

**LESZEK JURDZIAK, JUSTYNA WOŹNIAK\***

## **ZMIENNOŚĆ PRZEPIYWÓW PIENIĘŻNYCH JAKO MIARA RYZYKA PRODUKCJI ENERGII Z WĘGLA BRUNATNEGO**

### *Streszczenie*

*Artykuł składa się z czterech części obejmujących tj. wprowadzenie, opis metodyki badań, analizę rezultatów i wnioski. Głównym przesłaniem jest konieczność optymalizacji wspólnych działań kopalni węgla brunatnego i elektrowni oraz opracowanie metodyki szacowania korzyści z integracji pionowej tych podmiotów w warunkach niepewności i ryzyka w zintegrowanym środowisku programowym.*

Słowa kluczowe: złożę węgla brunatny, produkcja energii elektrycznej, ryzyko

### **Wstęp**

Zmiany na rynku energii energetycznej związane z koniecznością wykupu pozwoleń na emisję CO<sub>2</sub> (wprowadzenie systemu handlu ETS) oraz skutki globalnego kryzysu finansowego powodują, że produkcja energii elektrycznej staje się coraz bardziej ryzykownym przedsięwzięciem. W atmosferze coraz radykalniejszych żądań grup tzw „zielonych” możliwe staje się wprowadzenie zakazu budowy nowych elektrowni węglowych bez instalacji wychwytywania i składowania CO<sub>2</sub> (CCS). Utrudnia to znalezienie funduszy na budowę nowych kopalń węgla brunatnego i elektrowni. Ma to szczególnie znaczenie dla Polski z energetyką opartą na węglu kamiennym (60%) i brunatnym (35%). W efekcie węgiel brunatny - najtańsze źródło produkcji energii elektrycznej – musi rywalizować z innymi alternatywnymi i dużo droższymi źródłami. Produkcja energii z węgla brunatnego nigdy nie była dotowana i przynosiła zyski. KWB Bełchatów realizuje np. udostępnienie nowego pola „Szczerców” z własnych środków, a podobnie jak elektrownia buduje nowy blok. Niezbędne kredyty zabezpieczone są przez przyszłe przepływy pieniężne. Po roku 2020 sytuacja w Polsce będzie jeszcze trudniejsza, bo cały limit uprawnień do emisji CO<sub>2</sub> będzie musiał być kupowany na aukcjach. Rozsądnym działaniem jest, więc opracowanie metodyki szacowania zmienności przyszłych przepływów pi-

---

\* Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wrocławska

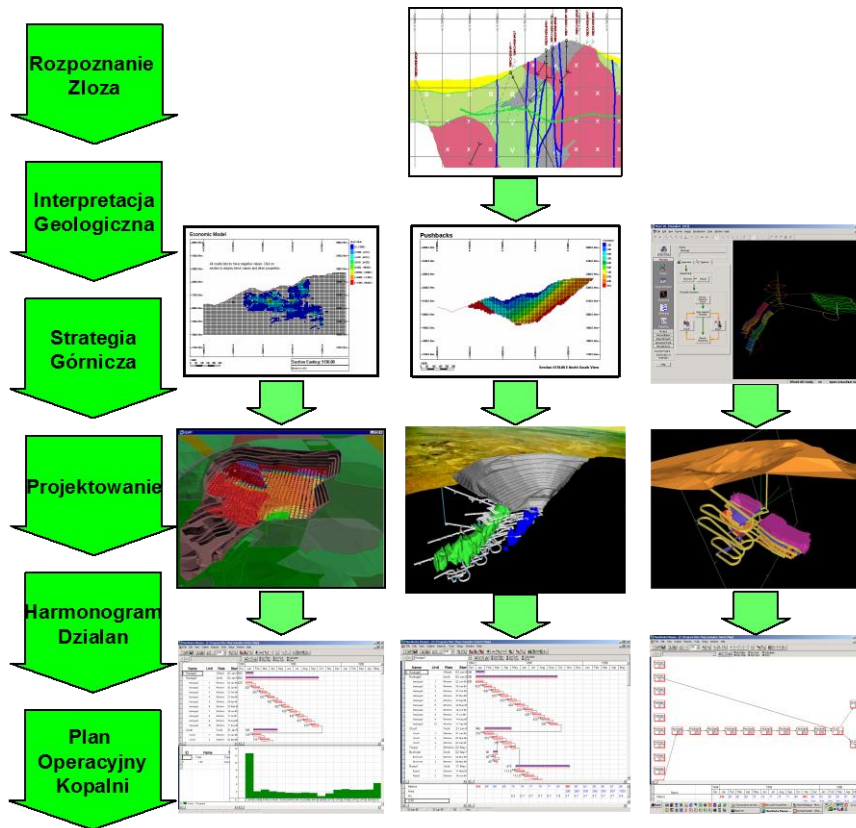
nych ze sprzedaży energii elektrycznej wytworzonej z węgla pochodzącego z nowych złóż z uwzględnieniem niepewności i ryzyka by móc ocenić opłacalność inwestycji i prawdopodobieństwo jej powodzenia. Polska posiada kilka miliardów ton węgla brunatnego w rozpoznanych złożach (np. w okolicy Legnica i Gubina), których udostępnienie i eksploatacja na potrzeby nowych elektrowni może zagwarantować bezpieczeństwo energetyczne kraju na kolejne stulecie [Jurdziak, Wiktorowicz 2009]. Bez nowych inwestycji obecnie eksploatowane złoża wyczerpią się ok. 2040 r. i wówczas Polska może stracić obecną niezależność w zakresie produkcji energii elektrycznej.

