie wyników badań modelowych

Opisany powyżej model matematyczny posłużył do przeprowadzenia obliczeń, na podstawie których dokonano ilościowego oszacowania wpływu liberalizacji rynku energii elektrycznej na zużycie węgla kamiennego w sektorze elektroenergetycznym.

5.1. Znaczenie węgla kamiennego dla krajowego sektora wytwarzania energii elektrycznej

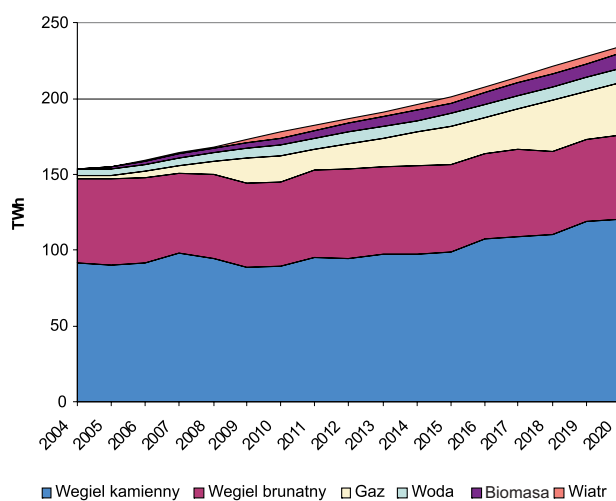
Wielkość produkcji energii elektrycznej z określonego nośnika energii pierwotnej (węgiel kamienny, węgiel brunatny, gaz ziemny, odnawialne źródła energii) decyduje o pozycji jaką zajmuje sektor dostarczający to paliwo pierwotne w gospodarce kraju. W polskim sektorze elektroenergetycznym podstawowym paliwem do produkcji energii elektrycznej wciąż pozostaje węgiel. Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono prognozowaną wielkość produkcji energii elektrycznej w oparciu o różne nośniki energii pierwotnej, odpowiednio dla scenariusza MON i LIB. W przypadku obu scenariuszy charakterystycznym jest rosnąca produkcja energii elektrycznej z węgla kamiennego oraz względnie stała produkcja energii z węgla brunatnego. Rośnie natomiast znacznie wykorzystanie gazu ziemnego i odna-



Rys. 2. Produkcja energii elektrycznej według zużywanych nośników energii pierwotnej, scenariusz MON [TW·h]

Fig. 2. Production of electricity, MON scenario [TW·h]

Źródło: Opracowanie własne



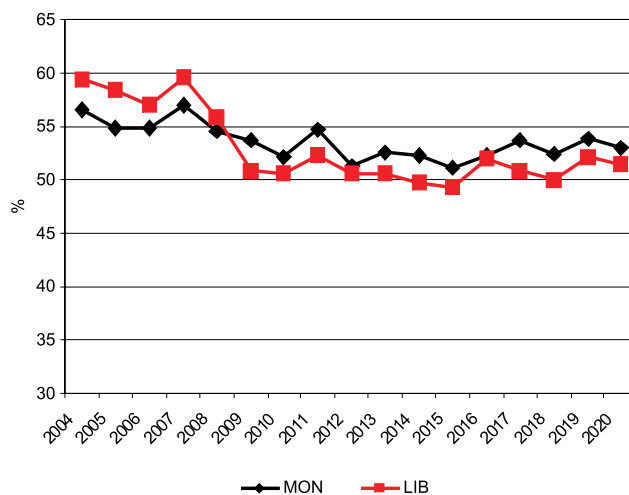
Rys. 3. Produkcja energii elektrycznej według zużywanych nośników energii pierwotnej, scenariusz LIB [TWh]

Fig. 3. Production of electricity, LIB scenario [TWh]

Źródło: Opracowanie własne

wialnych źródeł energii, co jest przede wszystkim skutkiem zaostrzenia regulacji środowiskowych.

