

MODELOWANIE PROCESÓW PRZEMYSŁOWYCH – DOŚWIADCZENIA I PERSPEKTYWY

Edyta BRZYCHCZY^{1*}, Aneta NAPIERAJ²

^{1*} AGH, Kraków; brzych3@agh.edu.pl

² AGH, Kraków

* Korespondencja

Streszczenie: W artykule przedstawiono istotę modelowania procesów przemysłowych na przykładzie procesu wydobywczego. Przedstawiono dotychczasowe doświadczenia i opracowane modele wykorzystywane w analizie procesu wydobywczego. Zaprezentowano również nowe możliwości analizy procesów w przedsiębiorstwach przemysłowych, w tym również działających w branży górniczej, w oparciu o dzienniki zdarzeń pochodzące z systemów informatycznych.

Słowa kluczowe: proces wydobywczy, modelowanie, techniki sieciowe, modele probabilistyczne, eksploracja procesów.

MODELLING OF INDUSTRIAL PROCESSES, EXPERIENCES AND PERSPECTIVES

Abstract: The article presents the essence of industrial processes modeling on the example of mining process. Present experiences and developed models used in the analysis of the mining process have been presented. New possibilities of process analysis, based on event logs from information systems in industrial enterprises, including those operating in the mining industry, were also presented.

Keywords: mining process, modelling, network techniques, probabilistic models, process mining.

1. Wprowadzanie

Procesy przemysłowe mogą mieć różny charakter w zależności od branży przemysłu i technologii jaką wykorzystuje przedsiębiorstwo. Można wyróżnić między innymi (Durlik, 1993):

- procesy wydobywcze – związane z pozyskiwaniem zasobów naturalnych z ziemi, wody i powietrza,
- procesy przetwórcze – powodujące zmiany własności fizykochemicznych surowców i często prowadzące do uzyskiwania zupełnie innych materiałów,
- procesy obróbkowe – powodujące zmianę kształtów i cech powierzchni lub struktury wewnętrznej wyrobów z materiałów metalowych, drewna, materiałów sztucznych,
- procesy montażowe – mające na celu złożenie wyrobu z dwu lub wielu części składowych i doprowadzenie go do stanu gotowości użytkowej.

Realizacja procesów w przedsiębiorstwie przebiega zazwyczaj według określonego modelu, określającego czynności i zdarzenia występujące w procesie, zasoby konieczne do jego prowadzenia, kolejność wykonywania czynności oraz dodatkowe elementy (np. źródła danych, informacje).

Modelowanie procesu jest jednym z najbardziej istotnych etapów cyklu zarządzania procesami biznesowymi tzw. cyklu BPM (*Business Process Management*). W budowie modelu procesu wykorzystywane są zazwyczaj różne źródła informacji tj. dokumentacja procesu (również z zintegrowanych systemów zarządzania, ISO), przeprowadzane są obserwacje i wywiady, a ostatnio, coraz częściej, zastosowanie znajdują techniki automatycznego odkrywania modeli procesu z danych.

Efektem tego etapu jest przedstawienie procesu za pomocą modelu, który w zależności od rodzaju przeprowadzanych na nim w dalszych krokach analiz, może przyjmować różne formy. Do najczęściej spotykanych w praktyce BPM należą modele graficzne, które mogą być prezentowane w postaci map procesów (notacje BPMN, EPC) oraz modele matematyczne, do których między innymi, zalicza się różnego rodzaju modele sieciowe (sieci stochastyczne, sieci Petriego, drzewa procesów).

Zasadnicze znaczenie dla budowy modelu ma cel, dla którego model jest opracowany, od niego bowiem zależy sposób budowy modelu i stopień jego uproszczenia. Warto pamiętać, że model jest zawsze wynikiem kompromisu pomiędzy dążeniem do wiernego i dokładnego odwzorowania rzeczywistości, a dążeniem do uproszczenia, które jest przydatne z punktu widzenia praktycznego (Magda, 1999).

Model procesu ułatwia zrozumienie procesu i umożliwia komunikację w tym zakresie z osobami biorącymi w nim udział, pomaga ocenić złożoność procesu i zidentyfikować problemy a także jest niezbędny dla dalszych analiz mających na celu zwiększenie efektywności procesu, bądź jego przeprojektowanie.

W niniejszym artykule przedstawione zostaną wybrane przykłady modelowania procesu wydobywczego, jako głównego procesu realizowanego w kopalniach podziemnych węgla kamiennego z uwzględnieniem jego specyficznych uwarunkowań technologicznych i organizacyjnych.

2. Proces wydobywczy – charakterystyka

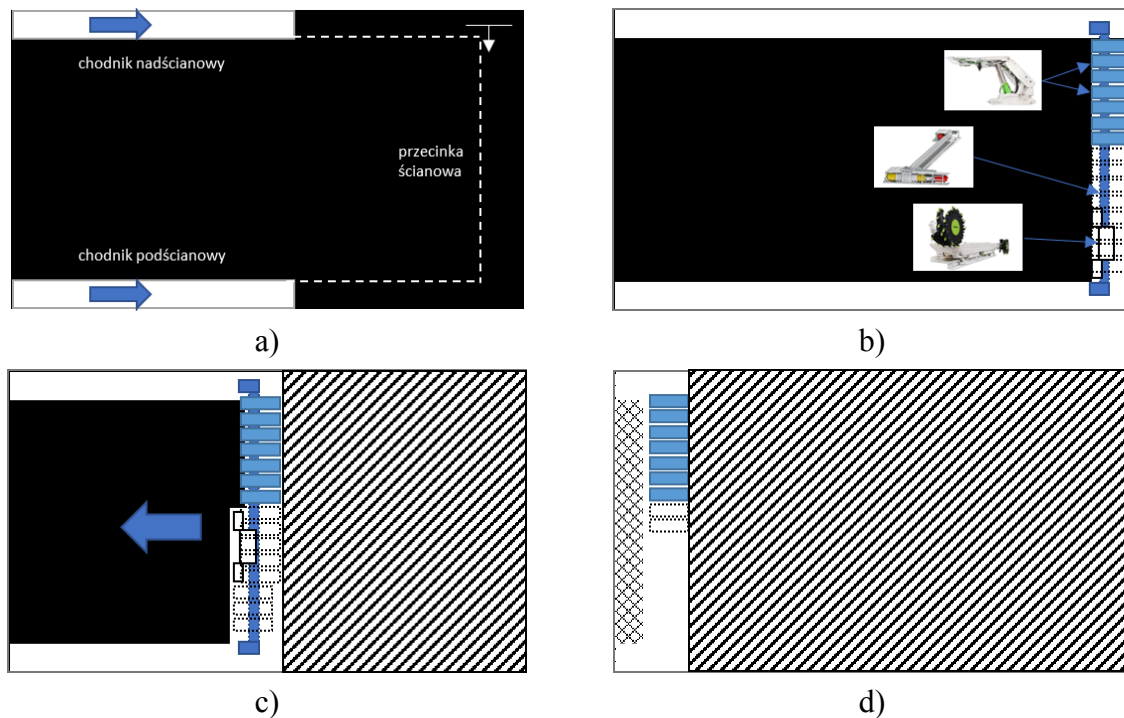
Proces wydobywczy może, w dość dużym uproszczeniu, charakteryzować ogólnie procesy realizowane w kopalni podziemnej prowadzące do wydobycia kopaliny lub, w ujęciu bardziej szczegółowym, odnosić się bezpośrednio do procesów (czynności) realizowanych w pojedynczym wyrobisku ścianowym kopalni. Stąd też, modele procesu wydobywczego mogą charakteryzować się różnym poziomem szczegółowości. Modele te mogą być modelami makro, obejmującymi relacje pomiędzy grupami procesów bądź modelami mikro, obejmującymi relacje pomiędzy poszczególnymi elementami procesu (czynnościami), w zależności od celu i zakresu analiz, dla których modele te są budowane.