### Metoda badań

W pracy pokazano, że dla maksymalizacji zysku z produkcji energii elektrycznej konieczna jest optymalizacja wspólnych działań kopalni węgla brunatnego i elektrowni [Jurdziak 2007]. Nowa kopalnia i elektrownia powinny działać jak zintegrowany pionowo koncern energetyczny, gdyż poza maksymalizacją łącznych działań może przynieść dodatkowe korzyści, które mogą zwiększyć prawdopodobieństwo powodzenia całego przedsięwzięcia [Jurdziak 2005]. Analiza przyszłej inwestycji powinna rozpocząć się od klasyfikacji zasobów na podstawie danych ilościowych i jakościowych z rozpoznania złoża. Już na tym etapie powinny być wzięte pod uwagę wspólne cele przedsięwzięcia [Jurdziak i Kawalec 2008]. Cena węgla brunatnego nie ma wpływu na łączne zyski [Jurdziak 2007] jednak można wskazać optymalne zasoby i ich lokalizację w przestrzeni 3D dzięki zastosowaniu metod optymalizacji kopalń odkrywkowych. Formuła cenowa powinna jednak pokazywać wartość węgla o konkretnych parametrach jakościowych dla elektrowni.

Na każdym etapie łańcucha tworzenia wartości przy produkcji energetycznej z węgla brunatnego pojawia się kilka niepewnych parametrów, które mogą powodować zmienność przyszłych przepływów gotówki, zwiększając ryzyko nie osiągnięcia wymaganego poziomu rentowności. Poniższy schemat (rys. 1) przedstawia etapy górniczego opracowania nowego przedsięwzięcia, w których pojawiają się obszary niepewności i ryzyka.

W celu identyfikacji i określenia zakresu niepewności obecnie na świecie stosuje się symulację warunkową (Conditional Simulation - CS). Symulacja warunkowa to technika wykorzystywana do oceny ryzyka za pomocą symulacji Monte Carlo (MC) parametrów jakościowych w przestrzeni. Jest ona narzędziem pozwalającym na minimalizację ryzyka projektów górniczych dzięki połączeniu metod geostatystycznych i optymalizacji w module Geo Risk Assessment w programie NPV Scheduler.



