

*Prof.dr hab.inż. Janusz Kotowicz  
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych  
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Politechnika Śląska  
Ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice  
e-mail: [janusz.kotowicz@polsl.pl](mailto:janusz.kotowicz@polsl.pl)*

***Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Sobotki  
pt. „ Modelowanie prognostyczne cen energii elektrycznej na rynku polskim”***

**A. Wprowadzenie**

Umiejętność wyznaczania – prognozowania ceny elektrycznej w przyszłości zarówno krótko jak i szczególnie długoterminowej jest kluczowa z punktu widzenia rozwoju gospodarki i społeczeństwa. Pozwala ona planować strategię rozwoju producentów energii elektrycznej; planować i koordynować rozwój sieci elektroenergetycznych przesyłowych i dystrybucyjnych. Cena energii elektrycznej ma także wpływ na planowanie kosztów działalności i rozwoju przedsiębiorstw z sektorów innych niż energetyczne, w szczególności tych energochłonnych. Uwzględniając powyższe, tematykę pracy mgr inż. Anny Sobotki należy uznać za ważną zarówno z poznawczego jak i użytecznego charakteru prac naukowo-badawczych.

**B. Zakres rozprawy**

Praca doktorska mgr inż. Anny Sobotki zawiera łącznie 191 stron, na które składa się 11 merytorycznych rozdziałów, streszczenie (w języku polskim i

angielskim), spis treści, wykaz stosowanych oznaczeń, bibliografia, spisy: rysunków i tabel oraz załączniki.

W recenzowanej rozprawie zasadniczo można wyróżnić 3 części.

W pierwszej części teoretycznej Autorka scharakteryzowała rynek energii elektrycznej w Polsce wraz z opisem jego specyficznych cech i jego struktury przedmiotowej, w tym rynku: kontraktów bilateralnych, giełdowego, bilansującego i mocy. Podała w tej części podstawowe informacje związane z KSE ((krajowym Systemem Elektroenergetycznym), w tym strukturę mocy KSE i strukturę produkcji. Zdefiniowała i przybliżyła JWCD (Jednostki Wytwórcze Centralnie Dysponowane). Zwróciła uwagę na główne wyzwanie stojące przed krajową elektroenergetyką. W rozdziale 1.1. Autorka określiła cel pracy jako próbę udzielenia odpowiedzi na pytanie: Jak będzie się kształtowała cena energii elektrycznej na rynku hurtowym w perspektywie długoterminowej w zależności od przyjętych założeń makroekonomicznych i scenariusza rozwoju KSE.

W części pierwszej (rozdział 4) Autorka przedstawiła przegląd i klasyfikację różnych metod i modeli prognozowania cen energii elektrycznej. Jako wprowadzenie do drugiej części pracy mgr inż. Anna Sobotka w rozdziale 5 analizowała determinanty cen energii elektrycznej; zasadniczo wymieniła ich 9, w tym: ceny surowców energetycznych, kursy walutowe, koszty środowiskowe, strukturę mocy zainstalowanej, zapotrzebowanie na energię w KSE, utrzymanie i rozwój infrastruktury przesyłowej, tempo wzrostu PKB, warunki pogodowe.

W części drugiej (bardzo obszernej 72-stronicowej, obejmującej rozdziały 6, 7 i 8) przedstawiono algorytm konstrukcji modelu symulacji prognostycznych hurtowych cen energii elektrycznej w perspektywie długoterminowej dla rynku polskiego (rozdział 6). W pierwszej kolejności przedstawiono mechanizm kształtowania się ceny energii elektrycznej na rynku, wyjaśniając mechanizm „merit order” (uporządkowanie źródeł produkcji względem wysokości kosztów krańcowych). Następnie przedstawiono koncepcję budowy przedmiotowego narzędzia i jego schemat ideowy. Przedstawiono równania, które pozwalają

wyznaczyć prognozowaną produkcję poszczególnych źródeł lub grup źródeł i ich związku z prognozowanym zapotrzebowaniem na energię elektryczną w KSE. Efektem obliczeń są zarówno ceny energii elektrycznej w każdej „i” tej godzinie „j”-tego roku, jak również struktura wytwarzania energii elektrycznej w poszczególnych źródłach – i ceny energii z tych źródeł, czas ich wykorzystania, emisje CO<sub>2</sub>.