W ujęciu ogólnym (modelu makro) proces wydobywczy można określić jako realizację określonych procesów (robót górniczych) umożliwiających osiągnięcie zakładanego rezultatu (np. wydobycia) przez kopalnię. Do robót tych należą:

- roboty przygotowawcze – mające na celu przygotowanie pól ścianowych, czyli wykonanie wyrobisk korytarzowych (chodników przyścianowych) i przecinek ścianowych w odpowiedniej obudowie,
- prace zbrojeniowe – polegające na montażu maszyn i urządzeń w przecince ścianowej i chodnikach przyścianowych,
- roboty eksploatacyjne – polegające na urabianiu, ładowaniu i odstawie urobku z przodka oraz likwidacji przestrzeni poeksploatacyjnej,
- prace likwidacyjne – polegające na demontażu maszyn i urządzeń w przecince ścianowej i chodnikach przyścianowych oraz zabezpieczeniu zrobów.

Zostały one przedstawione poglądowo na rysunku 1.

Modele makro, z uwagi na przyjęty stopień ogólności, mogą być wykorzystywane m.in. do analizy osiągniętych w kopalni podziemnej wyników produkcyjnych i ekonomicznych, analizy zużycia materiałów, energii, wykorzystania maszyn i urządzeń. Modele te mogą również wspomóc identyfikację procesów lub czynności wymagających dodatkowych analiz, dla których konieczne może okazać się opracowanie bardziej szczegółowych modeli.



Rysunek 1. Ogólny schemat realizacji robót górniczych w kopalni podziemnej (a – roboty przygotowawcze, b – prace zbrojeniowe, c – roboty eksploatacyjne, d – prace likwidacyjne). Źródło: opracowanie własne.

W ujęciu szczegółowym (modelu mikro) proces wydobywczy można określić jako cykliczną realizację zespołu operacji (czynności) powtarzających się w określonym porządku i czasie w wyrobisku ścianowym. Zestaw tych czynności będzie zależał od stosowanej technologii, wyposażenia i organizacji pracy, jednakże najczęściej (czyli w technologii dwukierunkowego urabiania kombajnem) obejmuje on (Napieraj, 2012):

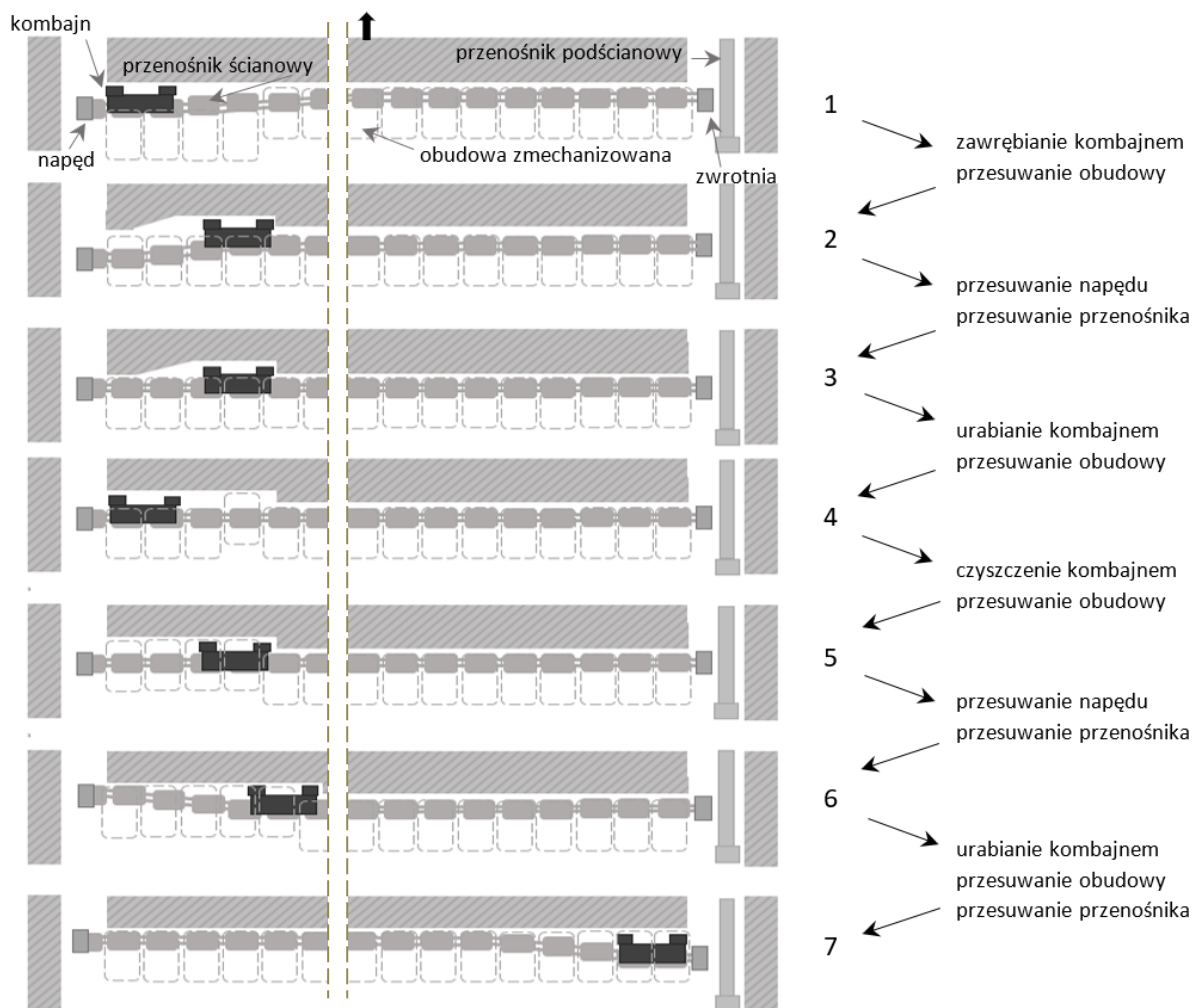
- zawrębiecie kombajnu,
- czyszczenie kombajnem,
- urabianie calizny,
- przesunięcie przenośnika,
- przesunięcie obudowy,
- przesunięcie napędu przenośnika,
- przesunięcie zwrotni przenośnika.