Udział energii wytwarzanej z węgla kamiennego utrzymuje się na poziomie około 52 – 57% w scenariuszu MON i generalnie można go uznać za stabilny. Natomiast w przypadku scenariusza LIB zauważalny jest spadek z około 60% w 2004 r. do około 50% w 2009 r. W dalszym okresie udział ten pozostaje na względnie stabilnym poziomie około 50%



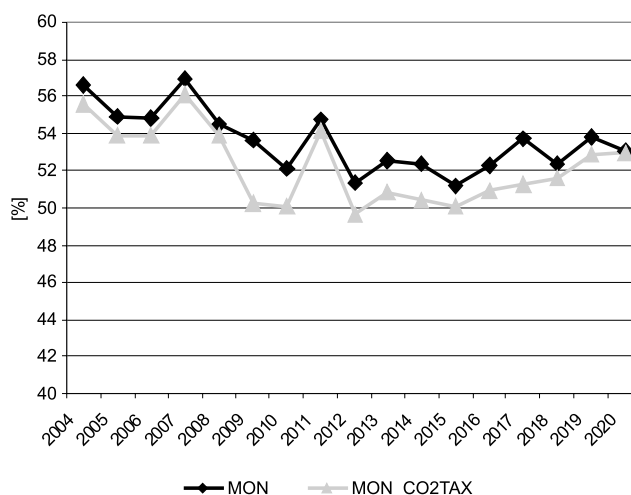
Rys. 4. Udział energii elektrycznej wytworzonej z węgla kamiennego, scenariusze MON, LIB [%]

Fig. 4. Share of electricity produced in hard coal power plants; MON, LIB scenarios [%]

Źródło: Opracowanie własne

(rys. 4). Zmniejszenie udziału węgla kamiennego w scenariuszu LIB jest pokrywane przede wszystkim przez producentów wykorzystujących gaz ziemny.

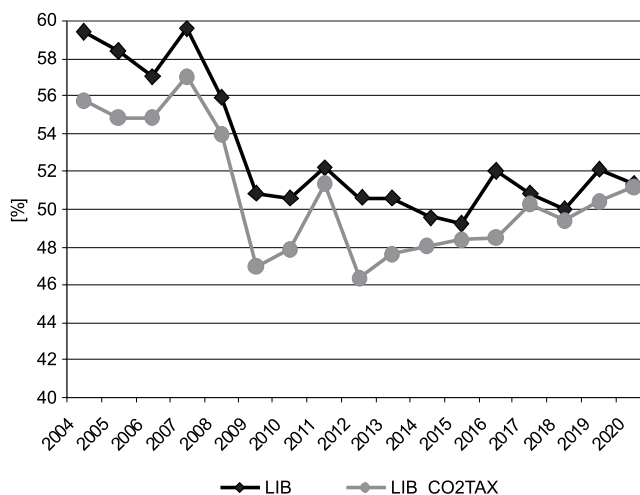
Z punktu widzenia celu niniejszej pracy istotne jest również porównanie udziału węgla kamiennego w produkcji energii elektrycznej w scenariuszach MON i LIB ze scenariuszami MON_CO2TAX i LIB_CO2TAX zakładającymi opodatkowanie emisji CO₂ (rys. 5 i 6). Podatek od emisji CO₂ znacznie zwiększa koszty funkcjonowania wytwórców co powoduje,



Rys. 5. Udział energii elektrycznej wytworzonej z węgla kamiennego, scenariusz MON, MON_CO2TAX [%]

Fig. 5. Share of electricity produced in coal-fired power plants; MON, MON_CO2TAX scenarios [%]

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 6. Udział energii elektrycznej wytworzonej z węgla kamiennego, scenariusz LIB, LIB_CO2TAX [%]

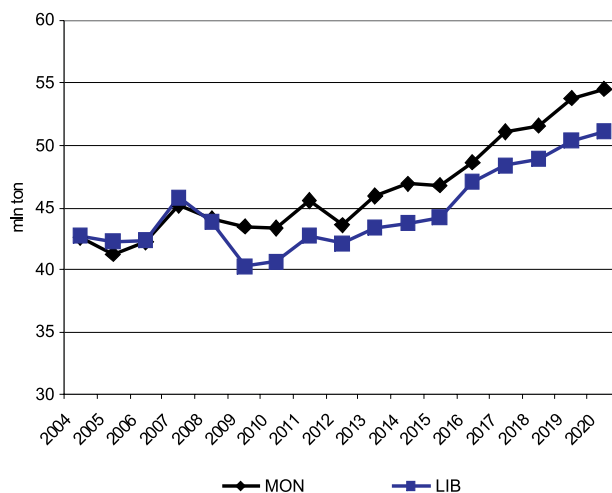
Fig. 6. Share of electricity produced in coal-fired power plants; LIB, LIB_CO2TAX scenarios [%]

