

Modelowanie i optymalizacja wydobycia w kopalniach węgla kamiennego z wykorzystaniem struktur gridowych

Modelling and optimization of mining production in coal mines with use of the OPTiCoalMine calculation service



Dr hab. inż. Edyta Brzychczy*^{*)}



Dr inż. Aneta Napieraj*^{*)}



Dr inż. Marta Sukiennik*^{*)}

Treść: W artykule przedstawiono usługę OPTiCoalMine umożliwiającą modelowanie i optymalizację produkcji w kopalniach węgla kamiennego. Usługa została opracowana w ramach realizacji Gridu Dziedzinowego Energetyka w projekcie „Dziedzinowo zorientowane usługi i zasoby infrastruktury PL-Grid dla wspomagania Polskiej Nauki w Europejskiej Przestrzeni Badawczej – PLGrid Plus” w Akademickim Centrum Komputerowym Cyfronet AGH. W pracy przedstawiono opis usługi i przykład jej wykorzystania dla wybranego przedsiębiorstwa górniczego.

Abstract: This paper presents the OPTiCoalMine calculation service that allows modeling and optimization of production in coal mines. The service has been developed within the framework of the Energy Power Grid in the project “Domain-oriented services and resources of Polish Infrastructure for Supporting Computational Science in the European Research Space – PLGrid Plus” coordinated by the Academic Computer Center Cyfronet in Cracow. The paper presents a description of the service and an example of its use for the selected mining company.

Słowa kluczowe:

węgiel kamienny, OPTiCoalMine, modelowanie, optymalizacja, wydobycie

Key words:

hard coal, OPTiCoalMine, modelling, optimization, production

1. Wprowadzenie

Grid obliczeniowy to infrastruktura sprzętowa i programowa, która w sposób niezawodny, spójny, rozproszony i tani zapewnia dostęp do zasobów obliczeniowych. Zapewnia ściśle kontrolowane współdzielenie zasobów i rozwiązywanie problemów w dynamicznych organizacjach wirtualnych, w skład których wchodzi wiele różnych instytucji. Współdzielenie nie dotyczy prostej wymiany plików, lecz raczej bezpośredniego dostępu do komputerów, oprogramowania, danych i innych zasobów. Obliczenia gridowe stają się platformą obliczeniową nowej generacji do rozwiązywania problemów o dużej złożoności [7].

Z taką dużą złożonością problemu mamy do czynienia między innymi w przypadku modelowania i optymalizacji procesu wydobywczego w grupie kopalń. Opracowanie bowiem optymalnego harmonogramu produkcji wymaga często analizy dziesiątek, a nawet setek wyrobisk ścianowych, powiązanych ze sobą zarówno zależnościami czasowymi, jak i technicznymi (np. wyposażeniem, infrastrukturą techniczną czy określonymi wymaganiami technologicznymi i górnictwami). W takim przypadku projektant potencjalnie może mieć do czynienia z bardzo wieloma możliwościami (wariantami) prowadzenia robot górnictw.

Projektanci zajmujący się planowaniem wydobycia węgla kamiennego posiadają odpowiednie dane i wiedzę odnośnie do warunków geologiczno-górnictwowych i techniczno-organizacyjnych projektowanych wyrobisk. Wskazują jednak na brak

^{)} AGH w Krakowie, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii

narzędzi wspierających modelowanie i generowanie nowych rozwiązań, które pozwalają na przeprowadzenie odpowiedniej liczby symulacji w warunkach złożonych i kompleksowych problemów projektowych [5].

