

Szymon SYPNIEWSKI*

Predyktywne i reaktywne harmonogramowanie produkcji w odkrywkowych kopalniach rud metali

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki prac statutowych realizowanych w IGSMiE PAN w ramach tematu pn. „Predyktywne i reaktywne harmonogramowanie produkcji w odkrywkowych kopalniach rud metali”. Harmonogramowanie produkcji jest zagadnieniem niezwykle ważnym z praktycznego punktu widzenia. Szczególnie istotne jest rozpatrywanie planowania realizacji przedsięwzięcia produkcyjnego w warunkach zmieniającego się otoczenia, w których często zrealizowane czasy trwania zadań różnią się od planowanych. Przedstawiono podstawowe koncepcje tworzenia harmonogramów predyktywnych i reaktywnych, czyli tworzonych odpowiednio: przed rozpoczęciem danej fazy produkcyjnej (harmonogramowanie predyktywne), jak również w trakcie produkcji w wyniku pojawiających się zewnętrznych zakłóceń przygotowanego wcześniej harmonogramu (harmonogramowanie reaktywne). W pracy dokonano analizy ryzyk występujących w górnictwie pod kątem ich wpływu na budowę harmonogramów produkcji. Wyszczególniono m.in. ryzyko geologiczne – związane z budową złoża i zasobami; ryzyko rynkowe zmiennych cen surowców, wahań kursów walut, relacji podaży i popytu na dany surowiec, wymagań jakościowych klientów co do produktu; ryzyko kosztowe cen paliw i materiałów pędnych, energii elektrycznej, kosztów zakupu/leasingu sprzętu; ryzyko infrastrukturalne; ryzyko środowiskowe; ryzyko polityczne; ryzyko związane z niezawodnością i dostępnością maszyn górniczych i sprzętu; ryzyko związane z wykorzystywaną i dostępną technologią; ryzyko pogodowe. Scharakteryzowano typowy sposób postępowania przy tworzeniu harmonogramów predyktywnych oraz przedstawiono koncepcję zastosowania metod harmonogramowania reaktywnego w górnictwie odkrywkowym rud metali, jak również w krajowym górnictwie węgla brunatnego i surowców skalnych.

Słowa kluczowe: planowanie produkcji, harmonogramowanie produkcji, górnictwo odkrywkowe

Predictive and reactive production scheduling in open-pit ore mines

Abstract: The article presents the results of statutory works conducted at the Mineral and Energy Economy Research Institute of the Polish Academy of Sciences. Production scheduling is extremely important from a practical point of view. It has particular meaning when one analyses a production venture conducted in a dynamically changing

* Mgr inż., Pracownia Pozyskiwania Surowców Mineralnych, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.

environment when the experienced timeframe of completing particular tasks takes significantly longer than planned. This article examines the basic concepts of predictive and reactive scheduling. Predictive schedules are created before a particular production phase starts, while reactive scheduling takes place when external factors disrupt the previously prepared schedule. An analysis was conducted of the risks occurring in the mining industry within the context of their influence on the scheduling process. These risks include geological risks associated with the deposit structure and reserves; market risk of changing commodities prices, currency exchange fluctuations, the relations between supply and demand for a particular commodity, and clients' requirements regarding the quality of mining products; the cost risk of fuel and electricity prices and the costs of buying or leasing mining equipment; infrastructural risk; environmental risk; political risk; risk associated with the availability and reliability of mining equipment; risks associated with the technology employed; and finally weather risks. The article also characterizes a typical method of creating predictive schedules together with a concept for applying the reactive scheduling methods in both the open-pit ore mining industry and domestic lignite mines and quarries.

Key words: planning, production scheduling, open-pit mining

Wprowadzenie

Realizacja harmonogramu produkcji w odkrywkowym zakładzie górniczym jest zadaniem niezwykle skomplikowanym. W trakcie produkcji pojawiają się nieprzewidywalne zakłócenia np. awarie maszyn, opóźnienia w dostawach materiałów, niekorzystne warunki atmosferyczne, błędy oszacowania czasów wykonania zadań itp., które powodują, że planowane harmonogramy stają się niepraktyczne lub niemożliwe do zrealizowania.

W związku z tym w ostatnich latach powstaje coraz więcej prac uwzględniających niepewność związaną z dynamiką systemów produkcyjnych w zmieniającym się otoczeniu (technicznym, ekonomicznym, społecznym). Analiza literatury dotyczącej harmonogramowania projektu wskazała na potrzebę podjęcia badań nad algorytmami predyktywno-reaktywnego harmonogramowania ze zdefiniowanymi terminami realizacji etapów projektu. Istnieje kilka przesłanek do przeprowadzenia badań w zakresie omawianego tematu pracy. Harmonogramowanie produkcji jest zagadnieniem niezwykle ważnym z praktycznego punktu widzenia. Szczególnie istotne jest rozpatrywanie planowania realizacji innowacyjnego przedsięwzięcia w warunkach zmieniającego się otoczenia, w których często zrealizowane czasy trwania zadań różnią się od planowanych. Może to wynikać z uwarunkowań technicznych, organizacyjnych, zmian prawnych, trudności we współpracy z podwykonawcami, awarii maszyn i wielu innych.