Źródło: Opracowanie własne

że część z nich zaczyna produkować energię elektryczną w oparciu o inne nośniki energii pierwotnej. Skutkuje to jednocześnie ograniczeniem popytu na węgiel kamienny. W obu scenariuszach bazowych zauważalny jest znaczny spadek udziału energii elektrycznej produkowanej z węgla kamiennego, przy czym poziom ograniczenia produkcji energii na bazie węgla kamiennego jest wyższy w strukturze rynku zliberalizowanego niż w strukturze zmonopolizowanej. Wynika to z większej skłonności producentów funkcjonujących na rynku konkurencyjnym do poszukania jak najtańszego sposobu wytwarzania energii elektrycznej.

5.2. Popyt na krajowy węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej

W analizowanym okresie zauważalny jest istotny wzrost popytu na węgiel kamienny do wytwarzania energii elektrycznej, zarówno w scenariuszu MON jak i LIB, z około 42,5 mln ton w 2004 r. do około 54,5 mln ton dla scenariusza MON i 51 mln ton dla scenariusza LIB w 2020 r. (rys. 7). O ile do 2008 r. wielkość zużycia węgla kamiennego jest praktycznie taka sama w obu scenariuszach, to w późniejszych latach różnice między nimi stają się już istotne. Przejściowe ograniczenie zużycia węgla w sektorze elektroenergetycznym w latach 2009 – 2012 związane jest z nałożeniem na elektroenergetykę ostrzejszych regulacji emisyjnych. Natomiast różnice w popycie na węgiel kamienny wynikają z odmiennego sposobu funkcjonowania przedsiębiorstw energetycznych w obu analizowanych strukturach rynkowych. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzić można, że w scenariuszu MON zużycie węgla jest znacznie wyższe po 2008 r., a różnice między scenariuszami utrzymują się na poziomie 1,5–3 mln ton praktycznie do końca analizowanego okresu. Całkowita różnica popytu na węgiel kamienny w latach 2004–2020 wynosi około 31 mln ton.

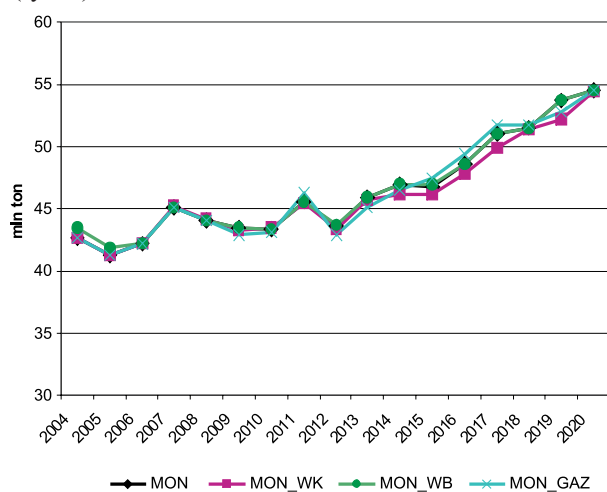


Rys. 7. Popyt na krajowy węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej, scenariusze MON i LIB [mln ton]

Fig. 7. Demand for domestic hard coal from electricity producers; MON, LIB scenarios [mln ton]

Źródło: Opracowanie własne

Producent energii elektrycznej funkcjonujący w monopolistycznej strukturze rynku nie będąc poddanym presji konkurencyjnej nie wykazuje działań zmierzających do redukcji kosztów wytwarzania. Dlatego też zwykle nie szuka możliwości produkcji energii elektrycznej nawet w oparciu o atrakcyjniejsze cenowo nośniki energii pierwotnej. Wyniki obliczeń potwierdziły niewielką skłonność wytwórców energii funkcjonujących w takiej strukturze rynkowej do zmiany paliwa pierwotnego, nawet w przypadku założenia wzrostu ceny wybranego paliwa o 20% (w scenariuszach MON_WK, MON_WB, MON_GAZ) w stosunku do scenariusza bazowego (MON). Popyt na węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej praktycznie nie zmienia się bez względu na kształtowanie się cen nośników energii (rys. 8).