Przesunięcie obudowy oraz przenośnika następuje w ślad za pracującym kombajnem. Przesunięcia napędu i zwrotni wykonywane na obu końcach wyrobiska.

Czynności te zostały przedstawione poglądowo na rysunku 2.

Modele mikro mogą być wykorzystywane m.in. do szczegółowych analiz osiągniętych wyników produkcyjnych w poszczególnych wyrobiskach ścianowych, analizy wykorzystania maszyn i urządzeń, czasu pracy czy też organizacji robót. Modele te mogą wspomóc identyfikację problemów w procesie lub w czynnościach wymagających udoskonalenia. W tym miejscu warto zwrócić uwagę, że w najprostszym ujęciu, wspomniane wcześniej

roboty eksploatacyjne mogą być analizowane z wykorzystaniem modeli mikro procesu wydobywczego.



Rysunek 2. Ogólny schemat realizacji czynności w wyrobisku ścianowym. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Snopkowski, 2000).

2.1. Modelowanie procesu wydobywczego w kopalni węgla kamiennego









W modelowaniu i analizie procesów bardzo często zastosowanie znajdują różnego rodzaju techniki sieciowe. Są one najbardziej intuicyjną formą przedstawienia ciągu czynności, które składają się na proces (czy to produkcyjny, inwestycyjny lub inny).

Planowanie sieciowe w modelowaniu różnego rodzaju procesów w górnictwie polskim było popularne już w latach 60 – tych ubiegłego wieku. W pracy (Lisowski, 1966) opisano doświadczenia ze stosowania siatek czynności w tej branży przemysłu i techniki PERT. Istniejące metody analizy sieciowej wykorzystano do programowania wielkości nakładów inwestycyjnych na wykonanie górniczych wyrobisk udostępniających i przygotowawczych w pełnym cyklu budowy kopalń głębinowych (Cyrnek, 1991; Soliński, 1978; Zabierowski, Jaśkowski, Cyrnek, 1980). Planowanie sieciowe wykorzystano również do projektowania organizacji produkcji w wyrobiskach ścianowych (Jasiewicz, 1983; Łuczak, Waclawski,

1983), a dla potrzeb projektowania optymalnego udostępnienia podziemnych złóż zastosowanie znalazły sieci warstwowe, co opisano w pracy (Magda, Phoung, 1995). Inne zastosowania tego typu metod opisano również w (Kozdrój, Przybyła, 1986; Mazurek, Gawrońska, 1970).

Do najbardziej popularnych metod analizy sieciowej należą metoda ścieżki krytycznej (CPM) oraz metoda PERT. Służą one do analizy sieci o strukturze zdeterminowanej, w których każda czynność musi zostać wykonana, aby przedsięwzięcie (proces) mogło się zakończyć powodzeniem. Słabością tych sieci jest brak możliwości wyrażania alternatywnych wariantów wykonania czynności w procesie, co może utrudniać dokładność jego odwzorowania w modelu. Stąd też, w efekcie prac nad metodami sieciowymi pojawiła się propozycja sieci typu GAN (*Generalized Activity Network*) (Eisner, 1962, Elmaghraby, 1964) wprowadzająca rozłączne wejścia i wyjścia ze zdarzeń (Tab. 1), oraz metody GERT i GERTS (Nasierowski, 1978; Trocki, Grucza, Ogonek, 2003) służące do ich analizy.

Tabela 1.
Wierzchołki sieci stochastycznej

| | Deterministyczne „i” | Probabilistyczne „lub” |
|--|---|---|
| Wyjście z wierzchołków |  |  |
| Wejście do wierzchołków | | |
| Zdarzenie wystąpi, jeżeli zakończą się wszystkie czynności poprzedzające „i” |  |  |
| Zdarzenie wystąpi, jeśli skończy się jakakolwiek z czynności poprzedzająca „lub” |  |  |
| Zdarzenie wystąpi, jeśli skończy się jedna i tylko jedna z czynności wzajemnie się wykluczających „albo” |  |  |

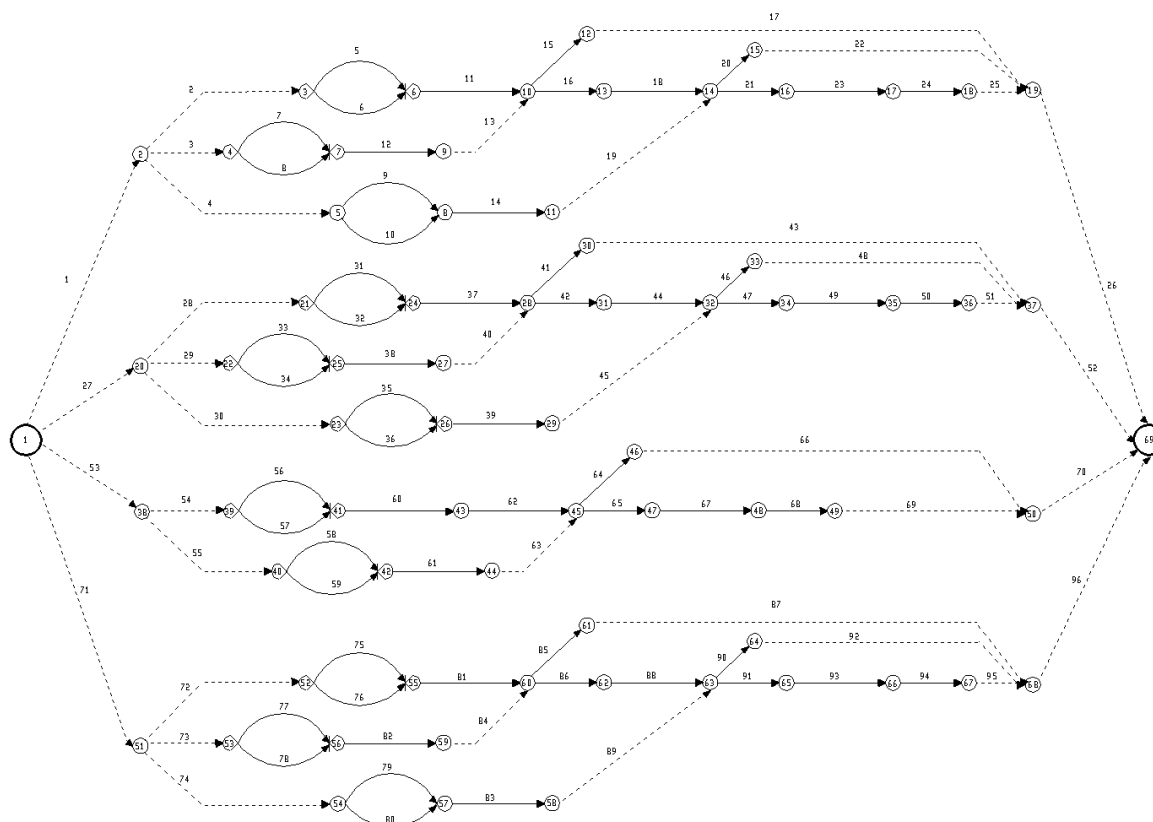
Źródło: oprac. na podst. (Trocki, Grucza, Ogonek, 2003).