Przydatne jest wtedy zastosowanie podejścia predyktywno-reaktywnego, w którym dąży się do minimalizacji wpływu zakłóceń produkcyjnych na planowany harmonogram. Dotychczasowe badania dotyczące harmonogramowania projektu w warunkach niepewności, skupiają się na zabezpieczeniu terminowego wykonania całego projektu lub pojedynczych zadań, a nie wszystkich etapów projektu. Ochrona jedynie terminu wykonania całego projektu jest niewystarczająca (Klimek 2010). Ten sam autor – odnosząc się do branż związanych z innymi rodzajami produkcji niż wydobywanie kopalin – podaje, że w chwili obecnej brak jest opracowań, w których kompleksowo analizowane są możliwe zakłócenia występujące w systemach produkcyjnych. Istnieje wiele jeszcze nierozwiązanych zagadnień dotyczących predyktywno-reaktywnego harmonogramowania produkcji z ograniczoną dostępnością zasobów. Analogicznie wygląda sytuacja jeśli chodzi o planowanie i harmonogramowanie produkcji w odkrywkowych zakładach górniczych, w których istotna jest ogólna

jakość surowca, jak również utrzymanie stabilności składu jakościowego nadawy, czyli wydobywających przede wszystkim rudy metali, surowce skalne na potrzeby przemysłu cementowego i wapienniczego czy węgla brunatny.

Planowanie i harmonogramowanie produkcji jest szeroko wspierane przez specjalistyczne oprogramowanie komputerowe dedykowane dla górnictwa. Dostępne komercyjne systemy planowania nie umożliwiają jednak generowania harmonogramów ukierunkowanych na zabezpieczenie terminowej realizacji kamieni milowych ani nie uwzględniają dynamicznego charakteru produkcji górniczej, wymuszającej wprowadzanie częstych zmian i uaktualnień wcześniej przyjętych założeń.

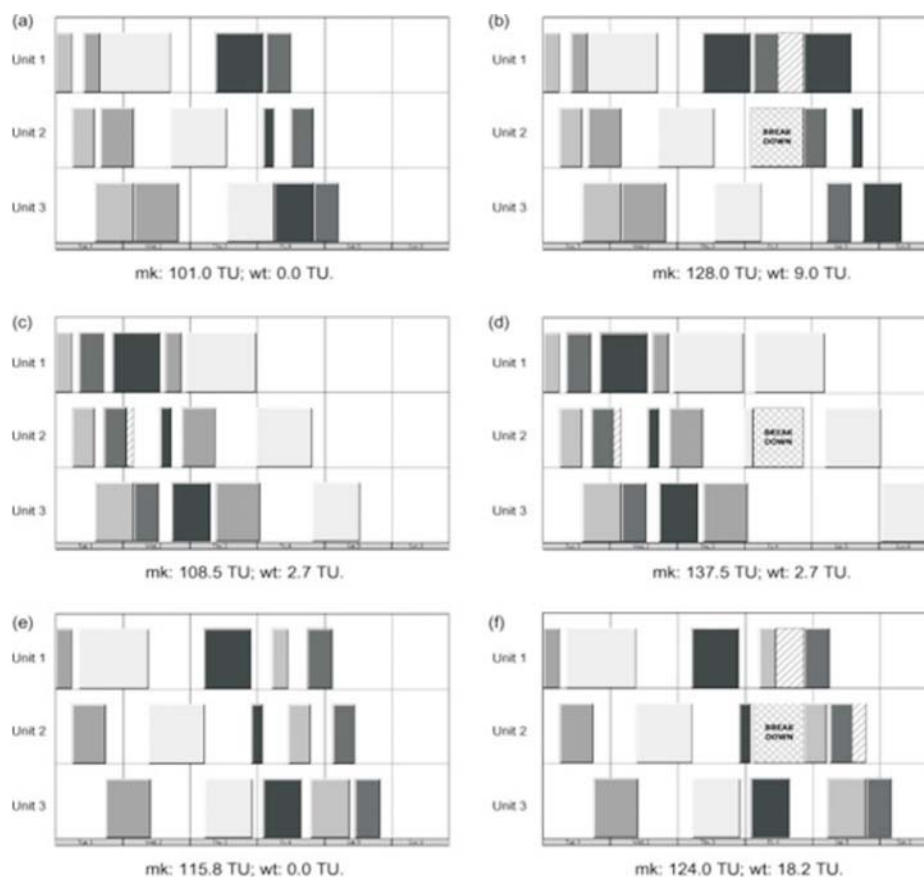
1. Koncepcje harmonogramowania predyktywnego i reaktywnego

W teorii decyzji często rozróżnia się dwa pojęcia: ryzyko i niepewność. W warunkach niepewności nie są znane prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych stanów rzeczy, które mają wpływ na wynik działania (Strzeszewski 1997). Natomiast ryzyko to dająca się zmierzyć niepewność, która występuje, gdy podczas planowania (podejmowania decyzji) znany jest rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia poszczególnych zdarzeń (Strzeszewski 1997). Ryzyko dotyczy zjawisk powtarzalnych, a w rzeczywistości często występują zdarzenia niepowtarzalne, związane z niepewnością.

Podobne znaczenie niepewności i ryzyka można znaleźć w zarządzaniu produkcją, w tym również produkcją górniczą. W harmonogramowaniu mamy do czynienia z niepewnością dotyczącą części informacji (niepełne informacje) i z ryzykiem dotyczącym innych informacji (nieprecyzyjne informacje). Źródłem niepewności w planowaniu produkcji jest nie losowość zdarzeń (rozpatrywana przy ryzyku), ale fakt, że o wystąpieniu poszczególnych zdarzeń decyduje wiele czynników, z których tylko część jest kontrolowana, tzn. znana i możliwa do uwzględnienia przy podejmowaniu decyzji. Podczas produkcji część czynników, mających wpływ na proces produkcyjny, to czynniki niekontrolowane tj. dostawcy materiałów, klienci, warunki atmosferyczne, zmiany legislacyjne (związane z samym prowadzeniem eksploatacji, ale również np. z ochroną środowiska), czynniki społeczne. Te czynniki często zaburzają harmonogram produkcji i są głównym źródłem niepewności.