Jeszcze do niedawna brak było narzędzia, które by mogło wspomóc taką analizę symulacyjną. Pewną propozycją w tym zakresie była, opracowana na podstawie metody CPRG, aplikacja CPRG.SYS [1], która umożliwiła modelowanie i optymalizację robót eksploatacyjnych w wielozakładowym przedsiębiorstwie górniczym. Jej wykorzystanie wymagało jednak od użytkowników zainstalowania aplikacji na jednostce komputerowej i, z uwagi na złożoność analizowanych wariantów, posiadanie dostępu do dużej mocy obliczeniowej serwerów. Ze względu na brak bezpośredniego dostępu potencjalnych użytkowników do dużych i jednocześnie wolnych mocy obliczeniowych podjęto prace mające na celu zaimplementowanie algorytmu metody CPRG w postaci usługi obliczeniowej w strukturze gridowe Polskiej Infrastruktury Gridowej. Efektem tych prac jest usługa OPTiCoalMine, która została opisana w dalszej części pracy.

2. Usługa OPTiCoalMine

Polska Infrastruktura Gridowa została zbudowana w ramach projektu PL-Grid (2009-2012), w celu dostarczenia polskiej społeczności naukowej platformy informatycznej opartej na klastrach komputerów, służących e-Science w różnych dziedzinach [2]. Infrastruktura wspiera badania naukowe poprzez integrację danych doświadczalnych i wyników zaawansowanych symulacji komputerowych prowadzonych przez geograficznie rozproszone zespoły. Infrastruktura PL-Grid umożliwia polskim naukowcom prowadzenie badań naukowych w oparciu o symulacje i obliczenia dużej skali z wykorzystaniem klastrów komputerów oraz zapewnia wygodny dostęp do rozproszonych zasobów komputerowych. Dostęp jest darmowy dla naukowców i wszystkich osób prowadzących działalność naukową, związaną z uczelnią lub instytutem naukowym w Polsce [8]. Rozwinięciem Polskiej Infrastruktury Gridowej był projekt „Dziedzinowo zorientowane usługi i zasoby infrastruktury PL-Grid dla wspomagania Polskiej Nauki w Europejskiej Przestrzeni Badawczej – PLGrid Plus” mający na celu przygotowanie specyficznych środowisk obliczeniowych (tzw. gridów dziedzinowych), czyli rozwiązań, usług i poszerzonej infrastruktury obliczeniowej wraz z oprogramowaniem, dostosowanych do potrzeb różnych grup naukowców. Rozwiązania w ramach projektu stworzone są dla użytkowników z różnych dziedzin i obszarów nauki, np.: Nanotechnologie, Akustyka, Life Science, Chemia kwantowa, Fizyka molekularna, Ekologia, Energetyka, Bioinformatyka, Zdrowie, Materiały, Metalurgia [8].

Usługa obliczeniowa OPTiCoalMine stanowi część Gridu Dziedzinowego Energetyka i jest dostępna na platformie wirtualnego laboratorium GridSpace2 [3,4]. Z usługi mogą korzystać użytkownicy zarejestrowani w portalu PL-Grid, którzy wystąpią z wnioskiem o dostęp do niej na swoim koncie.

Algorytm usługi w zakresie modelowania wariantów oparty jest na zdeterminowanej sieci czynności, która umożliwia odwzorowanie w czasie robót zbrojeniowych, eksploatacyjnych i likwidacyjnych w projektowanych wyrobiskach ścianowych w kopalniach przedsiębiorstwa wielozakładowego. Podstawową wyznaczaną wielkością jest wydobycie miesięczne z robót eksploatacyjnych z uwzględnieniem założenia, iż postęp robót eksploatacyjnych jest zmienną losową. Pozwala to, w efekcie modelowania przebiegu procesu wydobywczego, na wyznaczenie możliwych odchyleń od wartości oczekiwanych wydobycia w skali całego przedsiębiorstwa

górniczego, czyli wskazanie ryzyka związanego z realizacją procesu wydobywczego według wybranego wariantu realizacji robót. W przypadku zdefiniowania różnych możliwości wyposażenia poszczególnych wyrobisk ścianowych – algorytm usługi wskazuje najlepszą alokację według przyjętego kryterium optymalizacji mającego na celu minimalizację odchyleń wydobycia miesięcznego od wielkości planowanych w przedsiębiorstwie górniczym w analizowanym okresie. Optymalizacja prowadzona jest z wykorzystaniem algorytmu ewolucyjnego, opartego na programowaniu ewolucyjnym. Funkcję przystosowania w tym algorytmie (dla przyjętego kryterium optymalizacji) zdefiniowano następująco

$$f = \sqrt{\sum_{i=1}^m (WSR_i - WPI_i)^2} \rightarrow \min$$

gdzie:

WSR_i – wartość średnia wydobycia netto z robót eksploatacyjnych w przedsiębiorstwie górniczym w analizowanym okresie, Mg/mc,

WPI_i – planowana wartość wydobycia netto z robót eksploatacyjnych w przedsiębiorstwie górniczym w analizowanym okresie, Mg/mc,

m – liczba miesięcy w analizowanym okresie.

Obliczenia w usłudze realizowane są na klastrze obliczeniowym ZEUS o mocy obliczeniowej 169 TFlops (czyli $169 \cdot 10^{12}$ operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę) oraz pamięci operacyjnej 23 TB.

Wygląd strony obsługującej działanie usługi w wirtualnym laboratorium GridSpace2 przedstawiono na rysunku 1.

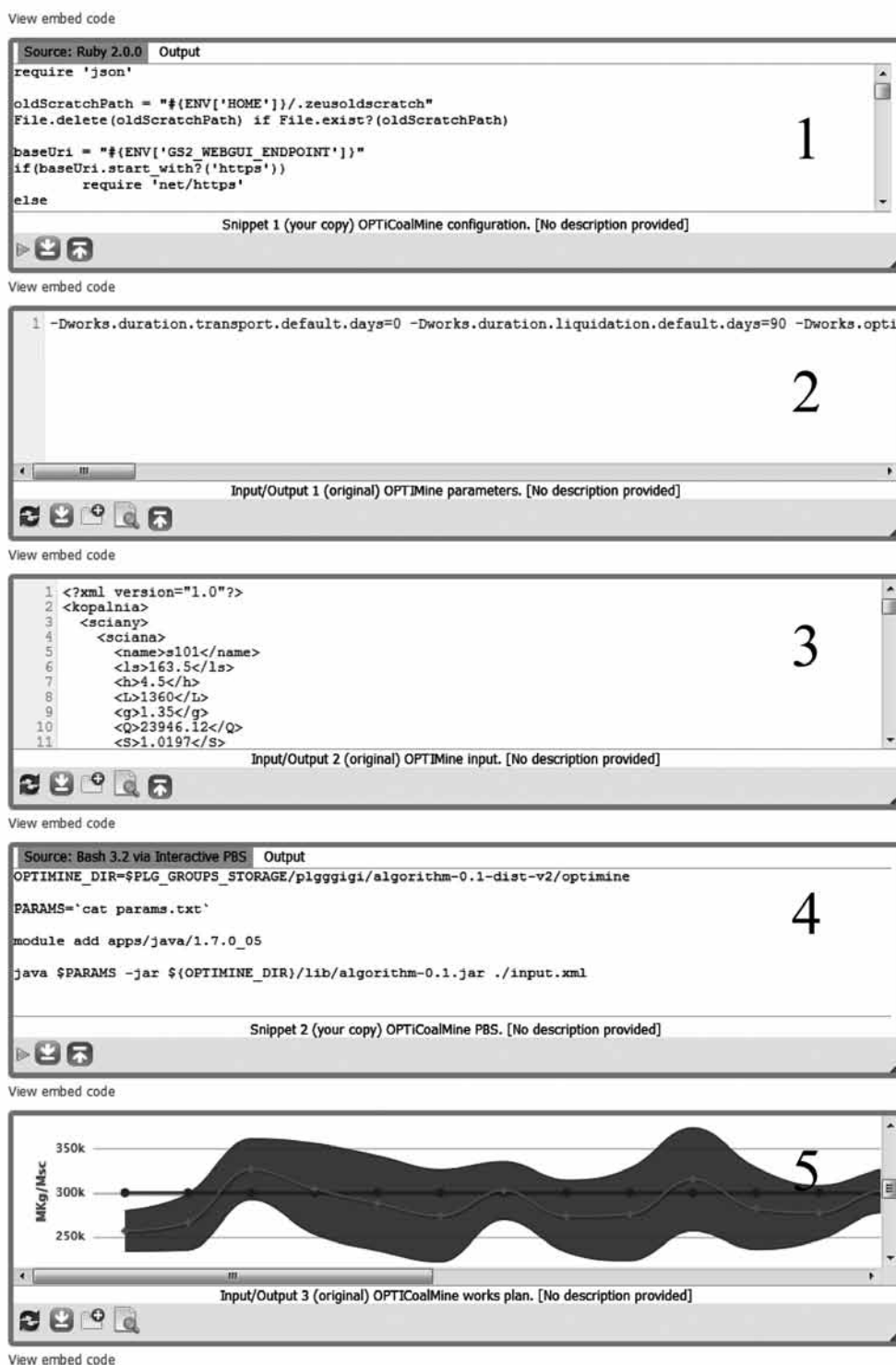
Strona usługi podzielona jest na 5 okien:

1. Okno 1, w którym następuje wprowadzenie zmiany domyślnych ustawień algorytmu obliczeniowego.
2. Okno 2, w którym dostępny jest pogląd zmienionych i zapisanych (w Oknie 1) ustawień algorytmu.
3. Okno 3, w którym następuje wprowadzenie pliku z danymi wejściowymi.
4. Okno 4, w którym następuje uruchomienie usługi i przesłanie zapytania wykonania obliczeń na klastrze obliczeniowym (poprzez mechanizm kolejki PBS).
5. Okno 5, w którym dostępny jest podgląd wyników obliczeń w formie graficznej (wykresu na ekranie) oraz istnieje możliwość zapisania pliku wyjściowego z wynikami obliczeń.

Struktura pliku wyjściowego (w formacie .xml) podzielona jest na następujące części:

- „ściany”, w której zapisane są parametry projektowanych wyrobisk ścianowych,
- „ciągi”, w której zapisane są dane dotyczące ciągów produkcyjnych, czyli powiązań czasowych pomiędzy wyrobiskami ścianowymi,
- „zestawy”, w której określone zostają zestawy (kompleksy) ścianowe,
- „mws”, w której zapisane jest przyporządkowanie zestawów ścianowych do projektowanych wyrobisk ścianowych,
- „mps”, w której zapisane są wartości średnie rozkładu postępu robót eksploatacyjnych w projektowanych wyrobiskach, przy wykorzystaniu zdefiniowanych zestawów ścianowych,
- „mos”, w której zapisane są wartości odchyleń standardowych rozkładu postępu robót eksploatacyjnych w projektowanych wyrobiskach, przy wykorzystaniu zdefiniowanych zestawów ścianowych.

W efekcie obliczeń użytkownik otrzymuje plik wyjściowy z danymi dotyczącymi:



Rys. 1. Ekran usługi OPTiCoalMine w wirtualnym laboratorium GridSpace2

Fig. 1. Screen of OPTiCoalMine service in the virtual laboratory GridSpace2

- dat rozpoczęcia robót w poszczególnych ciągach produkcyjnych,
 - doboru zestawów wyposażenia do projektowanych wyrobisk,
 - średnich postępów robót eksploatacyjnych – wylosowanych z zadanego (w danych wejściowych) rozkładu [m/d],
 - dat rozpoczęcia i zakończenia robót zbrojeniowych,
 - dat rozpoczęcia i zakończenia robót likwidacyjnych,
 - średnich wartości wydobywania miesięcznego w poszczególnych miesiącach analizowanego okresu,
 - odchył standardowych wydobywania miesięcznego w poszczególnych miesiącach analizowanego okresu,
 - wartości funkcji przystosowania dla najlepszego osobnika w kolejnych generacjach algorytmu ewolucyjnego.
- Na podstawie otrzymanych wyników można w ogólnodostępnym oprogramowaniu sporządzić harmonogram robot górniczych, który po podjęciu decyzji o realizacji wybranego wariantu, może zostać wdrożony w przedsiębiorstwie.
- Szczegółowe informacje o opracowanej usłudze dostępne są na stronie [6]. Natomiast przykład działania usługi dla wy-

branego przedsiębiorstwa górniczego przedstawiony zostanie w dalszej części artykułu.

3. Modelowanie i optymalizacja wydobycia w przykładowym przedsiębiorstwie górniczym z wykorzystaniem usługi OPTiCoalMine

Studium przypadku obejmuje trzy kopalnie wybranej spółki węglowej. W celu wyznaczenia optymalnego poziomu wydobycia utworzono odpowiedni plik .xml, w którym wprowadzono charakterystykę projektowanych wyrobisk ścianowych, zdefiniowano ciągi produkcyjne oraz określono możliwą alokację maszyn w wyrobiskach ścianowych. Zadano również parametry rozkładu postępu robót eksploatacyjnych w poszczególnych wyrobiskach z określonym wyposażeniem (tablica 1). Zestawy wyposażenia przedstawiono w tablicy 2.

Założono następujące wartości parametrów wejściowych: wydobycie planowane 300 000, Mg/m-c, czasookres analizy 24 [m-ce] w terminie od 01-01-2017 do 31-12-2018, czas trwania robót zbrojeniowych i likwidacyjnych 3, m-ce.

Obliczenia realizowano przy następujących ustawieniach algorytmu ewolucyjnego: liczebność populacji bazowej $P=200$, liczebność populacji rodzicielskiej $\lambda=7$, liczebność elity $\eta=2$. W toku algorytmu przyjęto liczbę losowań postępu robót eksploatacyjnych w planowanych wyrobiskach $N=100$.

Tablica 2 Przyjęte zestawy wyposażenia
Table 2. Assumed sets of equipment

Numer zestawu	Typ kombajnu	Typ przenośnika
Z1	JOY 4L	RYBNIK 850
Z2	KSW 880EU	RYBNIK 850
Z3	KGE 750	JOY AFC
Z4	KSW 460	RYBNIK 850
Z5	KGE 710FM	RYBNIK 850
Z6	KGS345N	HB 3E74

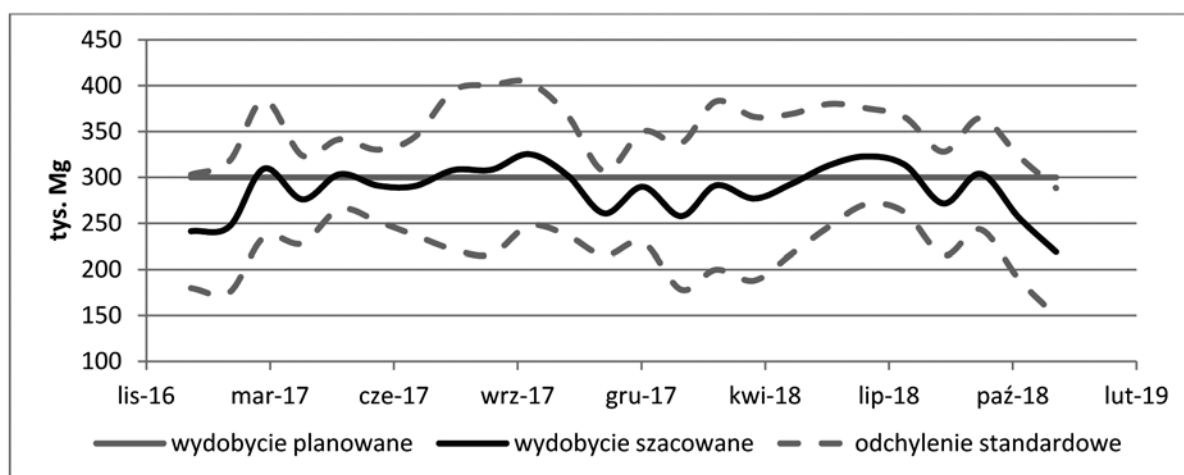
Z uwagi na to, iż algorytmy ewolucyjne są metodą heurystyczną obliczenia przeprowadzono w toku wielokrotnych, niezależnych uruchomień algorytmu ($n=39$ powtórzeń). Na rysunku 2 przedstawiono wyznaczone wydobycie wraz z odchyleniem standardowym w odniesieniu do wydobycia planowanego dla najlepszego rozwiązania (osiągniętego w 21 iteracji obliczeń).