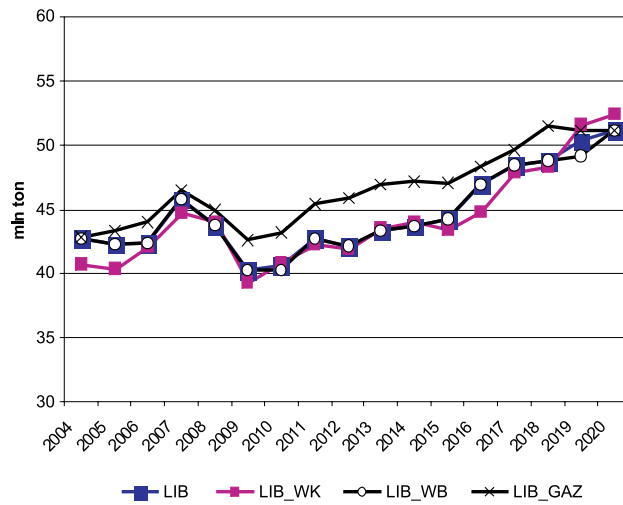


Rys. 8. Popyt na krajowy węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej, scenariusze MON, MON_WK, MON_WB, MON_GAZ [mln ton]

Fig. 8. Demand for domestic hard coal from electricity producers; MON, MON_WK, MON_WB, MON_GAZ scenarios [mln ton]

Źródło: Opracowanie własne

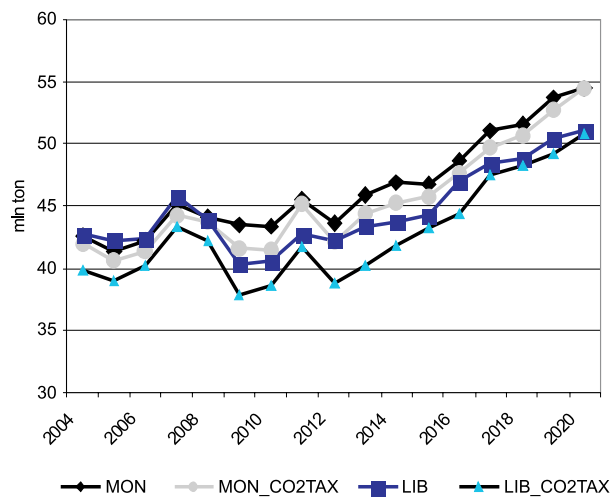
Odmierna sytuacja obserwowana jest w przypadku rynku zliberalizowanego, w którym na producentów energii elektrycznej silniej oddziałują bodźce cenowe. O ile założenie zwiększonej o 20% ceny węgla kamiennego (LIB_WK) lub węgla brunatnego (LIB_WB) praktycznie nie wpływa na poziom dostaw węgla kamiennego do sektora elektroenergetycznego, to w przy założeniu wzrostu ceny gazu o 20% (LIB_GAZ) następuje istotny wzrost zapotrzebowania na węgiel kamienny. Różnice te, wynikające ze zwiększonego w stosunku do scenariusza bazowego (LIB) obciążenia mocy opartych na węglu kamiennym oraz zwiększenia inwestycji w technologie węglowe, obserwowane są szczególnie w okresie 2009–2015 i sięgają nawet 3,7 mln ton. W całym badanym okresie różnica w stosunku do scenariusza bazowego kształtuje się na poziomie 32 mln ton (rys. 9). Tak więc zmiany cen gazu ziemnego, które w niewielkim stopniu przekładają się na poziom zapotrzebowania na węgiel w monopolistycznej strukturze sektora elektroenergetycznego mają istotne znaczenia dla kształtowania się popytu wytwórców energii działających w strukturze zliberalizowanej.