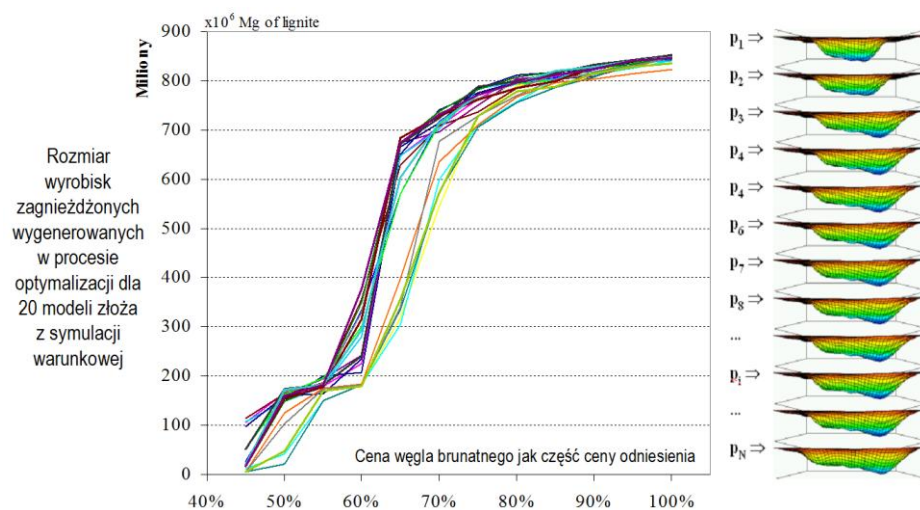
Rys. 1. Etapy łańcucha tworzenia wartości od rozpoznania złoża do opracowania planu eksploatacji - jako obszary ryzyka i niepewności (na podstawie materiałów firmy Datamine)

Fig. 1. The stages of the value chain, from deposit diagnosis to develop a plan of exploitation - as areas of risk and uncertainty (based on Datamine company materials)

Wynikiem symulacji są jednakowo prawdopodobne wersje modelu złoża zachowujące jego granice i wartości parametrów w miejscu pobrania prób oraz postać histogramów parametrów jakościowych i semiwariogramów.

Wiązka długoterminowych planów rozwoju kopalni sporządzona na bazie wyników symulacji warunkowej w module Geo-Risk Assessment (GRA) pozwala oszacować zmienność przepływów finansowych (Cash Flows - CFs) w projektach górniczych. Informacja o zmienności parametrów złożowych uzyskanych z symulacji warunkowej może być użyta do oceny ryzyka geologicznego i jego minimalizacji. CS, symulacja MC i długoterminowe plany rozwoju kopalni są obiektywnymi narzędziami do oceny zmienności przepływów pieniężnych. Zintegrowana metoda oceny ryzyka została opisana w pracy [Jurdziak i Wiktorowicz 2008].

Omówione podejście zaprezentowano na przykładzie danych ze złoża Legnica oraz nowej kopalni i elektrowni zaproponowanych w projekcie unijnym Foresight nr WKP\_1/1.4.5/2/2006/4/7/585/2006 „Scenariusze rozwoju technologicznego przemysłu wydobywania i przetwórstwa węgla brunatnego” <http://www.igo.wroc.pl/foresight/foresight.html>. Na rysunku 2 przedstawiono wyniki optymalizacji Lerchsa-Grossmana dla 20 równie prawdopodobnych wersji fragmentu złoża Legnica uzyskanych w procesie symulacji warunkowej.



Rys. 2. Zmiany wielkości 12 wyrobisk docelowych (mierzone ilością węgla w mln Mg) wygenerowanych dla cen węgla z zakresu 45-100% przyjętej ceny bazowej - \$26/Mg, [Jurdziak i Wiktorowicz 2009]

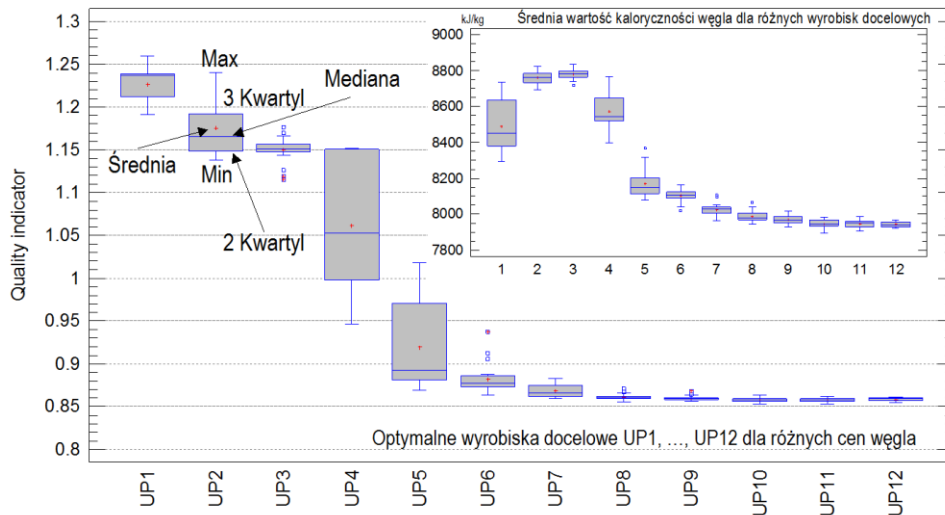
Fig. 2. Variation in 12 target excavations (measured by carbon in mln Mg) generated for the price of carbon adopted by 45-100% base price - \$ 26/Mg [Jurdziak & Wiktorowicz 2009]

