

*Justyna Woźniak\*, Leszek Jurdziak\*\**

## METODYKA ANALIZY RYZYKA OPŁACALNOŚCI INWESTYCJI GÓRNICZO-ENERGETYCZNEJ W WARUNKACH NIEPEWNOŚCI NA PRZYKŁADZIE ZŁOŻA LEGNICA WSCHÓD

---

### 1. Wprowadzenie

Brak pewności, co do rozpoznania złoża, poziomu kosztów i cen energii oraz brak informacji o innych warunkach działania kopalni i elektrowni w przyszłości zniechęcają inwestorów do podjęcia decyzji. Rośnie wartość opcji czekania. Dobrym sposobem na rozwianie tych wątpliwości jest opracowanie metodyki analizy ryzyka opłacalności tego typu przedsięwzięć i jej przetestowanie na wybranym złożu by wskazać kluczowe parametry najbardziej wpływające na wynik finansowy, określić poziom zysków, ich zmienność oraz ryzyko poniesienia straty.

Na podstawie wyników symulacji warunkowej i optymalizacji LG przeprowadzonej na złożu Legnica Wschód przeprowadzono badanie wpływu niepewnych parametrów na opłacalność produkcji energii elektrycznej z węgla brunatnego. Wielowariantowe analizy ryzyka przeprowadzono dla każdego z 240 wyrobisk docelowych ( $12 \times 20$ ). Ryzyko geologiczne zostało zidentyfikowane w procesie symulacji warunkowej, natomiast pozostałe obszary ryzyka zostały potraktowane jako zmienne losowe o określonym zakresie i różnych rozkładach prawdopodobieństwa oraz poddane procesowi symulacji Monte Carlo. Dzięki 10 tys. powtórzeń procesu losowego generowania wartości tych parametrów w wyniku przeliczeń opracowanego modelu ekonomicznego uzyskano histogramy zmienności zysku kopalni, elektrowni i zintegrowanego pionowo koncernu energetycznego. Pozwoliło to obliczyć prawdopodobieństwa, z jakim poszczególne wyrobiska maksymalizowałyby zyski tych podmiotów, wskazać ryzyko poniesienia straty przy ich eksploatacji oraz określić wpływ badanych parametrów i scenariuszy na poziom zysków i ryzyko związane z ich osiągnięciem.

---

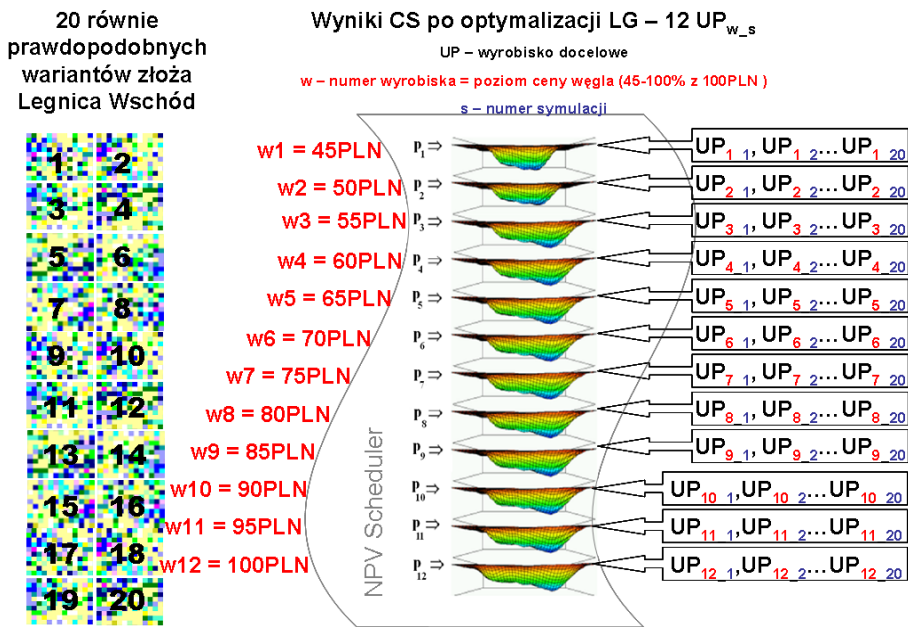
\* Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wrocławska, Wrocław

\*\* Instytut Górnictwa, Politechnika Wrocławska, Wrocław

Potwierdzono wnioski z wcześniejszych badań dotyczących korzyści z integracji pionowej kopalni i elektrowni w postaci możliwości maksymalizacji łącznego zysku i eksploatacji większych wyrobisk, wzmacniając je istotną redukcją ryzyka poniesienia straty przy integracji obu stron tego bilateralnego monopolu.