Sieci GAN to tzw. sieci stochastyczne, w których każda czynność może być realizowana z określonym prawdopodobieństwem. Ponadto sieci te umożliwiają wyrażenie atrybutów czynności (podobnie jak w metodzie PERT) w postaci zmiennych losowych.

Sieci stochastyczne zostały wykorzystane do modelowania i optymalizacji robót górniczych w kopalni węgla kamiennego, co zostało opisane w pracy (Brzychczy, 2005).

Zbudowany model sieciowy miał na celu wspomaganie planowania w kopalni w zakresie analizy doboru maszyn i urządzeń do realizacji robót górniczych w poszczególnych wyrobiskach ścianowych. Model został opracowany dla przykładowej kopalni „KKK”. Wyrażono w nim potencjalne możliwości prowadzenia poszczególnych robót górniczych przy zastosowaniu różnego rodzaju maszyn i urządzeń wraz z oszacowaniem prawdopodobieństwa

ich realizacji (Rys. 3). Przedstawiona sieć składa się z 96 łuków i 69 wierzchołków (18 losowych oraz 51 zdeterminowanych).



Rysunek 3. Model robót górniczych planowanych w kopalni „KKK”. Źródło: (Brzyhczy, 2005).

Opracowany model umożliwił analizę realizacji procesu wydobywczego w kopalni „KKK” w zadanym okresie z uwzględnieniem różnych wariantów wyposażenia wyrobisk ścianowych. Analizę tą przeprowadzono z wykorzystaniem metody GERTS i symulacji Monte Carlo. Model stał się jednocześnie podstawą dla poszukiwania najlepszego rozwiązania spełniającego wszystkie zadane kryteria optymalizacji, którymi były: minimalizacja wartości oczekiwanej jednostkowego kosztu sprzedanego węgla w badanym okresie oraz maksymalizacja wartości oczekiwanej wyniku jednostkowego na sprzedaży w badanym okresie, przy zachowaniu warunku ograniczającego wyrażającego wymaganą wielkość produkcji w zadanym okresie.

2.2. Modelowanie procesu wydobywczego w wyrobiskach ścianowych

Modelowanie procesu wydobywczego w wyrobiskach ścianowych i pierwsze prace z tego zakresu, szczególnie dotyczące badań wpływu organizacji procesu na uzyskiwane wydobyte (Bromowicz, 1959; Hurysz, Myśliwski, Sikora, 1965; Kamionka, 1963; Lisowski, Czyłok, 1965; Lisowski, 1965; Lisowski, 1964; Osuch, Kędzierska, Kamionka, Piątek, 1964; Pełka, 1966), pojawiły się już w latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku. Metodyka badań w kolejnych latach była wzbogacana, wprowadzono rachunek prawdopodobieństwa, programowanie liniowe, symulacje, rachunek regresji, metody sieciowe i zbiory rozmyte

(Antoniak, Wianecki, 1971; Giza, Słomczyński, Winnicki, Wolf, 1997; Kozdrój, 1969; Krawczyk, Snopkowski, 1987; Matuszewski, 1969; Mikuła, 1978; Snopkowski, 1986; Warchoń, Dreineter, 1976; Zając, 1977). Nowe możliwości badawcze przyniósł także rozwój systemów informatycznych (Kamiński, 1984; Langer, 1983; Snopkowski, 1994; Snopkowski, 1990), który ułatwił tworzenie modeli symulacyjnych, szczególnie w zakresie analizy procesu wydobywczego z uwzględnieniem jego stochastycznego charakteru. Jako przykład można wskazać modele opracowane w metodzie probabilistycznego modelowania czasu trwania cyklu produkcyjnego realizowanego w wyrobiskach ścianowych (Napieraj, 2012).

Proces wydobywczy, realizowany w wyrobiskach ścianowych kopalń węgla kamiennego, charakteryzuje się wpływem na jego przebieg szeregu czynników (często o charakterze losowym), które nie występują w innych procesach produkcyjnych. Czynniki te są związane z uwarunkowaniami techniczno-organizacyjnymi oraz geologiczno-górnictwami.

Realizacja procesu wydobywczego w wyrobisku ścianowym obejmuje wykonanie szeregu czynności związanych bezpośrednio z urabianiem kalizny węglowej, a także z zabudową przestrzeni wyrobiska, z właściwym utrzymaniem skrzyżowań ściany z chodnikiem nad i podścianowym, itp. Wszystkie prace są niezbędne z punktu widzenia realizowanej technologii, lecz nie wszystkie wpływają w sposób bezpośredni na czas trwania cyklu produkcyjnego (Snopkowski, 1994).

Czas trwania cyklu produkcyjnego jest sumą czasów realizacji poszczególnych jego fragmentów (Rys. 4). Na rysunku zastosowano następujące oznaczenia:

L - długość ściany [m],

T_c - czas trwania cyklu produkcyjnego [min],

d_k - długość kombajnu [m],

p - minimalna odległość przesuwanego przenośnika od kombajnu [m],

s - odległość przesuwanej obudowy od kombajnu [m],

t_1 - czas czyszczenia odcinka ściany o długości $(x_p - d_k)$ [min],

t_2 - czas przesunięcia zwrotni, począwszy od momentu opuszczenia stojaków, do momentu ich rozparcia po przesunięciu o pełny zabiór [min],

t_3 - czas urabiania kombajnem na odcinku $(L - x_p)$ [min],

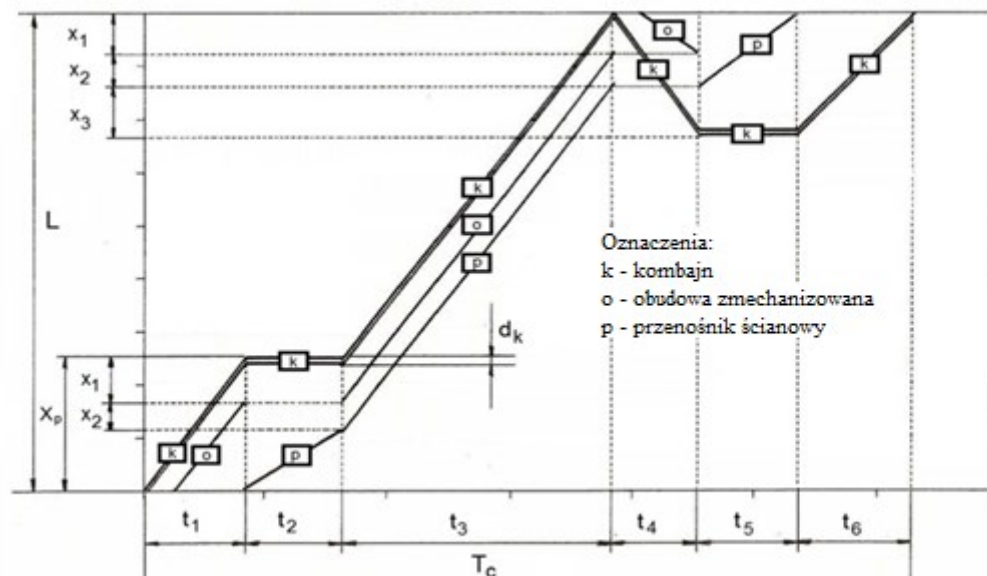
t_4 - czas zawrębiania kombajnu w kierunku środka ściany [min],

t_5 - czas przesunięcia napędu (prace związane z przebudową skrzyżowań tj. wypinanie łuków ociosowych od strony ściany, ewentualne przesuwanie szyn wzmacniających skrzyżowanie, wypinanie siatek itp. są wykonywane poza momentem czasowym t_2 i t_5) [min],

t_6 - czas urabiania kombajnem na odcinku $(x_2 + d_k + p + s)$ [min],

x_1, x_2, x_3 - wzajemne odległości wykonywanych czynności i operacji w ramach układu kombajn – obudowa – przenośnik [m],

x_p - odległość miejsca postoju kombajnu od skrzyżowania ściany z chodnikiem [m].



Rysunek 4. Schemat cyklu produkcyjnego dla technologii dwukierunkowego urabiania kombajnem. Źródło: opracowanie własne na podstawie (Snopkowski, 2000).

Czas trwania cyklu jest sumą czasów trwania czynności wykonywanych w ścianie, a opisujący go wzór ma postać:

$$T_c = \frac{1}{V_{cz}}(x_p - d_k) + \frac{1}{V_r} \cdot (L - x_p) + \left(\frac{1}{V_z} + \frac{1}{V_r}\right) \cdot (x_2 + d_k + p + s) + t_2 + t_5 \quad (1)$$

Powyższy model cyklu produkcyjnego został wykorzystany w modelowaniu probabilistycznym dla technologii dwukierunkowego urabiania kombajnem. Opracowano również model dla jednokierunkowego urabiania bazując na przedstawionych zasadach.

W efekcie przeprowadzonych symulacji z wykorzystaniem opracowanego modelu otrzymano zbiór wygenerowanych czasów trwania cyklu produkcyjnego $\{T_c^1; T_c^2; \dots; T_c^n\}$, który najlepiej aproksymuje rozkład log normalny. Następnie czasy trwania cyklu T_c , wykorzystano do obliczenia wydobywania zmianowego w analizowanym wyrobisku ścianowym na podstawie poniższego wzoru:

$$W_{zm} = \frac{T_d \cdot H \cdot z \cdot \gamma \cdot L}{T_c}$$

gdzie:

T_d – czas dyspozycyjny zmiany [min/zm],

T_c – czas trwania cyklu produkcyjnego [min],

H – wysokość ściany [m],

z – zabiór kombajnu [m],

L – długość ściany [m],

γ – ciężar objętościowy węgla [Mg/m³].

Jako rezultat uzyskano n-elementowy zbiór $\{W_{zm}^1; W_{zm}^2; \dots; W_{zm}^n\}$, który jest dobrze aproksymowany rozkładem normalnym.

Opracowany model umożliwił analizę czasów trwania czynności cyklu produkcyjnego dla technologii dwukierunkowego urabiania kombajnem dla przykładowego wyrobiska ścianowego w oparciu o dane pochodzące z bezpośrednich obserwacji procesu (badania chronometrażowe).

Zaprezentowana metoda i modele w niej zaproponowane mogą być również wykorzystane do analizy organizacji pracy w wyrobisku ścianowym, jak również do wyznaczenia szacowanej wielkości wydobywania z danego wyrobiska ścianowego, czy szerzej oddziały wydobywczego, a nawet całej kopalni.

3. Nowe możliwości modelowania procesów

Źródła informacji, które można wykorzystać w procesie modelowania są różne. Może to być analiza dokumentacji, która odnosi się pośrednio lub bezpośrednio do analizowanego procesu czy też obserwacja procesu lub uczestnictwo w nim np. jako aktywny uczestnik. Z podanymi źródłami informacji wiążą się jednak określone problemy, mające wpływ na ostateczny kształt modelu procesu. Dokumentacja może być zbyt ogólna (np. schemat organizacyjny) lub zbyt szczegółowa (np. instrukcje stanowisk), może również zawierać nieaktualne lub niezetelne informacje. Te niedostatki uzupełniane są najczęściej obserwacją rzeczywistego procesu, która umożliwiła pozyskanie wiedzy na temat aktualnego stanu procesu i weryfikacji zapisów dokumentacji, bądź jej uzupełnienia. Z obserwacjami wiążą się jednak następujące kwestie: jako uczestnik mamy często ograniczone spojrzenie na proces, a obserwacja całego procesu nie jest w pewnych przypadkach możliwa (np. wymaga zgody przełożonych). Ponadto obserwacje bezpośrednie często wpływają na przebieg procesu, poprzez zmianę zachowania pracowników biorących udział w obserwowanym procesie. Stąd też coraz powszechniej proponuje się uzupełnienie podanych powyżej źródeł informacji wykorzystywanych w modelowaniu procesów o analizę dzienników zdarzeń zapisanych w systemach informatycznych przedsiębiorstwa.