W części drugiej mgr inż. Anna Sobotka zestawia też źródła danych i miejsca skąd je uzyskała (rozdział 7) oraz poszczególne etapy budowy modelu, jak i kluczowe założenia i dane wsadowe do symulacji przeprowadzonych w recenzowanej pracy (rozdział 8). Autorka przedstawia tu m.in.: ceny energii elektrycznej RDN, TGE, ceny gazu ziemnego, ceny węgla kamiennego i ceny uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> – wszystkie za lata 2018 ÷ maj 2023. Założenia makroekonomiczne przyjęte przez Doktorantkę do modelowania objęły przewidywaną inflację, kursy walut, ceny paliw i uprawnienia do emisji CO<sub>2</sub>. Ważna jest także pokazana analiza technologii i mocy wytwórczych w KSE zarówno stan obecny jak i perspektywiczny do roku 2032. Niezbędne do obliczeń prognozy rocznego zapotrzebowania na energię elektryczną mgr inż. A. Sobotka scharakteryzowała w rozdziale 8.5, z analizę historycznych i przyszłych profili produkcji energii elektrycznej w punkcie 8.6. Rozdział 8.8 w sposób zwięzły podsumowuje strukturę modelu i jego moduły, z kolei punkt 8.9 pokazuje ograniczenia modelu i zastosowane uproszczenia.

Część trzecią rozprawy stanowią rozdziały 10 i 11. Pierwszy z nich obejmuje analizę wyników symulacji najpierw na potrzeby kalibracji narzędzia z uwzględnieniem danych historycznych (lata 2017÷2022) oraz symulacji dla założeń prognostycznych (do roku 2032). Autorka analizuje tutaj 4 scenariusze, dla których przeprowadziła obliczenia i analizy. Dwa związane są z cenami paliw: wysokich (SCPW) i umiarkowanych (SCPU) - różnią się ścieżkami cen węgla, gazu i uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>. Pozostałe założenia makroekonomiczne i cenowe są jednakowe dla obu wariantów. Pozostałe dwa badane scenariusze

związane są z prognozowaną strukturą mocy wytwórczych, zróżnicowanej tempem wycofania mocy JWCD węglowych. Wolniejsze tempo oznacza więcej jednostek opalanych węglem w okresie prognozy charakteryzuje - wariant optymistyczny OPT, natomiast szybsze tempo odchodzenia od węgla cechuje wariant nazywany pesymistycznym PES (gdzie zaplanowano więcej źródeł gazowych). Dla wszystkich badanych scenariuszy wyznaczono do roku 2032 ceny energii elektrycznej (także z rozbiciem na poszczególne technologie), czasy wykorzystania mocy poszczególnych technologii, strukturę produkcji energii elektrycznej, emisje CO<sub>2</sub> generowane przez JWCD. Pracę kończy rozdział 11, w którym syntetycznie podsumowano przeprowadzone badania, dodano informacje na temat wdrożeń modelu w przedsiębiorstwie multienergetycznym, jak i również wskazano dalsze kierunki rozwoju opracowanego narzędzia. Bibliografia pracy zawiera łącznie 115 pozycji.

### **C. Ocena rozprawy**

1. Zdaniem recenzenta tematyka pracy jest ważna i interesująca. Praca jest napisana przejrzysto i podzielona na logiczne, wynikające z układu pracy rozdziały.
2. Mgr inż. Anna Sobotka w pracy opracowała model i program (razem narzędzie) do wyznaczania ceny energii elektrycznej na rynku hurtowym w perspektywie długoterminowej w zależności od przyjętych założeń makroekonomicznych i scenariusza rozwoju Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE).
3. Wyznaczenie ceny energii elektrycznej Doktorantka przeprowadziła wykorzystując tzw. mechanizm „merit order”, stosowany do wyznaczanie tej ceny na towarowej giełdzie energii (TGE). Narzędzie wyznacza cenę

energii elektrycznej (jak i inne niżej wymienione w punkcie B wielkości) w każdej „i-tej” godzinie „j-tego roku.