## 2. Wyniki symulacji warunkowej i optymalizacji Lerchs'a–Grossmann'a

Wykorzystując dane geologiczne pochodzące z opróbowania pola Legnica Wschód [3] utworzono geostatystyczny model zmienności wskaźnika jakości będącego funkcją wartości opałowej, zawartości popiołu i siarki. Cyfrową bazę danych odwiertów utworzono w IGO Poltegor Instytut [2]. Model blokowy tego złoża został opracowany w Datamine Studio na podstawie przestrzennego modelu jakościowego i strukturalnego złoża (rys. 1).



Rys. 1. Schemat symulacji warunkowej po optymalizacji LG.  
 Źródło: Opracowano na podstawie [5]

Model strukturalny odwzorowywał strukturę litologiczną złoża, natomiast model jakościowy odzwierciedlał zmienność interpolowanych parametrów jakościowych. Ostatnim etapem, stanowiącym właściwą część symulacji warunkowej była procedura przetwarzania modeli blokowych, która jest zapisana w makropoleceniach programu DATAMINE StudioTM [2].

Efektym symulacji warunkowej było 20 równie prawdopodobnych wariantów jakościowego modelu blokowego złoża (rys. 1). Wygenerowane warianty złoża stanowiły podstawę procesu optymalizacji wyrobiska docelowego LG wykonanej w programie NPVScheduler. Optymalne wyrobisko docelowe to takie, które dla danej ceny surowca ma największą wartość (niezdyskontowaną) spośród wszystkich możliwych wyrobisk spełniających ograniczenia dotyczące kąta nachylenia skarp [4].

Po przeprowadzeniu CS i optymalizacji LG wynikiem był zestaw 12 grup wyrobisk (20 wariantów) dla 12 poziomów cen węgla. Cena 45% (45 PLN) generuje pierwsze wyrobisko optymalne  $UP1_s$ , gdzie  $s$  to numer symulacji odpowiadający 20 wariantom wyrobisk tj.  $UP1_1, UP1_2, \dots, UP1_{20}$  (rys. 1).

Przy symulacji warunkowej UPI to umowne określenie grupy wyrobisk wygenerowanych dla pierwszego poziomu cen 45% ceny odniesienia i stąd można mówić o zmienności w tej grupie. Łącznie optymalnych wyrobisk docelowych był  $12 \times 20 = 240$  oraz 12. poziomów cen węgla (45, 50, 55, 60, ... 100 PLN/Mg). Zestawy grup wyrobisk opisany były zestawem danych numerycznych tj. ilość węgla, nakładu w danym wyrobisku oraz wskaźnikiem jakości, który łączy parametry jakościowe złoża.

### 3. Identyfikacja zmiennych parametrów wejściowych w symulacji Monte Carlo

Praca doktorska zawiera szczegółowy opis opracowanego modelu ekonomicznego (przychody, koszty i zyski: kopalni, elektrowni i zintegrowanego bilateralnego monopolu), bazującego na danych numerycznych pochodzących z optymalizacji LG wraz z dokładną identyfikacją zmiennych parametrów wejściowych użytych w symulacji Monte Carlo do analizy ryzyka (tab. 1). Przyjęto roczne wydobycie węgla na poziomie 24 mln Mg, przy średnim wskaźniku N:W~6 oraz moc elektrowni 4 600 MW. Obliczenia wykonano zarówno w programie *@Risk* jak i *Crystal Ball*.