Na rysunku 1 przedstawiono przykład harmonogramu w postaci wykresu blokowego. Trzy warianty pierwotnego harmonogramu (po lewej stronie rysunku) musiały zostać zmodyfikowane w wyniku wystąpienia awarii. Na rysunkach po prawej stronie do pierwotnego harmonogramu dodano dodatkowe bloki, pokazujące czas trwania awarii (obszary zakreskowane) oraz przesunięcie w czasie (opóźnienie realizacji) następujących po awarii zadań.

Znalezienie optymalnego lub suboptymalnego harmonogramu i tak może okazać się w praktyce niewystarczające, w związku z niepewnością występującą w systemach rzeczywistych. W związku z tym szczególnie duże praktyczne znaczenie mają algorytmy uwzględniające dynamikę systemów produkcyjnych w zmieniającym się otoczeniu. Podczas planowania produkcji w fazie harmonogramowania predyktywnego (ang. *predictive scheduling*) stosowane jest podejście proaktywne (ang. *proactive scheduling*), w którym tworzy się harmonogram odporny (ang. *robust schedule*) przez antycypację możliwych zakłóceń. Jednak mimo uodpornienia harmonogramu, w trakcie produkcji pojawiają się nieprzewidywalne zakłócenia, które powodują, że dane uszeregowanie jest już niewydajne lub nie-



Rys. 1. Przykład wpływu nieprzewidzianych czynników (awaria) na czas trwania zadań w harmonogramie (po lewej – pierwotny harmonogram, po prawej – harmonogram z uwzględnieniem awarii)
 Źródło: <http://ars.els-cdn.com>

Fig. 1. An example of unforeseen events (breakdown) on the duration of particular tasks in a schedule (on the left – the original schedule, on the right – the schedule taking into account the breakdown)
 Source: <http://ars.els-cdn.com>

możliwe do zrealizowania. Zachodzi wtedy konieczność zastosowania harmonogramowania reaktywnego (ang. *reactive scheduling*), które polega na rewizji i ewentualnej modyfikacji istniejącego harmonogramu, czyli reharmonogramowaniu (ang. *rescheduling*), w odpowiedzi na pojawiające się zaburzenia. Zmiana istniejącego uszeregowania zadań może rozwiązać konflikty występujące w bieżącym harmonogramie, np. problem związany z niedostępnością zasobów lub z awarią maszyny. Stosowanie reaktywnego harmonogramowania stwarza możliwość wykorzystania szans uzyskania bardziej efektywnego harmonogramu, pojawiających się w trakcie produkcji w związku np. ze zwiększeniem się dostępności zasobu lub z zakupem nowej maszyny (Klimek 2010).

W harmonogramowaniu predyktywno-reaktywnym na początku tworzy się harmonogram (ang. *baseline schedule*), który w trakcie realizacji jest zmieniany w odpowiedzi na pojawiające się zdarzenia zaburzające wydajność systemu lub uniemożliwiające realizację

tego harmonogramu (faza reaktywnego harmonogramowania). Tworzenie harmonogramu predyktywnego, przed realizacją projektu, pełni ważną rolę w planowaniu produkcji (Mehta i Uzsoy 1998). Między innymi:

- pozwala oszacować czas zakończenia projektu, możliwe jest etapowe rozliczanie się z odbiorcami projektu (określanie czasów realizacji poszczególnych etapów projektu), pozwala na monitorowanie terminowości realizacji umownych terminów projektu,
- usprawnia organizację produkcji, stabilizuje pracę, umożliwia koordynację wewnętrznych zasobów przedsiębiorstwa (przebrojenia, wspieranie personelu), ich wzajemne transfery między projektami (w środowisku wieloprojektowym),
- pozwala określić czasowe zapotrzebowanie na materiały (kontrakty z dostawcami, zamówienia dokładnie na czas *JIT Just-In-Time*).

Harmonogramowanie predyktywne jest bardzo istotne przy organizacji procesu produkcji. Zalety tworzenia harmonogramów podkreślają znaczenie stabilności systemu produkcyjnego, którą można osiągnąć przez realizację ściśle określonego planu zawartego w harmonogramie. W związku z tym jednym z celów reaktywnego harmonogramowania jest zachowanie stabilności uszeregowania zadań (ang. *schedule stability*), czyli możliwie najdokładniejsza realizacja harmonogramu predyktywnego. Im większa liczba zmian w harmonogramie, tym większa „nerwowość” produkcji prowadząca do dezorganizacji procesu produkcyjnego. W fazie predyktywnego harmonogramowania generowane są harmonogramy:

- nominalny (ang. *nominal schedule*) – deterministyczny, uwzględniający jedynie aktualne parametry systemu, bez uwzględniania zmienności i niepewności parametrów systemu,
- odporny na zakłócenia (ang. *robust schedule*), proaktywny (ang. *proactive schedule*) – uwzględniający zmienność i niepewność parametrów systemu – tworzenie takiego harmonogramu ma przeciwdziałać niestabilności i nerwowości (ang. *nervousness*) harmonogramów nominalnych.

W harmonogramowaniu nominalnym tworzony jest harmonogram początkowy, uwzględniający kryteria wydajnościowe, który następnie jest uodparniany podczas harmonogramowania proaktywnego. Proaktywny harmonogram tworzy się m.in. np. przez wstawianie buforów czasowych w newralgicznych miejscach uszeregowania. Podczas tworzenia uszeregowania może zostać uwzględniona statystyczna wiedza dotycząca możliwych zakłóceń planu produkcji, wykryta dzięki analizie wcześniejszego przebiegu produkcji (Klimek 2010).