4. Mgr inż. Anna Sobotka analizuje 4 scenariusze dla których przeprowadziła obliczenia i analizy. Pierwsze dwa związane są z prognozowaną strukturą mocy wytwórczych, zróżnicowanej tempem wycofywania JWCD węglowych: przy wolniejszym tempie wariant nazywany jest optymistycznym OPT, natomiast przy szybszym tempie nazywany jest pesymistycznym PES. Dwa pozostałe scenariusze związane są ze ścieżkami paliw: wysokich (SCPW) i umiarkowanych (SCPU) – różnią się one ścieżkami cen węgla kamiennego i uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>.
5. O złożoności algorytmu świadczy fakt, że przeprowadzenie obliczeń wymagało wprowadzenia szeregu danych, w tym następujących ścieżek dla okresu obliczeniowego:
  - inflacji i kursów walut
  - cen paliw i uprawnień do emisji CO<sub>2</sub>
  - prognozy miksu wytwórczego (wariant OPT i PES)
  - projektów MFW (morskich farm wiatrowych)
  - rynku mocy (koszt zakupu obowiązku mocowego)
  - profili produkcji źródeł nJWCD (wskaźnik wykorzystania mocy PV, LFW, MFW)
  - dyspozycyjności JWCD
  - prognozy zapotrzebowania na energię elektryczną
  - struktury kosztów (jednostkowe koszty zmienne dla różnych technologii, koszty transportu), wskaźniki emisji.
6. Stworzone przez Autorkę narzędzie pozwala wyznaczyć:
  - średnioroczne ceny energii elektrycznej na RDN
  - ceny efektywne elektryczności poszczególnych technologii konwencjonalnych

- produkcje, czas wykorzystania mocy zainstalowanej i emisje poszczególnych grup źródeł wytwórczych
  - zużycie paliw według technologii
  - nadwyżkę produkcji OZE ponad zapotrzebowanie
7. Opracowany przez mgr inż. Annę Sobotkę model został wdrożony przez Polski Koncern Naftowy ORLEN S.A. w obszarze energetyki. Doktorantka przewiduje dalsze prace nad rozwojem modelu w szerszym zespole, uwzględniające m.in. zmiany i uszczegółowienie zapotrzebowania na energię związane z rozwojem nowych technologii i społecznego ich wykorzystania, uwzględnienie fizycznych ograniczeń systemu i poszczególnych jego jednostek itp.

#### **D. Uwagi krytyczne i dyskusyjne**

*w.d. – wiersz od dołu*

*w.g. – wiersz od góry*

- Str. 52 punkt 6.2.                      Proszę wyjaśnić skąd pochodzi nazwa: Model miedzianej płyty.
- Str. 55 1 w.d.                            „W przypadku  $nJWCD_{poz}$  profil pracy zakłada się niezmienny na przestrzeni analizy. Proszę wyjaśnić dlaczego.
- Str. 58, wzór 6.18                      Jest nieprzejrzysty – co oznacza w nim symbol „;”. Wg mojej oceny wzór posiada jedną wartość. Proszę pokazać zbiór z którego wybiera się minimum. Podobnie jest we wzorze 6.25. Proszę zrobić analizę jednostek w tych wzorach.
- Str. 59                                      Co oznacza  $Z_j$  we wzorze 6.10.
- Str. 62                                      Wzór (6.39) jest błędnie oznaczony jako (3.39).