Zaprezentowano wiele analiz scenariuszy dotyczących wpływu różnych poziomów cen pozwoleń na emisję na cenę energii elektrycznej (wprowadzono tzw. stopień przeniesienia ceny pozwolenia na cenę energii — wskaźnik wiążący wzrost ceny energii w Polsce ze wzrostem cen pozwoleń na emisję CO<sub>2</sub>, który jest konsekwencją uzależnienia polskiej energetyki od węgla i ograniczonej możliwości jej importu\*\*) oraz wyniki scenariusza bazowego — bez kosztów emisji CO<sub>2</sub>. Zgodnie z procedurą symulacji MC pierwszy krok to sukcesywne generowanie liczb losowych dla każdej zmiennej losowej z wybranego rozkładu prawdopodobieństwa. Wylosowane wartości wstawiane są do odpowiednich komórek arkusza kalkulacyjnego z modelem ekonomicznym, po czym następuje przeliczanie arkusza (obliczenie zysku analizowanych podmiotów i dodanie obliczonych wartości parametrów

---

\*\* Szacowany na bazie średniej ważonej emisyjności źródeł energii elektrycznej wykorzystywanych do jej produkcji. Emisyjność źródła energii pokazuje ile Mg CO<sub>2</sub> emituje się przy produkcji 1 MWh energii. Dla węgla emisyjność jest funkcją jego jakości/kaloryczności i sprawności bloków elektrowni.

wyjściowych do list wyników). W analizowanym modelu komórkami wynikowymi był zysk kopalni, elektrowni i zintegrowanego bilateralnego monopolu dla 20. wariantów CS oraz każdej z grupy 12. wyrobisk odpowiadającej procentowemu obniżeniu ceny bazowej. W sumie zdefiniowano 720 komórek wynikowych (20 wariantów  $\times$  12 wyrobisk  $\times$  3 podmioty) dla jednego wariantu ceny energii w scenariuszu bazowym oraz kolejno w scenariuszach uwzględniających ceny pozwoleń na emisję. Proces powtarzany był 10 tys. razy zgodnie z zadaną liczbą iteracji, aby uzyskać wystarczający duży zbiór wyników do poprawnych analiz statystycznych.

TABELA 1

**Zakres zmienności parametrów modelu ekonomicznego**

Parametr modelu	Typ rozkładu	Parametry rozkładu
Nakłady inwestycyjne kopalni, PLN	jednostajny	Minimum: 2713700000 Maksimum: 3834909000
Nakłady inwestycyjne elektrowni, PLN	jednostajny	Minimum: 18216000000 Maksimum: 29407800000
Koszt górnictwa, PLN/m <sup>3</sup> , PLN/Mg	trójkątny	Minimum: 7,21 Likeliest: 7,4 Maksimum: 7,59
Koszt wytworzenia energii elektrycznej bez zakupu paliwa, PLN/MWh	trójkątny	Minimum: 38,01 Likeliest: 42,00 Maksimum: 45,99
Sprawność bloków, %	trójkątny	Minimum: 44,50 Likeliest: 46,50 Maksimum: 48,50
Cena energii elektrycznej, PLN/MWh	normalny	Mean 240,00 Std. Dev. 27,74
Cena pozwolenia na emisję CO <sub>2</sub> , PLN/Mg	normalny	Mean 60,00 Std. Dev. 6,52
Stopień przeniesienia kosztu emisji na cenę energii, Mg CO <sub>2</sub> /MWh	jednostajny	Minimum: 0,72 Maksimum: 0,86
Emisyjności węgla, Mg CO <sub>2</sub> /MWh	trójkątny	Minimum: 0,88 Likeliest: 0,94 Maksimum: 0,98

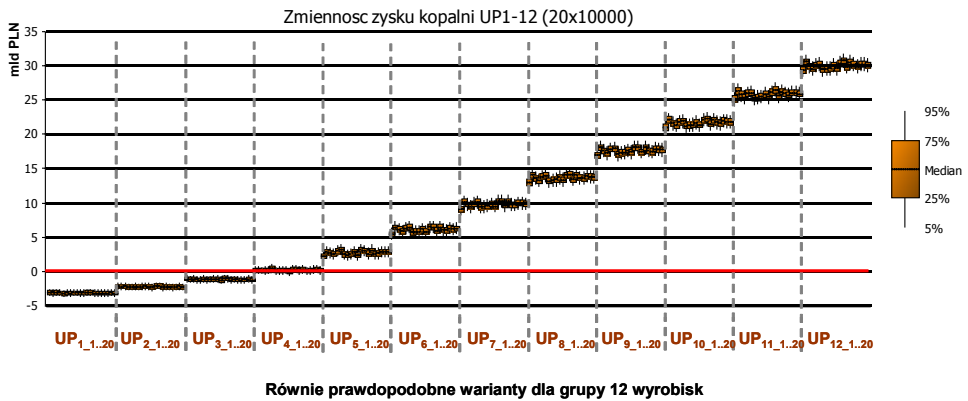
Źródło: Opracowano na podstawie [5]