### Analiza rezultatów

W procesie symulacji warunkowej generowanym parametrem była wartość wskaźnika jakości węgla (Quality Indicator – QI). Zmiany jego uśrednionej wartości (wartość 4 kwartyli i średnia) dla 12 wyrobisk docelowych uzyskanych w procesie optymalizacji Lerchsa-Grossmanna pokazano na rysunku 3 (główny wykres). Wartość tego wskaźnika maleje i stabilizuje się dla większych wyrobisk docelowych. Na wykresie tym (wykres dodatkowy) przedstawiono również zmienność wartości opałowej węgla dla tych samych wyrobisk. Stanowiły one bazę do obliczeń całkowitej ilości energii elektrycznej wyprodukowanej ze

spalenia węgla z danego wyrobiska. W obliczeniach przyjęto sprawność elektrowni na poziomie 40%.

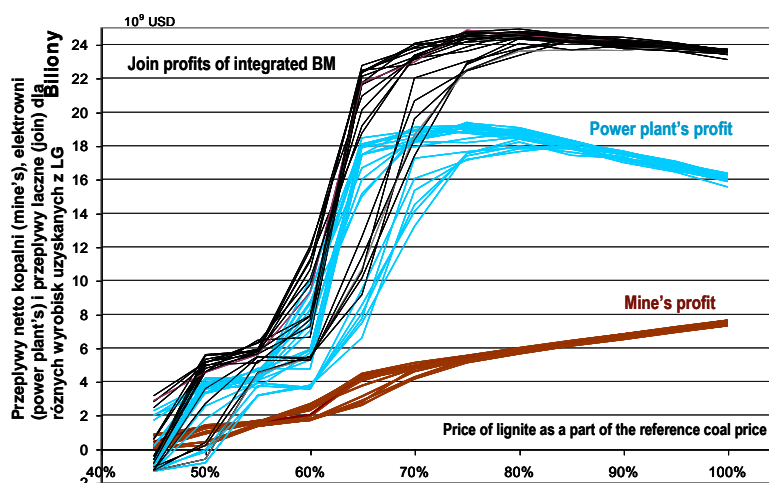
Symulacja warunkowa umożliwiła oszacowanie zmienności wartości niedyskontowanych przepływów finansowych netto (NCFs) kopalni, elektrowni i zintegrowanego pionowo koncernu przy eksploatacji różnych wyrobisk docelowych (rys. 4).



Rys. 3. Zmienność wskaźnika jakości węgla (*Quality Indicator - QI*) i uśrednione kaloryczności węgla dla 12 wygenerowanych zagnieżdżonych wyrobisk docelowych UP1 ... UP12 [Jurdziak i Kawalec 2009]

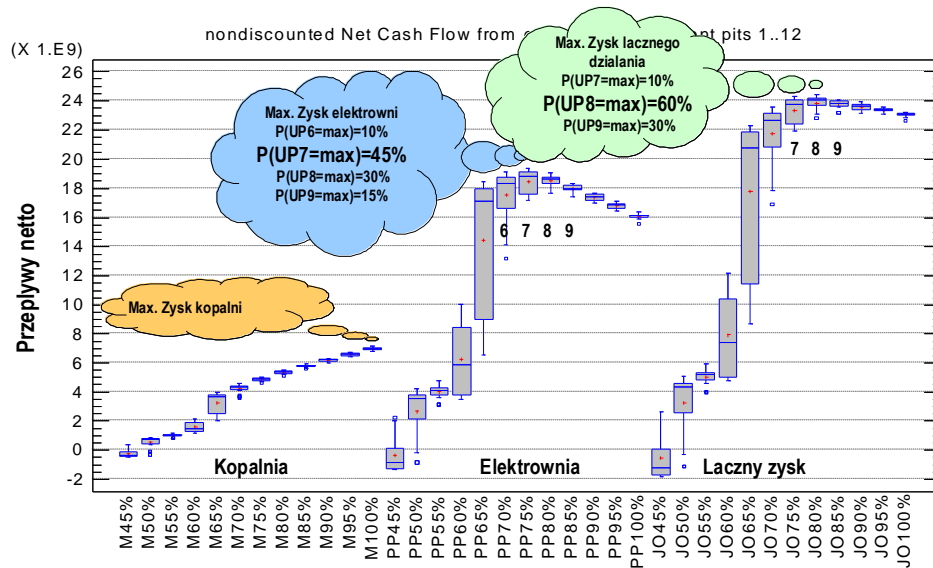
Fig. 3. Variability of coal quality index (*Quality Indicator - QI*) and averaged coal calorific for 12 generated nested target pits UP1 ... UP12 [Jurdziak & Kawalec 2009]