Na podstawie wyników obliczeń sporządzono harmonogram robót dla wariantu optymalnego obejmujący okres od 31-12-2015 do 21-05-2022, którego fragment przedstawiono na rysunku 3.

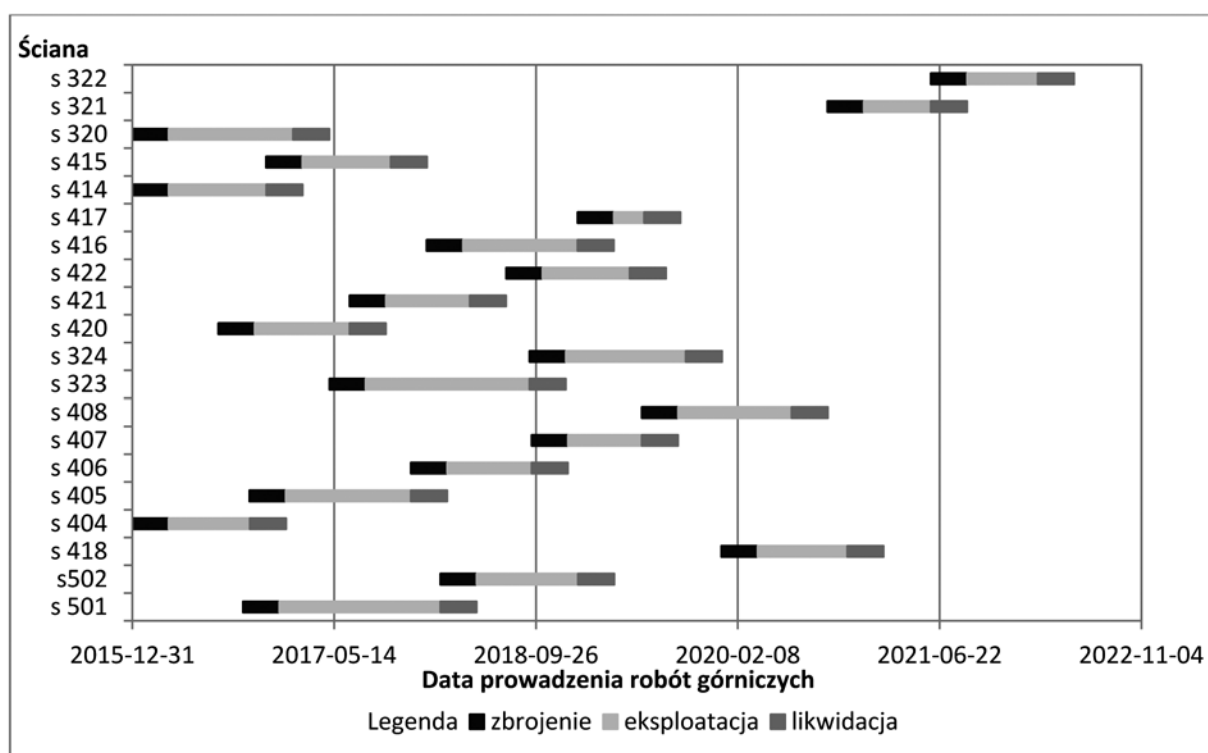
Otrzymane wyniki obliczeń z usługi można wykorzystać do wspomagania decyzji podejmowanych w działach przygotowania produkcji kopalń węgla kamiennego w zakresie oceny wariantów rozcięcia złoża lub określenia kolejności