#### 4. Wyniki analizy ryzyka w wybranym scenariuszu

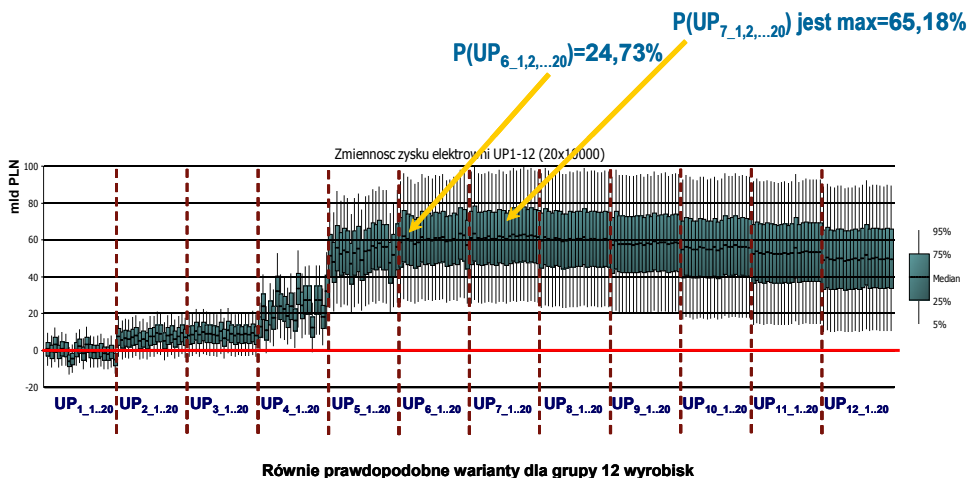
Analiza scenariusza bazowego (bez kosztów wykupu pozwoleń na emisję CO<sub>2</sub>, przy cenie energii elektrycznej na poziomie 240 PLN/MWh) pokazuje, że eksploatacja węgla

z największych wyrobisk (o nr 12 uzyskanych dla ceny węgla 100 PLN/Mg) zmaksymalizowałyby zyski kopalni dla wszystkich 20 symulacji (rys. 2). Eksploatacja mniejszych wyrobisk (o nr 1–3, optymalnych dla cen węgla 45, 50, 55 PLN/Mg) przyniosłaby stratę po odjęciu od ich wartości nakładów inwestycyjnych na uruchomienie kopalni.

Najlepszym rozwiązaniem dla elektrowni byłoby wynegocjowanie ceny węgla na poziomie 75% ceny bazowej (75 PLN/Mg — rys. 3).



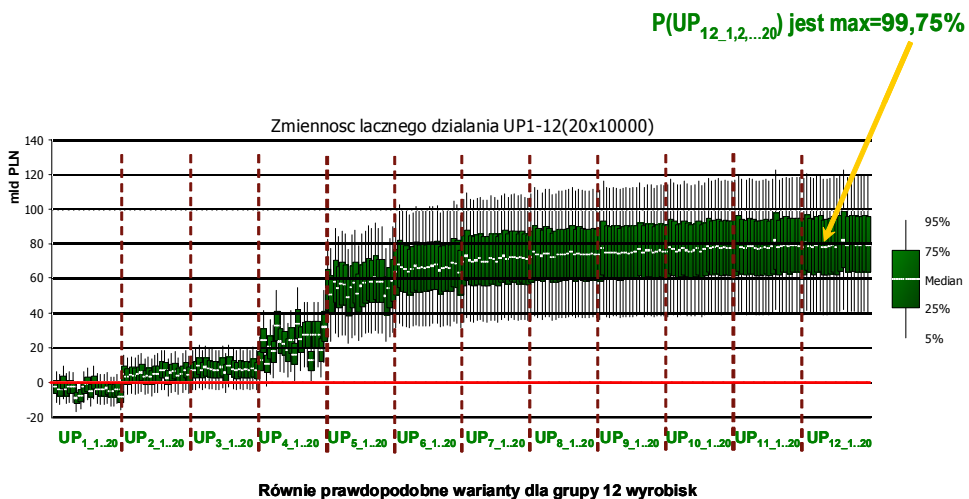
**Rys. 2.** Zmienność zysku kopalni dla 20. wariantów danych symulacyjnych i 12 grup optymalnych wyrobisk.  
Źródło: Opracowano na podstawie [5]