Obserwacja wyników prowadzi do wniosku, że maksymalizując łączne zyski pionowo zintegrowanego koncernu opłaca się eksploatować większe wyrobiska niż maksymalizując zyski elektrowni. Zmniejsza to ryzyko koncernu w stosunku do elektrowni oraz zapewnia dłuższe jego funkcjonowanie.



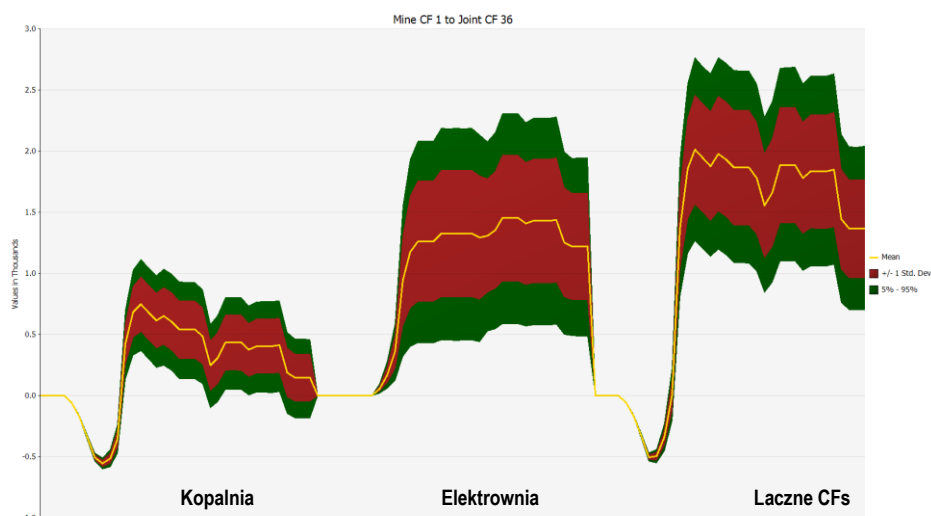
Rys. 4. Wyniki symulacji NCFs z eksploatacji węgla i produkcji energii elektrycznej dla różnych wyrobisk docelowych [na podstawie Jurdziak i Kawalec 2009]  
 Fig. 4. The NCFs simulation results of coal mining and electricity production for various target excavations [based on Jurdziak & Kawalec 2009]

Kopalnia działająca jako oddzielny podmiot osiągnie znacznie niższe wyniki finansowe niż elektrownia. Prowadzi to do sprzeczności interesów kopalni i elektrowni oraz elektrowni i zintegrowanego pionowo koncernu. Wspólne dążenie bilateralnego monopolu do maksymalizacji łącznego zysku (jak w zintegrowanym pionowo koncernie) jest najbezpieczniejszym i najkorzystniejszym finansowo rozwiązaniem. Widać to również na kolejnym wykresie (rys. 5). Kopalnia maksymalizowałaby swoje zyski przy eksploatacji największego wyrobiska i najwyższej cenie węgla na poziomie 100% ceny odniesienia. Elektrownia z kolei największe prawdopodobieństwo osiągnięcia maksymalnego zysku na poziomie 45% uzyskałaby ze spalania węgla pochodzącego z 7 wyrobiska. W przypadku koncernu eksploatacja 8 wyrobiska z prawdopodobieństwem 60% zapewniłoby mu maksymalny zysk.