Tablica 1. Dane wejściowe do algorytmu
Table 1. Input data for the algorithm

kopalnia	ciąg	ściana	dl. ściany, m	wysokość ściany m	wybieg ściany m	Alokacja zestawów maszynowych						Średni postęp, m/dobę					
						Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6
K1	c1	404	161.5	2.45	808.3	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		405	161.5	2.45	808.3	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		406	161.5	2.45	808.3	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		407	111	2.85	726	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		408	111	2.85	726	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
	c2	409	204.5	1.85	823	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		410	204.5	1.85	823	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		411	204.5	1.85	823	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		412	215.5	2.85	708	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		413	215.5	2.85	708	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
	c3	501	173.5	3.7	1021.9	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		502	173.5	3.7	1021.9	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
		503	173.5	3.7	1021.9	0,9	0,1	0	0	0	0	5,79	3,73	0	0	0	0
K2	c4	414	248.5	3.9	1010	0,1	0,5	0,3	0,1	0	0	6,43	5,95	4,05	5,62	0	0
		415	247.5	3.4	950	0,1	0,5	0,3	0,1	0	0	6,43	5,95	4,05	5,62	0	0
	c5	416	247.5	2.5	1200	0,1	0,5	0,3	0,1	0	0	6,43	5,95	4,05	5,62	0	0
		417	297.5	2.35	330	0,1	0,5	0,3	0,1	0	0	6,43	5,95	4,05	5,62	0	0
	c6	418	244.5	1.75	970	0,1	0,5	0,3	0,1	0	0	6,43	5,95	4,05	5,62	0	0
		419	200	1.85	660	0,1	0,5	0,3	0,1	0	0	6,43	5,95	4,05	5,62	0	0
K3	c7	320	249	1.98	810	0,4	0	0	0,4	0,1	0,1	6,57	0	0	5,43	3,76	5,1
		321	238	1.92	630	0,4	0	0	0,4	0,1	0,1	6,57	0	0	5,43	3,76	5,1
		322	213	2	600	0,4	0	0	0,4	0,1	0,1	6,57	0	0	5,43	3,76	5,1
	c8	323	241	2.44	1420	0,4	0	0	0,4	0,1	0,1	6,57	0	0	5,43	3,76	5,1
		324	154	2.39	760	0,4	0	0	0,4	0,1	0,1	6,57	0	0	5,43	3,76	5,1
		325	152	2.11	760	0,4	0	0	0,4	0,1	0,1	6,57	0	0	5,43	3,76	5,1
	c9	420	208	1.98	1030	0,4	0	0	0,4	0,1	0,1	6,57	0	0	5,43	3,76	5,1
		421	240	2.86	940	0,4	0	0	0,4	0,1	0,1	6,57	0	0	5,43	3,76	5,1
		422	161	1.96	960	0,4	0	0	0,4	0,1	0,1	6,57	0	0	5,43	3,76	5,1



Rys. 2. Wielkość wydobycia i odchylenie standardowe oraz wydobycie planowane dla wariantu optymalnego
 Fig. 2. Amount of production and standard deviation and production planned for the optimal scenario



Rys. 3. Harmonogram robót górniczych dla optymalnego wariantu (fragment)
 Fig. 3. Schedule of mining works for the optimal scenario (fragment)

uruchamiania wyrobisk ścianowych z uwzględnieniem doboru wyposażenia do projektowanych robót.