**Rys. 3.** Zmienność zysku elektrowni dla 20. wariantów danych symulacyjnych i 12 grup optymalnych wyrobisk.  
Źródło: Opracowano na podstawie [5]

Eksploracja wyrobisk optymalnych dla tej ceny (o nr 7) zmaksymalizowałoby niedyskontowane zyski elektrowni z prawdopodobieństwem 65,18%. W scenariuszu bazowym przy cenie energii elektrycznej 200 PLN/MWh elektrownia maksymalizowałaby swoje zyski przy eksploatacji 6. wyrobiska (dla ceny 70 PLN/Mg).

Wyniki te potwierdzają sprzeczność interesów kopalni i elektrowni [1]. Obie firmy kierując się maksymalizacją własnego zysku miałyby inne strategie działania. Kopalnia zainteresowana byłaby eksploatacją największego wyrobiska (odpowiadającego cenie węgla 100 PLN/Mg), natomiast dla elektrowni najlepsza byłaby cena 75 PLN/Mg węgla, gdyż wtedy osiągnęłaby maksymalny zysk. Przy tej cenie kopalnia dążąc do maksymalizacji swojego zysku eksploatowałaby wyrobisko 7. Oznacza to, że część zasobów zostałaby niewykorzystana. W przypadku 24,73% symulacji warunkowych elektrownia osiągnęłaby maksymalizację zysku dla ceny węgla 70 PLN/Mg, a więc przy eksploatacji jeszcze mniejszego wyrobiska 6. Maksymalizacja łącznych zysków, przy przyjętych założeniach kosztowo — cenowych, byłaby osiągnięta przy eksploatacji największych wyrobisk wygenerowanych dla ceny 100 PLN/Mg z prawdopodobieństwem 99,75%. Rozwiązanie to oznacza pełne wykorzystanie złoża (rys. 4).



Rys. 4. Zmienność łącznych zysków zintegrowanego pionowo koncernu energetycznego.  
Źródło: Opracowano na podstawie [5]

Przeprowadzona analiza ryzyka, w ramach kolejnych scenariuszy (dodatkowy poziom ceny energii, różne poziomy cen pozwoleń na emisję) wprowadzających konieczności wykupu pozwoleń na emisję CO<sub>2</sub>, potwierdziła przypuszczenie, że dodatkowy koszt obciążający elektrownię wpłynie na zmniejszenie prawdopodobieństwa maksymalizacji łącznych zysków i zasobów węgla opłacalnych do eksploatacji oraz na wzrost ryzyka poniesienia straty.

Prawdopodobieństwo maksymalizacji zysku elektrowni przy eksploatacji 7 wyrobiska (cena 75 PLN/Mg) maleje wraz ze wzrostem cen emisji z 65,18% do 13,81% (program @Risk) oraz z 56,94% do 12,83% (program CB). Rośnie za to prawdopodobieństwo maksymalizacji zysku przy eksploatacji mniejszego wyrobiska 6. (cena 70 PLN/Mg) z 24,73% do 42,71% (@Risk) i z 35,60% do 42,62% (CB). Analizując wpływ wzrostu kosztu pozwoleń na emisję CO<sub>2</sub> na prawdopodobieństwo maksymalizacji zysku koncernu energetycznego przy eksploatacji konkretnych wyrobisk, zaobserwowano jego spadek dla największego 12. wyrobiska z poziomu 99,19% do 68,04% (@Risk) oraz z poziomu 98,98% do 67,32% (CB). Jednocześnie wzrosło prawdopodobieństwo maksymalizacji zysku przy eksploatacji wyrobiska mniejszego 11. z 0,16% do 8,12% (@Risk) i z 0,57% do 8,52% (CB). Ponadto wraz ze wzrostem cen pozwoleń na emisję CO<sub>2</sub> wzrasta ryzyko straty dla obu podmiotów tj. dla elektrowni od 0,33% do 32,12%, a dla koncernu od 0,07% do 22,55% przy cenie energii elektrycznej 240 PLN/MWh. Zaproponowana metoda pozwala wyznaczyć poziom ryzyka poniesienia straty elektrowni i koncernu w następstwie wzrastających cen pozwoleń na emisję. W przypadku elektrowni prawdopodobieństwo straty waha się od 0,33% (warior bazowy) do 32,12% przy najwyższej cenie emisji 300 PLN/Mg CO<sub>2</sub>, natomiast dla koncernu od 0,07% do 22,55%.