Rys. 5. Symulacja NCFs z eksploatacji węgla i produkcji energii elektr. dla kopalni, elektrowni i zintegrowanego koncernu [na podstawie Jurdziak i Kawalec 2009]  
 Fig. 5. NCFs simulation of coal mining and production of electrical energy for mines, power plants and integrated group [based on Jurdziak & Kawalec 2009]

Oceny projektów górniczych powinny być oparte na optymalnym harmonogramie wydobywania. W przypadku symulacji warunkowej mamy do czynienia z wieloma wariantami złoża, które są równie prawdopodobne. W module oceny ryzyka (Geo Risk assesment – GRA) programu NPVScheduler istnieje możliwość przygotowania i analizy całej wiązki harmonogramów, z których każdy jest optymalny dla danego wariantu złoża. Dopiero takie podejście pozwala na prawidłowe szacowanie zmienności CFs w poszczególnych krokach postępu, w różnych okresach rozwoju projektów górniczych. Na podstawie wyznaczonych zmienności rocznych CFs można oszacować NPV projektu górniczego w oparciu o tradycyjne formuły, ale z losowymi parametrami np. niepewne poziomy kosztów i cen powinny być wyrażone nie pojedynczą wartością lecz rozkładem prawdopodobieństwa potencjalnych wartości. Na wykresie 6 zaprezentowaną zmienność rocznych CFs uzyskaną z symulacji Monte Carlo. Można zauważyć, że zmienność łącznych przepływów dla kopalni i elektrowni jest nieco mniejsza i odbywa się na znacznie wyższym, a tym samym bezpieczniejszym poziomie. Część ujemnych przepływów finansowych poniżej 0 dla kopalni i koncernu pokazują okres początkowy inwestycji (prowadzenia prac przygotowawczych i zdejmowania nadkładu), w którym nie są generowane żadne przychody lub są one mniejsze niż ponoszone koszty.



Rys. 6. Zmienność rocznych CFs dla kopalni, elektrowni i zintegrowanego koncernu [Jurdziak i Wiktorowicz 2009]

Fig. 6. The variability of the annual CFS for mine, power station and integrated group [Jurdziak & Wiktorowicz 2009]

Analiza ryzyka oparta na przepływach pieniężnych wskazuje, że stopa dyskontowa dopasowana do ryzyka (Risk adjusted discount Rate – RADR) w szacowaniu wartości NPV projektu powinna być dobierana zgodnie z ryzykiem przedsięwzięcia. Zmienność CFs jest dobrą miarą ryzyka projektu. Badania prowadzone w tym kierunku po raz kolejny potwierdzają fakt, że ryzyko jest znacznie niższe, gdy przedsięwzięcie rozpatrywane jest jako łączne działanie zintegrowanej pionowo firmy, aniżeli oddzielnie dla kopalni i elektrowni. Wyniki z symulacji warunkowej (CS) przeprowadzonej w programach Datamine Studio 3 i NPVScheduler wspólnie z innymi parametrami złoża węgla brunatnego Legnica zostały wykorzystane jako dane wejściowe do analizy ryzyka przeprowadzonej w nakładkach Excela Crystal Ball i @Risk. Pozwoliło to na oszacowanie zmienności przyszłych przepływów pieniężnych (CFs) rok po roku z eksploatacji węgla, produkcji energii elektrycznej i jej sprzedaży na zliberalizowanym rynku energetycznym. Przeprowadzono kilka tysięcy symulacji pokazując zmienność przepływów gotówki (CFs) w każdym roku z optymalnego długoterminowego harmonogramu kopalni, co pozwoli na właściwy wybór stopa dyskontowa (RADR) dostosowanej do ryzyka. Uzyskane rezultaty pokazały, że niepewność związana z cenami CO<sub>2</sub> jak również z ich przyznawanymi limitami będzie miała istotny wpływ na zwiększenie ryzyka opłacalności produkcji energii z węgla brunatnego i zmniejszenie wielkość optymalnego wyrobiska, co zmniejszy stopień wykorzystanie złóż węgla brunatnego. Tematyka ta będzie przedmiotem odrębnych analiz.