Utworzenie poprawnego dziennika zdarzeń dla potrzeb modelowania procesu wymaga sekwencyjnego zapisu zdarzeń w taki sposób, aby każde zdarzenie odpowiadało wykonanej czynności (tj. dobrze zdefiniowanemu etapowi procesu) i było powiązane z konkretnym przypadkiem realizacji procesu (instancją procesu np. klientem) i czasem jego wystąpienia. Dzienniki zdarzeń mogą zawierać dodatkowe informacje o zdarzeniach, tzw. dane kontekstowe, w których można zamieścić informacje o zasobach biorących udział w procesie (ludzie lub urządzenia), informacje o wykonaniu lub inicjowaniu czynności lub inne dane

zapisywane wraz ze zdarzeniem, np. wielkość zamówienia, koszty (Daniel, Barkaoui, Dustdar, 2012).

Analizą tak przygotowanych dzienników zdarzeń zajmuje się stosunkowo nowa dyscyplina nauki jaką jest eksploracja procesów (*process mining*) (van der Aalst, 2016). Stanowi ona ważny pomost pomiędzy nauką o danych oraz nauką o procesach, umożliwiającą zaawansowaną analizę danych w ujęciu procesów, w odróżnieniu od klasycznych technik eksploracji danych (*data mining*).

Jednym z głównych zadań eksploracji procesów jest budowa modelu procesu, polegająca na przekształceniu danych wejściowych pochodzących z dzienników zdarzeń w model bez wykorzystania informacji *a priori* o procesie. Modele te mogą przyjmować różne formy np. sieci Petriego, drzewa procesu czy też modelu BPMN.

Oprócz odkrywania modeli procesów z dzienników zdarzeń, eksploracja procesów umożliwi również prowadzenie (Daniel, Barkaoui, Dustdar, 2012):

- badania zgodności – polegającego na porównaniu istniejącego modelu z zapisami z dziennika zdarzeń dotyczącymi rzeczywistego procesu. To działanie pozwala na sprawdzenie, czy wykonane czynności procesu zapisane w dzienniku zdarzeń są zgodne z modelem i na odwrót, przy czym brane są pod uwagę różne typy modeli: proceduralne, organizacyjne, deklaratywne, reguł biznesowych, itd.
- rozbudowy modelu – polegającej na pogłębionej analizie realizowanego procesu poprzez wykorzystanie informacji kontekstowych zapisanych w dzienniku zdarzeń, co wykorzystywane jest do rozszerzenia i udoskonalenia istniejącego modelu procesu (np. poprzez wskazanie wąskich gardeł procesu, przepustowości poszczególnych ogniw, częstotliwości).

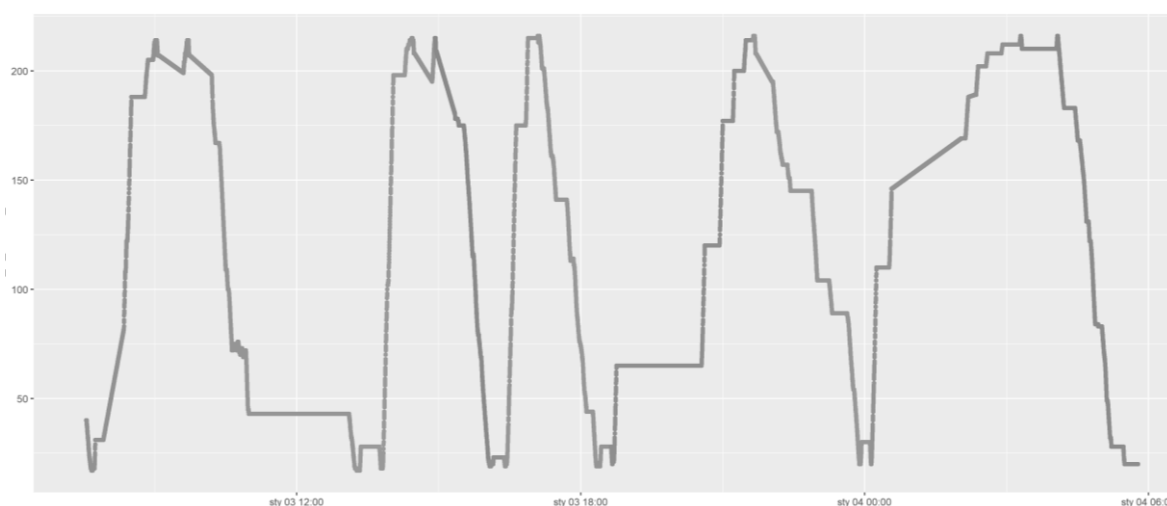
Wybrane techniki eksploracji procesów mogą również znaleźć zastosowanie w modelowaniu procesu wydobywczego. Źródłem informacji o procesie stają się tu zapisy z systemów monitorujących pracę maszyn i urządzeń w wyrobisku ścianowym [3]. W systemach tych następuje zapisanie odczytów z różnego rodzaju sensorów i czujników zainstalowanych na maszynach i urządzeniach, zarówno w postaci wielkości fizycznych (np. temperatura łożyska, prędkość kombajnu) jak i wartości logicznych odnoszących się do zdefiniowanego stanu (np. załączenie/wyłączenie). Proces wydobywczy w wyrobisku ścianowym, w ujęciu tak szczegółowej analizy, można rozpatrywać jako zbiór ściśle ze sobą powiązanych elementarnych procesów działania poszczególnych maszyn i urządzeń.

Istotną kwestią w takim ujęciu staje się wyróżnienie na podstawie wartości analizowanych zmiennych jednoznacznych etapów modelowanych procesów oraz wskazanie kolejnych przypadków realizacji procesu (czyli kolejnych cykli), które to elementy nie są wyrażone *explicite* w danych.

Na rysunku 5 zamieszczono wykres położenia kombajnu w ścianie, który jest jednym z parametrów umożliwiających określenie etapu pracy kombajnu oraz identyfikację cyklu.

Jak widać rzeczywiste realizacje procesu różnią się pomiędzy sobą, stąd też przygotowanie poprawnego dziennika zdarzeń może okazać się czasochłonne.

Złożonym zagadnieniem jest również wyznaczenie jednoznacznych etapów modelowanego procesu, co wymaga zarówno uwzględnienia teoretycznego przebiegu cyklu w wyrobisku ścianowym jak i zakresów wartości, jakie w poszczególnych etapach mogą przyjmować zmienne.



Rysunek 5. Przykładowe cykle pracy kombajnu ścianowego. Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 2 przedstawiono przykładowy dziennik zdarzeń dla procesu pracy kombajnu ścianowego obejmujący następujące czynności: nawrót, praca z posuwem, praca bez posuwu oraz praca z posuwem w zawrębieniu.

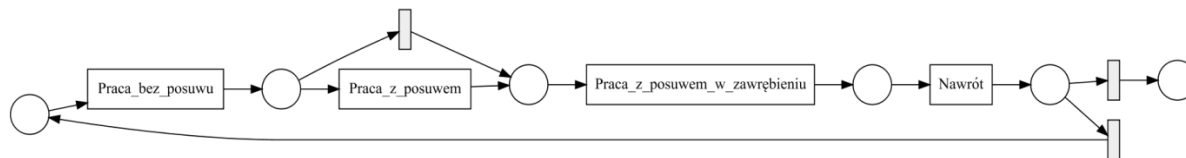
Tabela 2.