Podczas harmonogramowania reaktywnego dokonywane są zmiany w realizowanym harmonogramie predyktywnym w odpowiedzi na pojawiające się zdarzenia, które mogą zaburzyć wydajność systemu lub uniemożliwić realizację tego harmonogramu. Zmiany te mają usprawnić proces produkcji: „naprawić” istniejący plan prac. W fazie reaktywnego szeregowania zadań do naprawy harmonogramu stosowane są następujące metody (Vieira i in. 2000):

- reharmonogramowanie z przesunięciem prawostronnym (ang. *right-shift rescheduling*),
- reharmonogramowanie częściowe (ang. *partial rescheduling*),
- regeneracja całego uszeregowania (ang. *complete regeneration*).

Metoda z przesunięciem prawostronnym polega na przesunięciu w prawo na wykresie Gantt'a czynności, które nie mogą być przetwarzane z powodu np. awarii maszyny lub niedoboru materiałów. Następną metodą naprawy zakłóconego uszeregowania zadań jest metoda częściowego reharmonogramowania (*partial rescheduling*), która sprowadza się do przestawiania tylko tych czynności, które są bezpośrednio lub pośrednio zakłócone (ang. *affected operations rescheduling*). Dąży się do jak najmniejszych zmian w harmonogramie w celu utrzymania stabilności systemu. Naprawa zaburzonego uszeregowania zadań może odbywać się również metodą regeneracji harmonogramu (*complete regeneration, total regeneration*). W podejściu tym zadania nie przetworzone do momentu reharmonogramowania, również te, których zaburzenie nie dotyczy, są poddawane procesowi szeregowania. Wadą tej metody jest długi czas obliczeń. Poza określeniem sposobu zmiany uszeregowania konieczne jest określenie momentów, w których należy zmienić harmonogram. Odpowiednia częstotliwość ponownego harmonogramowania ma duży wpływ na wydajność realizowanego uszeregowania zadań (Klimek 2010).

2. Niepewność i ryzyko w harmonogramowaniu produkcji górniczej

Spośród licznych ryzyk możliwych do zidentyfikowania w górnictwie, wiele może potencjalnie wpływać na harmonogramowanie produkcji. Można tu wymienić m.in.:

1. Ryzyko geologiczne – budowa złoża i zasoby.
2. Ryzyko rynkowe – zmienne ceny surowców, wahania kursów walut, relacje podaży i popytu na dany surowiec, wymagania jakościowe klientów co do produktu.
3. Ryzyko kosztowe – ceny paliw i materiałów pędnych, energii elektrycznej, kosztów zakupu/leasingu sprzętu.
4. Ryzyko infrastrukturalne.
5. Ryzyko środowiskowe.
6. Ryzyko polityczne.
7. Ryzyko związane z niezawodnością i dostępnością maszyn górniczych i sprzętu.
8. Ryzyko związane z wykorzystywaną i dostępną technologią.
9. Ryzyko pogodowe (np. sezonowość opadów, stan wysokiej wody po roztopach).

Oczywiście nie wszystkie wymienione czynniki będą wpływać na produkcję w takim samym stopniu. Poniżej przedstawiono charakterystykę kilku z nich.

2.1. Budowa złoża i zasoby

Wielkość produkcji kopalni zawsze zależy od zasobów. W polskich warunkach bardzo rzadko zdarza się uruchomienie projektu górniczego na kilka lat (jak ma to miejsce np. w USA czy Kanadzie). Do zagospodarowania wybierane są najczęściej najlepsze i najbardziej zasobne złoża, zapewniające stabilność produkcji przez kilkanaście czy kilkadziesiąt lat. Określenie zasobów kopalni następuje na etapie dokumentowania złoża poprzez kolejne przybliżenia w miarę zdobywania nowej informacji geologicznej. Im dokładniejsza jest informacja geologiczna o złożu, tym mniejsze ryzyko wystąpienia niespodziewanych zdarzeń, mogących mieć wpływ na harmonogram wydobywania. Niezrealizowanie harmonogramu

może być również związane z zaburzeniami budowy złoża – uskokami, kurzawkami, kawernami, występowaniem zjawisk krasowych itp. Mogą one wpływać na prowadzenie robót strzałowych czy urabianie złoża metodami mechanicznymi, opóźniając je bądź utrudniając.

2.2. Ryzyko rynkowe

Ryzyko rynkowe w górnictwie rud metali związane jest m.in. z dużymi wahaniami cen surowców na giełdach światowych i zmiennością kursów walut, w których podawane są ceny (przede wszystkim dolara amerykańskiego). Wpływ cen surowców na światowych rynkach na harmonogramy produkcji – zwłaszcza średnioterminowe, o horyzoncie czasowym rzędu kilku miesięcy do maksymalnie 2–3 lat – wydaje się oczywisty. Rosnące ceny metali motywują właścicieli kopalń do zwiększania produkcji, co może wymagać zakupów dodatkowego sprzętu, maszyn, zatrudnienia dodatkowych pracowników, wydłużenia czasu trwania zmian roboczych lub wprowadzenia dodatkowych zmian. Czynniki te zmieniają wcześniejsze harmonogramy produkcji i powodują konieczność ich adaptacji do bieżących warunków rynkowych. Oczywiście odwrotny skutek będą miały spadki cen – kopalnie będą się starały ograniczać zatrudnienie i redukować koszty, co może prowadzić np. do ograniczenia ilości zmian w ciągu doby czy ograniczenia produkcji. Ryzyko rynkowe może być ograniczane poprzez stosowanie odpowiednich instrumentów zabezpieczających, np. opcji lub kontraktów terminowych (*hedging*).