4. Podsumowanie

Struktury gridowe przeznaczone są do wspomaganie obliczeń w warunkach złożonych problemów projektowych. Stanowią one jedną z możliwości wykorzystania zaawansowanych narzędzi ICT w warunkach przedsiębiorstw przemysłowych.

W artykule przedstawiono usługę OPTiCoalMine, która umożliwia modelowanie i optymalizację produkcji węgla kamiennego w wielozakładowym przedsiębiorstwie górniczym. Jest ona częścią Gridu Dziedzicznego Energetyka w Polskiej Infrastrukturze Gridowej.

Opracowana usługa umożliwia analizę złożonych wariantów prowadzenia robót eksploatacyjnych w wielozakładowym przedsiębiorstwie górniczym z uwzględnieniem aspektu alokacji wyposażenia i ryzyka związanego z postępem tych robót. Istotną zaletą jest jej dostępność dla użytkowników, poprzez stronę internetową wirtualnego laboratorium GridSpace2, bez konieczności instalacji aplikacji na komputerach użytkowników. Implementacja usługi w Polskiej Infrastrukturze Gridowej daje dostęp do olbrzymich mocy obliczeniowych, co w znaczny sposób ułatwia otrzymanie w relatywnie szybkim czasie rozwiązań dla nawet bardzo złożonych przypadków projektowych.

Osiągane w efekcie działania usługi wyniki, mogą wspomagać podejmowanie decyzji w zakresie planowania oraz przygotowania produkcji i zostać w dość prosty sposób przekształcone w harmonogram robót (ze wskazanym wypo-

sażeniem) w kopalniach wielozakładowego przedsiębiorstwa górniczego, co zostało zaprezentowane na wybranym przykładzie.

Artykuł opracowano w ramach badań statutowych prowadzonych w Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie nr 11.11.100.693

Literatura

1. *Brzychczy E.*: Metoda modelowania i optymalizacji robót eksploatacyjnych w wielozakładowym przedsiębiorstwie górniczym. Wydawnictwa AGH. Seria Rozprawy i Monografie, nr 245. Kraków 2012.
2. Building a national distributed e-infrastructure – PL-Grid: scientific and technical achievements. Pod red. Bubak M., Szepieniec T., Wiatr K., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2012.
3. *Ciepiela E., Nowakowski P., Kocot J., Hareźlak D., Gubała T., Mainzer J., Kasztelnik M., Bartyński, T., Malawski, M., Bubak, M.*: Managing Entire Lifecycles of e-Science Applications in GridSpace2 Virtual Laboratory – From Motivation through Idea to Operable Web-Accessible Environment Built on Top of PL-Grid e-Infrastructure. [In:] M. Bubak, T. Szepieniec, K. Wiatr (Eds) Building a National Distributed e-Infrastructure – PL-Grid – Scientific and Technical Achievements, Lecture Notes in Computer Science, vol. 7136, pp. 228÷239, Springer, 2012.
4. *Pędziwiatr T.*: OPTiCoalMine usługa obliczeniowa: kod źródłowy, ACK Cyfronet, Kraków, 2014.
5. *Sukiennik M.*: Wspomaganie planowania i optymalizacji procesu produkcyjnego w kopalniach węgla kamiennego narzędziami ICT, Przegląd Górniczy, nr 9, 2013.
6. <https://docs.plgrid.pl/display/PLGDoc/Energetyka%3A+OPTi+CoalMine>, data dostępu: 25.04.2015.
7. <http://students.mimuw.edu.pl/SR-MSUI/10-grid/gridzy.pdf>, data dostępu: 26.04.2015.
8. www.plgrid.pl, data dostępu: 29.04.2015.

Szanowni Czytelnicy! *Przypominamy o wznowieniu* *prenumeraty „Przeglądu Górniczego”*

Informujemy też, że od 2009 roku w grudniowym zeszycie P.G. zamieszczamy listę naszych prenumeratorów.