Fragment dziennika zdarzeń dla procesu pracy kombajnu ścianowego

| Nr cyklu | Czas | Czynność |
|----------|------------------|-------------------------------|
| 168 | 23.01.2016 14:01 | Praca bez posuwu |
| 168 | 23.01.2016 14:01 | Praca z posuwem w zawrębieniu |
| 168 | 23.01.2016 14:07 | Nawrót |
| 168 | 23.01.2016 14:08 | Praca bez posuwu |
| 168 | 23.01.2016 14:09 | Praca z posuwem w zawrębieniu |
| 168 | 23.01.2016 14:11 | Nawrót |
| 168 | 23.01.2016 14:12 | Praca bez posuwu |
| 168 | 23.01.2016 14:15 | Praca z posuwem |
| 168 | 23.01.2016 14:22 | Praca z posuwem w zawrębieniu |
| 168 | 23.01.2016 14:32 | Nawrót |
| 169 | 23.01.2016 15:05 | Praca bez posuwu |
| 169 | 23.01.2016 15:16 | Praca z posuwem w zawrębieniu |
| 169 | 23.01.2016 15:20 | Nawrót |
| 169 | 23.01.2016 15:22 | Praca bez posuwu |
| 169 | 23.01.2016 15:24 | Praca z posuwem w zawrębieniu |
| 169 | 23.01.2016 15:26 | Nawrót |

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie tak przygotowanego dziennika zdarzeń możliwe jest utworzenie modelu procesu pracy kombajnu w postaci sieci Petriego (Rys. 6). W tym celu można wykorzystać program ProM, który jest ogólnodostępnym narzędziem do eksploracji procesów, opracowanym w Uniwersytecie Technicznym w Eindhoven [44].



Rysunek 6. Przykładowy ogólny model pracy kombajnu ścianowego. Źródło: opracowanie własne.

Model w postaci sieci Petriego umożliwi dalsze analizy procesu np. w ujęciu perspektywy czasowej, jak i badanie zgodności – czyli porównanie rzeczywistej realizacji procesu z modelem teoretycznym i wskazanie występujących odchyłeń.

Znajomość modelu opartego na rzeczywistych danych w połączeniu z danymi kontekstowymi dotyczącymi warunków geologiczno-górnich oraz techniczno-organizacyjnych daje możliwość wyznaczenia zależności pomiędzy tymi warunkami a realizacją procesu, a w konsekwencji predykcji jego realizacji w zależności od warunków panujących w wyrobisku.

Techniki eksploracji procesów stają się coraz bardziej popularne w modelowaniu i analizie procesów. Obecnie znajdują zastosowanie zarówno w odniesieniu do procesów produkcyjnych jak i usługowych. Największa liczba projektów eksploracji procesów dotyczy sektora usług (42%), służby zdrowia (39%) oraz produkcji (14%) [43].

4. Podsumowanie

Działalność każdego przedsiębiorstwa możliwa jest poprzez realizację odpowiednio zaprojektowanych procesów. W projektowaniu i reinyżynierii procesów istotną rolę odgrywa ich modelowanie, ponieważ tworzone modele procesów umożliwiają przeprowadzanie symulacji, ich analizę, a w konsekwencji doskonalenie procesów w organizacji.

W artykule przedstawiono wybrane doświadczenia z zakresu modelowania procesu wydobywczego, realizowanego w kopalniach podziemnych węgla kamiennego z uwzględnieniem jego specyficznych uwarunkowań technologicznych i organizacyjnych (w ujęciu modeli mikro i makro). Zaprezentowano wybrane metody oparte na modelach sieciowych (sieci GAN i metoda GERTS, sieci Petriego) oraz modelach stochastycznych.

Obecne trendy w rozwoju przemysłu, które określane są wspólnie jako czwarta rewolucja przemysłowa, spowodowały pojawienie się potrzeby poszukiwania nowych metod badawczych, których celem jest wsparcie poprawy efektywności produkcji i obniżanie

kosztów eksploatacji w oparciu o zaawansowaną analitykę zautomatyzowanych systemów produkcyjnych.

Jako perspektywę dla modelowania procesów przemysłowych w niniejszym artykule zaprezentowano eksplorację procesów (*process mining*).

Techniki eksploracji procesów umożliwiają odkrywanie rzeczywistego modelu procesu, jego diagnostykę i analizę w oparciu o dzienniki zdarzeń pochodzące z systemów informatycznych przedsiębiorstwa. W przypadku modelowania procesu wydobywczego, do utworzenia dzienników zdarzeń, można wykorzystać między innymi dane gromadzone w systemach monitorujących pracę maszyn i urządzeń. Na podstawie takich dzienników zdarzeń można m.in. opracować model wybranego procesu np. w postaci sieci Petriego oraz wykonać badanie jego zgodności z teoretycznym modelem procesu, co może dostarczyć nowej, cennej wiedzy dla podejmowania decyzji w odniesieniu do realizacji analizowanego procesu.

Zaprezentowane w niniejszym artykule przykłady stanowią wyniki oryginalnych prac naukowych realizowanych w Katedrze Ekonomiki i Zarządzania w Przemysle na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii w Akademii Górniczo-Hutniczej, w której tematyka modelowania i optymalizacji procesu wydobywczego była i jest nadal rozwijana w podejmowanych badaniach.

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

Bibliografia

1. Antoniak, J., Wianecki, A. (1971). *Badanie procesów stochastycznych w technice górniczej przy zastosowaniu metod symulacji na maszynach cyfrowych*. Gliwice: Politechnika Śląska.
2. Bromowicz, R. i in. (1959). *Organizacja pracy kopalń*. *Górnictwo*, 16. Katowice: Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze.
3. Brzychczy, E., Trzcionkowska, A. (2017). New possibilities for process analysis in an underground mine. *Zeszyty Naukowe Politechnika Śląska, s. Organizacja i Zarządzanie*, 111, 13-25.
4. Brzychczy, E. (2005). *Metoda modelowania i optymalizacji robót górniczych w kopalni węgla kamiennego z wykorzystaniem sieci stochastycznych*. Praca doktorska. Kraków: AGH.
5. Cyrnek, C. (1991). *Wybrane zagadnienia przebiegu i oceny procesu inwestycyjnego budowy kopalń głębinowych*. Skrypty Uczelniane. Kraków: AGH.