2.3. Ryzyko kosztowe

Niewątpliwie bieżące koszty ponoszone przez zakład górniczy wpływają na układ harmonogramów produkcyjnych. Inteligentne zarządzanie materiałami pozwala na takie dopasowanie harmonogramów, aby utrzymać produkcję na odpowiednim poziomie, a jednocześnie ograniczyć lub przynajmniej nie zwiększyć kosztów. Przykładowo, można zmienić układ zmian roboczych w taki sposób, aby w nocy – gdy energia elektryczna jest tańsza – wykorzystywać maszyny najbardziej energochłonne, a zmianę dzienną przeznaczać na remonty i konserwację. Przedsiębiorca może też wykorzystać niższe ceny zakupu/leasingu sprzętu czy maszyn do dodatkowych zakupów, które miał zaplanowane na bardziej odległą przyszłość. Wprowadzenie dodatkowych maszyn wpłynie z kolei na harmonogramy produkcji, prowadząc zapewne do zwiększenia wydobycia. Analiza kosztów jednostkowych wydobycia generowanych przez poszczególne oddziały/maszyny może z kolei prowadzić do decyzji o większym wykorzystaniu tych o najniższych kosztach produkcji i ograniczeniu produkcji przez maszyny najdroższe.

2.4. Niezawodność maszyn i sprzętu

Niezawodność jest bardzo ważną kwestią przy planowaniu, projektowaniu i funkcjonowaniu kopalni i systemów inżynierskich wykorzystywanych w górnictwie. Postępująca mechanizacja, rosnące koszty maszyn, powiększający się zakres i stopień skomplikowania

współczesnych systemów górniczych, jak również wdrażanie nowoczesnych technologii w górnictwie sugerują konieczność wprowadzenia zasad teorii niezawodności w celu utrzymania oczekiwanych poziomów produkcji i produktywności z uwzględnieniem bieżących warunków rynkowych.

Niezawodność to prawdopodobieństwo, że dana maszyna czy system będzie pełnił swoją funkcję przynajmniej przez zaplanowany okres czasu. Natomiast dostępność mówi o czasie, przez jaki maszyny czy system są na bieżąco wykorzystywane. W praktyce górniczej parametr ten jest bardziej użyteczny niż niezawodność. Logicznym podejściem w przypadku analizy niezawodności/dostępności jest dekompozycja danego systemu na podsystemy lub czynniki go tworzące, np. analiza funkcjonowania kopalni mogłaby być rozpoczęta od podziału na procesy związane z wydobyciem, przeróbką, transportem itd. Oczywiście, można dokonywać dalszych podziałów i oceniać niezawodność poszczególnych komponentów systemu pod kątem ich występowania w harmonogramach produkcji.

W literaturze (np. Simonsen i Perry 1999) najczęściej przyjmuje się wykładniczy wzrost czasu przeznaczanego na awarie i naprawy wraz z upływem czasu od zakupu maszyny. Efekty zużycia się maszyn i starzenia się sprzętu muszą zatem zostać uwzględnione w analizach dostępności oraz przewidywanych czasów awarii i napraw. Im jakiś element systemu jest starszy, tym większe będzie prawdopodobieństwo, że będzie ulegał awariom częściej niż jego nowy odpowiednik. Powstanie zatem rozkład awaryjności nazywany *increasing failure rate* (IFR), czyli o wzrastającej częstotliwości awarii. Można również zakładać, że po wprowadzeniu nowej maszyny wystąpi krótki okres rozruchu, w trakcie którego możliwa jest większa ilość awarii. Natomiast po jego zakończeniu awarie powinny występować dużo rzadziej, co przełoży się na rozkład o zmniejszającej się częstotliwości awarii – *decreasing failure rate* (DFR).

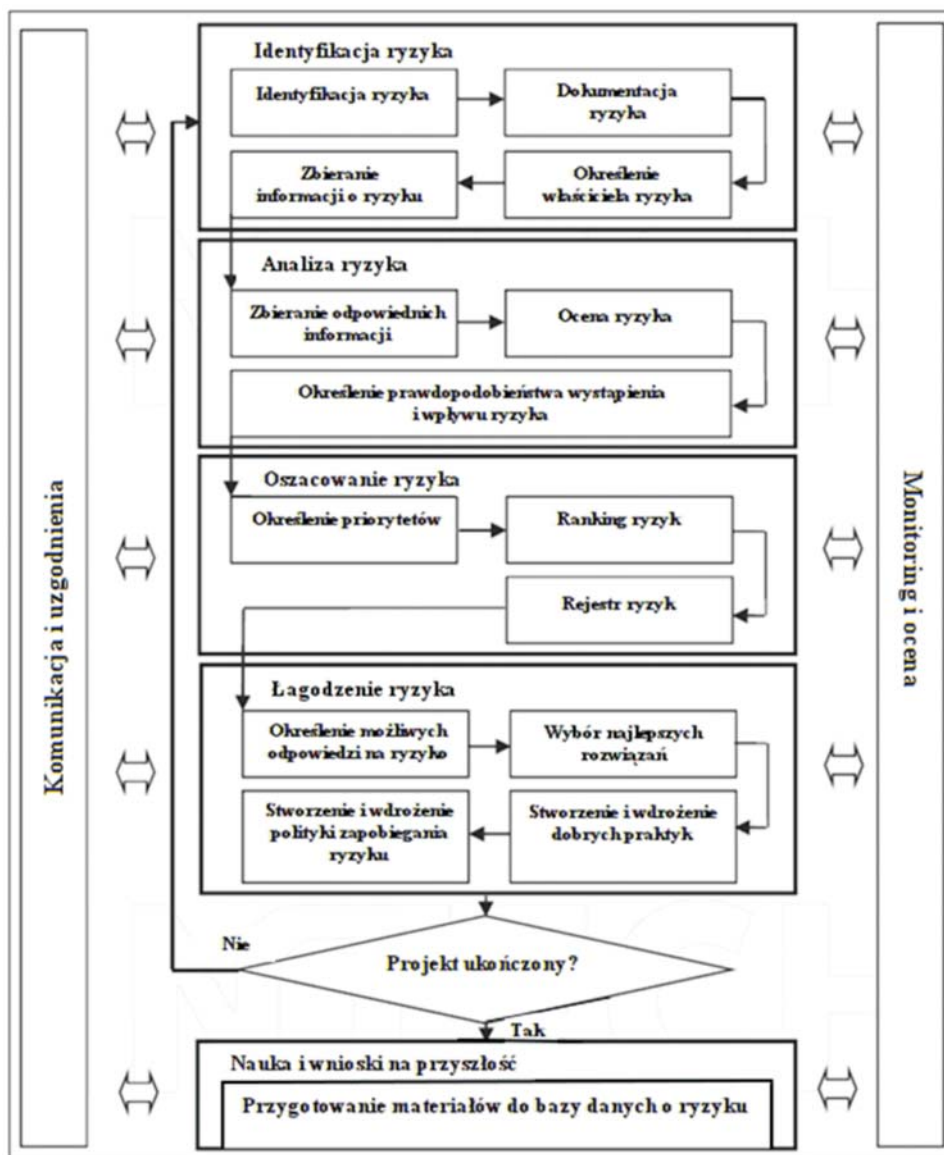
Analiza awaryjności ma szczególnie duże znaczenie w początkowych etapach funkcjonowania kopalni, kiedy przepływy pieniężne są ujemne, a każdy postój czy zatrzymanie produkcji lub nawet pojedynczej maszyny jest bardzo kosztowne ze względu na konieczność bieżącej spłaty zobowiązań. Harmonogramy produkcji muszą zatem uwzględniać odpowiednią ilość czasu na remonty i konserwację, zamiast skupiać się jedynie na maksymalizacji (chwilowego) wykorzystania posiadanego sprzętu.