- Str. 73, 12 w.g. Jest „z założeniami Pakietu Zimowego” – czy na pewno chodzi o Pakiet Zimowy?
- Str. 79, 1 w.d. Jest 400 zł/kw/rok – ma być 400 zł/kW/rob.
- Str. 80 Cena zamknięcia aukcji głównej rynku mocy na rys. 9 jest równa 406,25 zł/kW/rok, natomiast 9 w.d. jest 406,35 zł/kW/rok.
- Str. 89 W podpisie pod rys. 13 jest „kontraltach”, powinno być „kontraktach”.
- Str. 95 Na rys. 16 cena węgla kamiennego w 2032r. wynosi ok. 22,2 PLN/GJ, w tekście tuż nad rysunkiem jest 15,07 PLN/GJ. Proszę się do tego odnieść.
- Czy wskaźnik emisji (wzór 6.38)  $W_{eJWCDk}$  zależy tylko od spalanej paliwa czy też dla danej k-tej JWCD jest zmienny w zależności od roku i godziny. Czy zależy od obciążenia jednostki.
  - Czy średnia sprawności netto  $JWCD_K$  [%] zmienia się w kolejnych latach analizy.
  - Można by zrobić w przyszłości analizę wrażliwości ceny energii elektrycznej na w/w 2 punkty.
- Str. 105, 6 w.d. Warto dopisać o jaką najwyższą sprawność w przypadku WK-N chodzi.
- Str. 116, tab. 17 Czy porównywała Pani dane zawarte tam (dla PV i LFV) z danymi z kraju (Polski)?
- Str. 120, 2 w.d. Proszę wyjaśnić jak należy rozumieć założenie niezmiennego (rok do roku) godzinowego profilu zapotrzebowania na energię elektryczną (czy chodzi o proporcje czy ilość).

Str. 122, 4 w.d.                      Błędu modelu Autorka poszukuje bez uwzględnienia w nim wymiany transgranicznej – proszę o komentarz.

- Jak Pani określi wysoką cenę BASE jako dobrą czy złą (i dla kogo?). Czy koreluje z tym nazwa scenariusz optymistyczne i pesymistyczny.

Str. 133, 1 w.g.                      Autorka napisała „jeszcze w 2020 roku, moc zainstalowana w PV w KSE była stosunkowo niewielka, ceny efektywne tych źródeł przewyższały średnią cenę BASE”. Szkoda, że nie widać tego na żadnym z rysunków 28-30) lub tabeli 20.

Str. 134, 1 w.d.                      Jest „wynikałoby to bilansowania z wykorzystaniem modelu”, powinno być „wynikałoby to z bilansowania z wykorzystaniem modelu”,

Str. 135-138                          Kolory na rys. 32-39 są do siebie parami zbliżone, można było użyć nie tylko punktów do oznaczenia ale także trójkąty – wykresy byłyby bardziej przejrzyste.

- Dlaczego nie prognozowano zmian cen węgla brunatnego wysokich i umiarkowanych tylko jedną wartość?



## E. WNIOSEK KOŃCOWY

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Anny Sobotki pt. „*Modelowanie prognostyczne cen energii elektrycznej na rynku polskim*”, zawiera sformułowanie ważnych w dyscyplinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka zadań badawczych, ich rozwiązanie i dyskusję wyników.

W opinii końcowej chcę także podkreślić złożoność badanych problemów i związaną z tym konieczność przeprowadzenia żmudnych oraz pracochłonnych modeli i obliczeń. Autorka w ich przeprowadzeniu wykazała się bardzo dobrą wiedzą i szeroką skalą umiejętności posługiwania się technikami modelowania i obliczeń, jak i umiejętnościami opracowania i interpretacji wyników oraz szerokiej ich dyskusji.

Poziom merytoryczny rozprawy tworzy logicznie przemyślaną i spójną całość potwierdzającą dojrzałość Doktorantki do prowadzenia badań naukowych, w tym także z zakresie samodzielności i pracowitości.

***Uważam, że opiniowana praca mgr inż. Anny Sobotki w pełni spełnia ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim w odpowiednich przepisach i zasługuje na pozytywną opinię. Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.***

***Uwzględniając ponadto, że mgr inż. Anna Sobotka jest Autorką kilku (4) publikacji związanych z pracą (w tym w *Renewable Energy*) oraz, że praca zawiera interesujące i poszerzające wiedzę rozwiązania przedstawione szczególnie powyżej w ocenie rozprawy w punktach 2÷6, proszę o rozważenia wyróżnienia.***

Gliwice, 20.09.2023r.

Janusz Kotowicz