## 5. Podsumowanie

Kluczowym wnioskiem z przeprowadzonych badań jest istotna redukcja ryzyka elektrowni poprzez pionowe jej zintegrowanie z kopalnią. Nie tylko usuwa to prawdopodobieństwo poniesienia straty, ale zapewnia możliwość eksploatacji dużych wyrobisk, które nie zostałyby wybrane w przypadku dwóch różnych właścicieli kopalni i elektrowni. Integracja pionowa zwiększa więc zasoby węgla opłacalne do wydobywania i istotnie redukuje ryzyko. Obie strony działając wspólnie lub łącząc się w jeden koncern energetyczny mogą nie tylko zmaksymalizować łączny zysk, lecz również istotnie zredukować ryzyko działania na niepewnym rynku energetycznym.

W pracy wykazano, że wzrost cen pozwoleń na emisję CO<sub>2</sub> pogłębia sprzeczność interesów kopalni i elektrowni, co może prowadzić do strat zasobów przy osobnym ich działaniu oraz zmniejsza prawdopodobieństwo maksymalizacji łącznego zysku przy eksploatacji największego wyrobiska. Nawet przy maksymalnym rozważanym poziomie cen pozwoleń (300 PLN/Mg CO<sub>2</sub>) nie prowadziło to do wyboru mniejszego wyrobiska do eksploatacji. Integracja pionowa chroni więc zasoby zapewniając opłacalną eksploatację pełnych zasobów nawet przy skrajnie niekorzystnych warunkach otoczenia ekonomicznego

Zaproponowana metoda analizy ryzyka pozwala określić prawdopodobieństwo z jakim analizowane wyrobiska docelowe zmaksymalizują niedyskontowane zyski kopalni, elektrowni oraz zintegrowanego koncernu, rozkład zmienności wyników finansowych przy ich eksploatacji czy wreszcie wpływ kosztu zakupu pozwoleń na emisję CO<sub>2</sub> na zmienność wyników finansowych. Poza tym metoda ta umożliwi skwantyfikowanie ryzyka poniesienia straty przy eksploatacji optymalnego wyrobiska.

## LITERATURA

- [1] *Jurdziak L.*: Analiza ekonomiczna funkcjonowania kopalni węgla brunatnego i elektrowni z wykorzystaniem modelu bilateralnego monopolu, metod optymalizacji kopalń i teorii gier. Monografia. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007
- [2] *Jurdziak L., Kawalec W.*: Wpływ wzrostu sprawności elektrowni oraz polityki CCS na wielkość zasobów bilansowych węgla brunatnego w warunkach bilateralnego monopolu kopalni i elektrowni. *Polityka Energetyczna*. Tom 13. Zeszyt 2, 2010
- [3] *Ślusarczyk G., Specylak-Skrzypecka J., Borowicz A.*: Cyfrowe modele geologiczne złoża węgla brunatnego Legnica. Wrocław, 2007
- [4] *Tolwinski B.*: MEW NPV Scheduler and Multimine Scheduler Solution for CVRD-Itabira. Notes from discussion. Datamine Latin America Belo Horizonte, 2002
- [5] *Woźniak J.*: Analiza ryzyka w ocenie opłacalności produkcji energii elektrycznej z węgla brunatnego. Praca doktorska. Politechnika Wroclawska (niepublikowana), 2010