2.5. Wykorzystywana i dostępna technologia

W przeciwieństwie do wielu innych branż, postęp techniczny w górnictwie odbywa się stosunkowo powoli. Wynika to z kilku czynników, m.in. wymaganej uniwersalności produktów (np. koncentratu) oraz ograniczonego wychodzenia produktów górnictwa z użycia (w przeciwieństwie do większości innych branż produkcyjnych, gdzie cykl życia produktów się skraca), długiego okresu zwrotu kosztów inwestycyjnych istniejących technologii i wysokiego ryzyka wprowadzania nowych technologii. Wprowadzenie nowych technologii i ulepszanie istniejących w górnictwie rud skupia się w największym stopniu na elementach niezwiązanych bezpośrednio z wydobyciem, np. przeróbce, mieleniu, hutnictwie itd. Aczkolwiek również w procesie wydobywczym zdarzają się rewolucyjne innowacje, które prowadzą do usprawnienia produkcji, zwiększenia wydajności czy możliwości wydobycia dotychczas niedostępnych zasobów. W górnictwie odkrywkowym można wspomnieć np.

o technologii *highwall mining*, która umożliwia wydobycie cienkich pokładów bez konieczności zdejmowania zalegającego nad nimi nadkładu. Oczywiście nowa technologia wymaga odpowiedniego dostosowania harmonogramów produkcji – zarówno pod kątem wykorzystania sprzętu, jak i zasobów ludzkich.

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy proces oceny ryzyka w postaci schematu blokowego. Na kolejne etapy procesu oceny ryzyka składają się: identyfikacja ryzyka, jego



Rys. 2. Proces oceny ryzyka (Chinbat 2011)

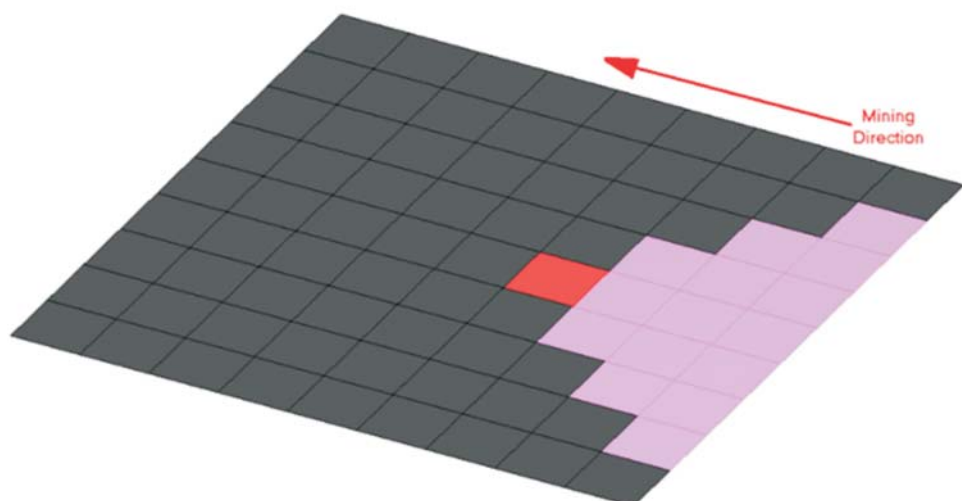
Fig. 2. The process of risk assessment (Chinbat 2011)

analiza, oszacowanie oraz opracowanie metod łagodzenia ryzyka. Efektem procesu analizy ryzyka jest opracowanie bazy wiedzy na jego temat i wyciągnięcie wniosków na przyszłość. Podczas całego procesu należy prowadzić uzgodnienia i konsultacje z interesariuszami oraz monitorować i oceniać postęp prac.