## Podsumowanie

Analiza ryzyka opłacalności produkcji energetycznej z węgla brunatnego powinna wykorzystywać uzyskane rozwiązania dla monopolu dwustronnego kopalni węgla brunatnego i elektrowni [Jurdziak 2004, 2007] oraz obserwacji zmienności przyszłych CFs. Szacowanie zmienności CFs może być wykonane w odpowiednim zintegrowanym środowisku programowym. Wykorzystanie modułu ConSim w Datamine Studio v.3 oraz GeoRisk Assesment w programie NPVScheduler wraz z zastosowaniem metod optymalizacji kopalń odkrywkowych wydają się być doskonałym środowiskiem programowym do tego typu analiz. Wspólne jego wykorzystanie z narzędziami do symulacji Monte Carlo powinno pozwolić na wygenerowanie wielu optymalnych scenariuszy rozwoju kopalni i wybór najlepszego wariantu na bazie analiz probabilistycznych uwzględniających wszystkie istotne źródła niepewności na każdym etapie tworzenia wartości przy produkcji energii elektrycznej ze spalania węgla brunatnego. Tylko pokazanie potencjalnego ryzyka projektu, zwiększające się wraz z rosnącą zmiennością przepływów finansowych (CFs) w poszczególnych latach pozwala na zintegrowaną ocenę ryzyka [McNeil 2005]. Optymalizacja wspólnych działań kopalni i elektrowni w długoterminowym rozwoju wydobywania węgla brunatnego, pozwala na znaczące obniżenie ryzyka. Wzrost cen pozwolił na emisję dwutlenku węgla i spadek ich limitów zapewne zmniejszy opłacalność produkcji energetycznej z węgla brunatnego i zwiększy ryzyko, dlatego tym bardziej istotne staje się skorzystanie z omówionej metodyki pozwalającej na optymalizację działania.

Wszystkie wspomniane programy i moduły są dostępne w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej do celów edukacyjnych i doradczych.

*Artykuł finansowany z projektu „GRANT-wsparcie prac badawczych poprzez stypendia naukowe dla doktorantów” [POKL.08.02.02-02-002/08] współfinansowany przez UE w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, Budżetu Państwa oraz Budżetu Województwa Dolnośląskiego.  
Umowa nr GRANT/II/9/2009P DG-G/2370/09.*

## Literatura

1. JURDZIAK L.: *Czy integracja pionowa kopalń odkrywkowych węgla z elektrowniami jest korzystna i dla kogo?* Biuletyn Urzędu Regulacji Energetyki nr 2 s. 24-33 2005
2. JURDZIAK L.: *Tandem: lignite opencast mine & power plant as a bilateral monopoly*, Mine Planning and Equipment Selection, A.A Balkema Publishers, Taylor & Francis Group 2004

3. 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.
4. JURDZIAK L., KAWALEC W.: *Integrated risk evaluation in value creation chain of optimal electric energy production from lignite with the use of conditional simulation of a lignite deposit quality parameters*. Electronic Conference Proceedings of the IAMG Meeting 2009, Computational Methods for the Earth, Energy and Environmental Sciences, August 23-28, Stanford University, USA (prezentacja) 2009
5. JURDZIAK L., KAWALEC W.: *Method of identification of mineable lignite reserves in the bilateral monopoly of an open pit and a power plant*. Economic evaluation and risk analysis of mineral projects. Taylor and Francis, 85-94, 2008
6. JURDZIAK L., WIKTOROWICZ J.: *Conditional and Monte Carlo simulation - the tools for risk identification in mining projects*. Economic evaluation and risk analysis of mineral projects. Taylor and Francis 2008
7. JURDZIAK L., WIKTOROWICZ J.: *Estimation of cash flows volatility for risk analysis of a new lignite power plant*. 10th IAEE European Conference Energy, Policies and Technologies for Sustainable Economies, IAEE, Cleveland OH, 469-470, 2009
8. MCNEIL, A., FREY, R. & EMBRECHTS, P.: *Quantitative Risk Management: Concepts Techniques and Tools*, Princeton University Press, Princeton 2005

### **VOLATILITY OF CASH FLOWS AS A RISK MEASURE OF ELECTRIC ENERGY PRODUCTION OUT OF LIGNITE**

**Key words:** lignite deposit, electric energy production, risk

#### *S u m m a r y*

*The paper consists of four parts containing introduction, description of research methodology, analysis of results and conclusions. Main idea is the necessity of joint activity optimization of a lignite mine and a power station and working out the methodology of benefits of vertical integration estimation in conditions of uncertainty and risk in integrated software environment.*