Rys. 9. Popyt na krajowy węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej, scenariusze LIB, LIB_WK, LIB_WB, LIB_GAZ [mln ton]

Fig. 9. Demand for domestic hard coal from electricity producers; LIB, LIB_WK, LIB_WB, LIB_GAZ scenarios [mln ton]

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 10. Popyt na krajowy węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej, scenariusze MON, MON_CO2TAX, LIB, LIB_CO2TAX [mln ton]

Fig. 10. Demand for domestic hard coal from electricity producers; MON, MON_CO2TAX, LIB, LIB_CO2TAX scenarios [mln ton]

Źródło: Opracowanie własne

Istotne znaczenie dla wytwórców energii elektrycznej mają uwarunkowania środowiskowe, które w znacznym stopniu determinują zainteresowanie węglem kamiennym. Restrykcyjna polityka w zakresie ograniczenia negatywnego wpływu wytwarzania energii elektrycznej na środowisko skutkuje coraz większymi obciążeniami producentów spalających węgiel. Jednak odmienne jest podejście do rozwiązywania problemów środowiskowych producentów funkcjonujących w analizowanych strukturach rynkowych. Ewentualne wprowadzenie podatku węglowego² na poziomie 10 EUR/tonę CO₂ skutkowałoby znacznie mniejszym ograniczeniem dostaw węgla kamiennego do produkcji energii elektrycznej w scenariuszu zakładającym istnienie monopolu (MON) w porównaniu do scenariusza rynku zliberalizowanego (LIB). Wprowadzenie takiego podatku spowodowałoby zmniejszenie popytu na węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej o około 18 mln ton na rynku funkcjonującym jako monopol i o 32,5 mln ton na rynku zliberalizowanym. Tak więc producenci funkcjonujący na rynku zliberalizowanym prawdopodobnie ograniczyliby zużycie węgla kamiennego do produkcji energii elektrycznej (rys. 10).

Podsumowanie

Problematyka oceny wpływu liberalizacji rynku energii elektrycznej na zużycie węgla kamiennego w sektorze elektroenergetycznym jest jedną z istotniejszych dla krajowych producentów węgla kamiennego. Wynika ona z dużego wzajemnego uzależnienia górnictwa węglowego i sektora wytwarzania energii elektrycznej, co ma swoje źródło w specyficznych warunkach jakie ukształtowały się w Polsce. Liberalizacja rynku energii elektrycznej zmieniając warunki funkcjonowania sektora wytwarzania energii elektrycznej oddziałuje również na poziom zużycia węgla kamiennego w sektorze elektroenergetycznym. Wynika to z faktu, że podmioty działające na rynku zliberalizowanym mając większą niezależność w zakresie podejmowania decyzji mogą dokonywać wyboru nie tylko dostawcy węgla kamiennego do produkcji energii elektrycznej (także węgla importowanego), ale w skrajnym wypadku mogą nawet z tego nośnika energii zrezygnować, co niekorzystnie wpłynęłoby na sytuację krajowych producentów węgla. Jednocześnie liberalizacja umożliwia spółkom węglowym kupowanie energii elektrycznej bezpośrednio od elektrowni, elektrociepłowni lub spółek obrotu, co wpływa na redukcję kosztów energii, a w konsekwencji na koszty wydobycia węgla.

Wykorzystanie analizy systemowej i modelowania matematycznego jest najwłaściwsze przy tak zdefiniowanym problemie badawczym i liczbie wzajemnie oddziałujących na siebie czynników. Model uwzględniający oddziaływanie pomiędzy sektorem elektroenergetycznym i dostawcami paliw do produkcji energii elektrycznej zaimplementowany został w systemie GAMS. Ocena wpływu liberalizacji rynku energii elektrycznej na zużycie węgla

² Ograniczanie emisji CO₂ jest obecnie podstawowym uwarunkowaniem środowiskowym dla funkcjonowania sektorów energetycznych. Wprowadzone w UE limity emisji, które również obowiązują Polskę, mogą dać wyniki zbliżone do skutków wprowadzenia podatku węglowego.

kamiennego w sektorze elektroenergetycznym przeprowadzono porównując wyniki badań modelowych dla dwóch bazowych scenariuszy badawczych. W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że:

- ✧ pozycja węgla kamiennego jako głównego paliwa utrzymuje się na wysokim poziomie, jednakże udział energii wytworzonej z węgla kamiennego w scenariuszu MON kształtuje się na poziomie wyższym (ok. 52–57%) niż w przypadku scenariusza LIB (spadek z ok. 60% w 2004 r. do ok. 50% w 2009 i w latach następnych). Biorąc pod uwagę udział produkcji energii elektrycznej w nowych technologiach węglowych w całkowitej produkcji nowych technologii, wyniki obliczeń wskazują, że w przypadku scenariusza MON byłby on około 15–20% wyższy niż w przypadku scenariusza LIB. Pełna liberalizacja rynku skutkować może zatem mniejszym udziałem nowych technologii węglowych niż miałyby to miejsce w przypadku rynku zmonopolizowanego;
- ✧ popyt na węgiel kamienny do produkcji energii elektrycznej w scenariuszu MON jest znacznie wyższy (po 2008 r.), a różnice między scenariuszami utrzymują się na poziomie 1,5–3 mln ton praktycznie do końca analizowanego okresu, to jest do 2020 r. Całkowity popyt na węgiel kamienny jest wyższy dla scenariusza MON, a różnica między scenariuszami w latach 2004 – 2020 wynosi około 31 mln ton.

Literatura

- [1] BROOK A., KENDRICK D., MEERAUS A., 1992 — GAMS Users' Guide, release 2.54, The Scientific Press, San Francisco.
- [2] BUNN D.W., LARSEN E.R., 1997 — System Modelling for Energy Policy, John Wiley & Sons, London.
- [3] CAPROS P., 1998 — The PRIMES Energy System Model Reference Manual, National Technical University of Athens.
- [4] CRIQUI P., 2001 — POLES Perspective Outlook on Long-term Energy Systems, [l'Université Pierre Mendès, Grenoble France]
- [5] ETSAP – The Energy Technology Systems Analysis Programme, 2004, www.etsap.org.
- [6] KAMIŃSKI J., 2006 — Wpływ liberalizacji rynku energii elektrycznej na górnictwo węgla kamiennego, IGSMiE PAN, Kraków.
- [7] KAMIŃSKI J., KUDELKO M., KWIATKOWSKI M., SUWAŁA W., WAWRZYSCZUK M., 2002 — Bilansowanie dostaw węgla dla potrzeb długoterminowego planowania rozwoju wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, *Polityka Energetyczna* t. 5, z. spec., IGSMiE PAN, Kraków.
- [8] KUDELKO M., 2003 — Efektywna alokacja zasobów w krajowym systemie elektroenergetycznym, *Studia, Rozprawy, Monografie* nr 121, IGSMiE PAN, Kraków.
- [9] SUWAŁA W., 1995 — *Badania modelowe perspektyw górnictwa i rynku węgla kamiennego w Polsce* (praca habilitacyjna), *Studia, Rozprawy, Monografie* nr 38, CPPGSMiE PAN, Kraków.
- [10] SUWAŁA W., KUDELKO M., KAMIŃSKI J., 2003 — Model komputerowy do analizy i optymalizacji funkcjonowania górnictwa węgla kamiennego, IGSMiE PAN, Kraków.
- [11] SUWAŁA W., KUDELKO M., KAMIŃSKI J., 2004 — Modelowanie rozwoju technologii czystego węgla, *Polityka Energetyczna* t. 7, z. spec., IGSMiE PAN, Kraków.

[12] SUWAŁA W., KUDELKO M., KAMIŃSKI J., 2005 — Modelling clean fossil fuels technologies deployment. IGSMiE PAN, Kraków.

Jacek KAMIŃSKI

Electricity market liberalization and coal consumption in energy sector – modelling approach

Abstract

The paper presents mathematical model for quantitative analysis of the impact of electricity market liberalisation on coal consumption in the energy sector. The most important models for the prognosis of long term development of energy sector were presented. The relations between electricity sector and primary energy suppliers with the mathematical representation were described. The model was implemented in GAMS system. To determine the impacts of electricity market liberalisation two base scenarios (LIB and MON) and several additional scenarios were implemented. Basing on the results of model calculations for different scenarios the impact of electricity market liberalisation on coal consumptions in the energy sector was estimated. The paper ends with main conclusions.

KEY WORDS: electricity market liberalization, hard coal, mathematical modelling