Analiza ryzyka jest niezbędna na wszystkich etapach planowania, projektowania i funkcjonowania kopalni. Przegląd literatury wskazuje, że obecnie najbardziej obiecującą metodą kwantyfikacji ryzyka występującego w górnictwie jest symulacja, która może być na bieżąco aktualizowana przez interwencje doświadczonego personelu kopalni. Prawidłowa identyfikacja ryzyk, jak również podjęcie działań mających na celu ograniczenie prawdopodobieństwa lub skutków ich występowania pozwala na upewnienie się, że stworzone harmonogramy produkcyjne będą realizowane bez nieprzewidzianych przerw czy przestojów.

3. Możliwości zastosowania w górnictwie

W kontekście górnictwa odkrywkowego harmonogram produkcji w danym horyzoncie czasowym polega na określeniu kolejności wybierania poszczególnych fragmentów złoża. Dany obszar przeznaczony do eksploatacji dzielony jest na zestaw trójwymiarowych bloków, każdy z określoną zawartością rudy (lub tonażem/objętością kopaliny w przypadku innych surowców). Każdemu blokowi przypisujemy zatem obiektywną funkcję wartości, która może być dodatnia lub ujemna (w przypadku bloków o niskiej zawartości rudy). Zadaniem osoby budującej harmonogram jest określenie kolejności wybierania bloków. Zazwyczaj mamy do czynienia z sytuacją, gdy przed wybraniem konkretnego bloku należy usunąć kilka innych, aby umożliwić do niego dostęp (np. należy wybrać przynajmniej dwa bloki sąsiadujące, blok znajdujący się nad analizowanym blokiem, jak również bloki przyległe do bloku znajdującego się nad analizowanym).



Rys. 3. Sekwencja wyboru bloków do eksploatacji (Gemcom 2011)

Fig. 3. The sequence of choosing the blocks for mining (Gemcom 2011)

Jednym ze sposobów rozwiązania tego problemu jest wykorzystanie algorytmów optymalizacyjnych, np. Lerchsa-Grossmana. Oprócz kolejności wybierania bloków należy również zdefiniować, kiedy dany blok powinien zostać wydobyty z uwzględnieniem zdolności technologicznej poszczególnych ogniw procesu technologicznego (systemu transportowego, kruszarek, zakładów wzbogacania, huty). Również bieżące warunki rynkowe mogą wpływać zarówno na kolejność eksploatacji bloków, jak i na to, czy dany blok w ogóle zostanie wydobyty (przy danej cenie surowca istnieje zawsze wartość procentowa zawartości metalu w rudzie, poniżej której eksploatacja jest nieopłacalna, tzw. *cut-off*). Wynikiem działania algorytmów optymalizacyjnych jest wartość NPV generowana przez dany harmonogram eksploatacji. Spośród szeregu wygenerowanych przez algorytm możliwości należy oczywiście wybrać tę, która maksymalizuje otrzymaną wartość NPV. Wybrany harmonogram musi ponadto być możliwy do zrealizowania w praktyce, tj. uwzględniać uwarunkowania geotechniczne, dostępność maszyn, optymalizację ilości zdejmowanego nadkładu, mieszanie surowca w celu otrzymania nadawy o stałych parametrach itp.

Wybór, czy należy w danym momencie eksploatować odsłonięty wcześniej blok powinno się zawsze rozpatrywać w dwóch aspektach – krótko- i długoterminowym. Wydawać by się mogło, że zawartość rudy w bloku jest dobrym miernikiem tego, czy powinien on być eksploatowany. Taki blok jest dla kopalni bardziej pożądany niż inny blok, o niższej zawartości rudy. Jest to podejście krótkoterminowe. W dłuższym terminie należy jeszcze uwzględnić fakt, czy wydobywanie danego bloku już w tym momencie umożliwi nam uzyskanie nadawy o odpowiedniej jakości (czy zapewni surowiec do mieszania) lub odsłoni dostęp do kolejnych bloków o jeszcze wyższej zawartości rudy. Harmonogram produkcji powinien uwzględniać i dbać o równowagę produkcji zarówno w aspekcie krótko-, jak i długoterminowym.

Omówiona wyżej koncepcja tworzenia harmonogramu jest zasadniczo podejściem predyktywnym. Komplikacje w realizacji harmonogramów zaczynają się w przypadku pojawienia się niespodziewanych trudności i/lub materializacji jednego lub wielu scharakteryzowanych wyżej ryzyk. Należy wówczas – w zależności od skali problemu i jego charakteru – zastosować jedno z wymienionych wcześniej podejść harmonogramowania reaktywnego:

- 1) reharmonogramowanie z przesunięciem prawostronnym (*right-shift rescheduling*) – przesunięcie (opóźnienie) w czasie realizacji danego zadania i/lub zadań następujących po nim;
- 2) reharmonogramowanie częściowe (*partial rescheduling*) – harmonogram eksploatacji jest modyfikowany tylko częściowo, aby przystosować go do bieżących uwarunkowań;
- 3) regeneracja całego uszeregowania (*complete regeneration*) – zaprzestanie realizacji harmonogramu, tworząc od podstaw zupełnie nowy.

Należy sądzić, że w praktyce przemysłowej podejścia wymienione w punktach 1 i 3 mogą nie być dobrze postrzegane przez władze kopalni ze względu na ich dezorganizujący wpływ na realizację zadań produkcyjnych. Zdroworozsądkowe podejście nakazywałoby w większości przypadków dokonanie modyfikacji harmonogramu w taki sposób, aby uwzględnić pojawiające się zakłócenia, a jednocześnie nie przerywać ciągłości produkcji.

Podsumowanie i wnioski

W większości przypadków harmonogramowania opisywanych w literaturze podejmuje się próby znalezienia optymalnego lub prawie optymalnego harmonogramu predyktywnego pod kątem różnorodnych kryteriów, dotyczącego prostych modeli z założeniem, że znane są wszystkie możliwe problemy mogące wystąpić w trakcie realizowania harmonogramu. Tego typu harmonogramy predyktywne tworzy się w celu późniejszej organizacji zadań produkcyjnych lub wykorzystuje przy innych pracach związanych z planowaniem. Ich zasadniczą wadą jest to, że nie uwzględniają faktu, iż w zdecydowanej większości przypadków systemy produkcyjne (w tym również zakłady górnicze) są środowiskami dynamicznymi, podlegającymi różnym zdarzeniom występującym w trakcie realizacji harmonogramu. Zdarzenia te powodują, że pieczołowicie zbudowany harmonogram predyktywny przestaje być optymalny, aktualny lub nawet wykonalny. Dla praktyki przemysłowej duże znaczenie ma zatem możliwość implementacji metod harmonogramowania dynamicznego. Istnieją trzy zasadnicze kategorie tworzenia harmonogramów dynamicznych: harmonogramowanie całkowicie reaktywne (*completely reactive scheduling*), odporne harmonogramowanie predyktywno-reaktywne (*predictive-reactive (robust) scheduling*) oraz odporne harmonogramowanie proaktywne (*robust pro-active scheduling*). W przypadku wystąpienia zdarzenia wpływającego na zmianę harmonogramu, istnieją dwa podstawowe rozwiązania: naprawa/drobna zmiana istniejącego harmonogramu (*schedule repair*) lub budowa zupełnie nowego harmonogramu, uwzględniającego pojawiające się zdarzenie (*complete rescheduling*). W tym drugim przypadku mamy większe szanse znalezienia optymalnego rozwiązania produkcyjnego. Natomiast jego zasadniczą wadą jest długi czas wymagany do stworzenia od zera nowego harmonogramu. W praktyce przemysłowej, gdzie zadania produkcyjne muszą być realizowane na bieżąco, takie rozwiązanie może być zatem nieakceptowalne. Naprawa czy korekta istniejącego harmonogramu w większości przypadków pozwalają na zaoszczędzenie znacznej ilości czasu i zachowanie stabilności dotychczasowej produkcji bez wprowadzania rewolucyjnych zmian.

Omówione w pracy metody harmonogramowania produkcji mogą być szeroko wspierane poprzez wykorzystanie nowoczesnego oprogramowania górniczego. Większość pakietów oferowanych przez producentów zawiera możliwość powiązania budowy złoża (poprzez stworzenie stosownego modelu jego budowy), projektowania kopalni i tworzenia harmonogramów produkcji (krótko-, średnio- i długoterminowych). Nowoczesne narzędzia informatyczne pozwalają na praktyczne zastosowanie scharakteryzowanych wyżej metod harmonogramowania produkcji, przede wszystkim dzięki znacznemu przyspieszeniu tworzenia poszczególnych wersji harmonogramów w stosunku do tradycyjnych narzędzi wykorzystywanych w przemyśle, np. arkuszy kalkulacyjnych.

Artykuł zrealizowany w ramach prac statutowych IGSMiE PAN „Predyktywne i reaktywne harmonogramowanie produkcji w odkrywkowych kopalniach rud metali – cz. 2”

Literatura

- Biruk, S. i Jaśkowski, P. 2010. Harmonogramowanie przedsięwzięć wieloobiektowych z ciągłą realizacją procesów na działkach roboczych. *Zeszyty Naukowe WSOWL* Nr 3 (157).
- Chinbat, U. 2011. Risk Analysis in the Mining Industry. *Risk Management in Environment, Production and Economy* – September 2011.
- Herka, W. 2003. Harmonogramowanie procesów ciągłych w warunkach niepewności jako wielokryterialny problem decyzyjny. *Informatyka Teoretyczna i Stosowana* R. 3 nr 5/2003.
- Gemcom Software – Surface Production Scheduling: Improving the Schedule. Gemcom MineSched tutorial. 11.01.2011.
- Gunn, E. 1998. A Brief Review of Operations Research in Mining. INFORMS/SCRO-CORS Spring 1998 Joint Meeting (40th Congrčs Annuel SCRO - CORS Annual Conference). Montréal, Québec, April 26–29.
- Klimek, M. 2010. *Predyktywno-reaktywne harmonogramowanie produkcji z ograniczoną dostępnością zasobów*. Rozprawa doktorska. Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Kraków.
- Kulejewski, J. i Zawistowski, J. 2011. Metoda symulacyjna wyznaczania wielkości buforów stabilizujących harmonogramy budowlane. *Budownictwo i Inżynieria Środowiska (Civil and environmental engineering)* 2.
- Mehta, S.V. i Uzsoy, R.M. 1998. Predictable scheduling of a job subject to breakdowns, *IEEE Transaction on Robotics and Automation* 14, s. 365–378.
- Ouelhadj, D. i Petrovic, S 2009. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems. *Journal of Scheduling* 1 2.
- Radosavljević, S. i Radosavljević, M. 2009. Risk Assessment In Mining Industry: Apply Management. *Serbian Journal of Management* 4 (1).
- Simonsen, H. i Perry, J. 1999. Risk identification, assessment and management in the mining and metallurgical industries. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy* October-December 1999.
- Strzeszewski, M. 1997. *Podjęmowanie decyzji w warunkach ryzyka i niepewności*. Politechnika Warszawska, http://www.is.pw.edu.pl/~michal_strzeszewski/articles/niepewnosc.pdf
- Sypniewski, S. 2012. Produkcja informatycznie zaplanowana. *Surowce i Maszyny Budowlane* nr 1.