6. Lisowski A. (red.) (1966). *Doświadczenia ze stosowania siatek czynności (PERT)*. Katowice: GIG.
7. Durlik, I. (1993). *Inżynieria zarządzania. Cz. I. Strategia i projektowanie systemów produkcyjnych*. Gdańsk: Placet.
8. Eisner, H. (1962). A Generalized Network Approach to the Planning and Scheduling of a Research Project. *Operation Research*, 10, 1.
9. Elmaghraby, S.E. (1964). An algebra for the Analysis of Generalized Activity Networks. *Management Science*, 10, 3.
10. Giza, E., Słomczyński, M., Winnicki, P., Wolf, S. (1997). Badanie wykorzystania czasu pracy układów technologicznych ściana – punkt załadowniczy w kopalni Bielszowice i Zabrze. *Przegląd Górniczy*, 2.
11. HSPI Process Mining: A Database of Applications. 2017 edition. HSPI Management Consulting, www.win.tue.nl/ieeetfpm/lib/exe/fetch.php?media=news:process_mining_database_applications_2017.pdf, 22.03.2018.
12. Hurysz, J., Myśliwski, K., Sikora, W. (1965). *Metoda i środki stosowane w przodkach dla zapewnienia maksymalnego wydobywania z jednego przodka*. Katowice: Główny Instytut Górnictwa.
13. Jasiewicz, J. (1983). Metoda projektowania organizacji produkcji w przodkach eksploatacyjnych kopalń węgla kamiennego. *Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej, Górnictwo*, 23. Wrocław: Wyd. Ossolineum.
14. Kamiński, A. (1984). *Metoda prognozowania wielkości wydobywania z przodków eksploatacyjnych w ramach wybranych technologii realizowanych w górnictwie węglowym*. Praca doktorska, Katowice.
15. Kamionka, M. (1963). Najkorzystniejsza długość zmechanizowanej ściany zawałowej. *Wiadomości Górnicze*, 5.
16. Kozdrój, M., Przybyła, H. (1986). Teoria Organizacji i Zarządzania. Cz. III. Modele matematyczne w organizacji produkcji górniczej. *Skrypty Uczelniane*, 1272. Gliwice: Politechnika Śląska.
17. Kozdrój, M. (1969). *Metody rachunku prawdopodobieństwa i statystyki matematycznej w organizacji produkcji górniczej*. Katowice: Śląsk.
18. Krawczyk, W., Snopkowski, R. (1987). *Wykorzystanie metod sieciowych do analizy cyklu produkcyjnego w przodkach ścianowych KWK*. Materiały konferencyjne „Matematyczne metody i technika komputerowa w górnictwie”. Szklarska Poręba.
19. Langer, J. (1983). *Ocena wpływu wybranych czynników na wielkość wydobywania, wydajność i koszty eksploatacji w ścianach węglowych*. Praca doktorska, Katowice.
20. Lisowski, A., Czyłok, A. (1965). Możliwości wykorzystania metod i modeli matematycznych oraz symulacyjnych do optymalizacji decyzji w górnictwie. *Przegląd Górniczy*, 6.

21. Lisowski, A. (1965). Potencjały jako narzędzie operatywnej analizy i kontroli pracy ścian kombajnowych. *Przegląd Górniczy*, 6.
22. Lisowski, A. (1964). Tworzenie i wykorzystanie dla potrzeb górnictwa regresyjnych modeli faktów doświadczalnych. *Przegląd Górniczy*, 4.
23. Łuczak, I., Waclawski, J. (1983). Zdolność produkcyjna układu techniczno-organizacyjnego w przodku ścianowym. *Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej. Górnictwo*, 23. Wrocław: Wyd. Ossolineum.
24. Magda, R., Phoung, T.H. (1995). *Projektowanie optymalnego udostępnienia podziemnych złóż na bazie modelowania matematycznego. Zastosowanie metod matematycznych w nauce i technice*. Materiały IV Międzynarodowego Sympozjum nt. Zastosowanie metod matematycznych, techniki komputerowej w geologii, górnictwie, metalurgii i pokrewnych dziedzinach. Kraków.
25. Magda, R. (1999). Modelowanie i optymalizacja elementów kopalń. *Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Seria z lampką górniczą*, 3. Kraków.
26. Matuszewski, J. (1969). Optymalizacja pracy w ścianach kombajnowych. Katowice: Śląsk.
27. Mazurek, A., Gawrońska, E. (1970). Zastosowanie systemu planowania i zarządzania (w oparciu o metody sieciowe) z optymalizacją według kilku parametrów w projektowaniu oraz budowie nowych i rekonstrukcji istniejących kopalń. *Projekty-Problemy*, 5.
28. Mikuła, E. (1978). Zmienne pozorne w równaniach regresji określających wpływ czynników technicznych i organizacyjnych na wydobywanie ze ścian zawałowych. *Górnictwo*, 2. Kraków.
29. Napieraj, A. (2012). *Metoda probabilistycznego modelowania czasu trwania czynności cyklu produkcyjnego realizowanego w przodkach ścianowych kopalń węgla kamiennego*. Kraków: AGH.
30. Nasierowski, W. (1978). Metoda GERT. *Przegląd Organizacji*, 2.
31. Osuch, A., Kędzierska, D., Kamionka, M., Piątek, K. (1964). Analiza ścian w przemyśle węglowym. *Prace ZKMPW, Komunikat*, 40. Katowice.
32. Pełka, B. (1966). Analiza i projektowanie przebiegu procesów produkcyjnych w kopalniach. Katowice: Śląsk.
33. Program ProM, www.processmining.org/prom/start, 22.03.2018.
34. Snopkowski, R. (1994). Die Kritikalitätsrichtwerte in der Bewertung der Einflusswahrscheinlichkeit der Tätigkeiten und des am Strebstoss ausgeführten Arbeitsganges auf die Gewinnung. *Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences*, 39, 1.
35. Snopkowski, R. (2000). *Metoda identyfikacji rozkładu prawdopodobieństwa wydobywania uzyskiwanego z przodków ścianowych kopalń węgla kamiennego*. Kraków: AGH.
36. Snopkowski, R. (1990). Numerisches des Produktionsprozesses verwirklicht in einem Strebstoss des Kohlenbergwerks. *Archives of Mining Sciences, Polish Academy of Sciences*, 35, 4.

37. Snopkowski, R. (1986). Obciążenie łuków grafów wielkościami rozmytymi w zastosowaniu do modelu organizacji produkcji w trudnych warunkach górniczych. *Górnictwo*, 4. Kraków.
38. Soliński, I. (1978). *Metoda oceny efektywności procesu budowy górniczego zespołu produkcyjnego w warunkach Lubelskiego Zagłębia Węglowego*. Praca doktorska. Kraków: AGH.
39. Daniel, F., Barkaoui, K., Dustdar, S. (Eds.) (2012). *The Process Mining Manifesto by the IEEE Task Force on Process Mining BPM 2011 Workshops, Part I, LNBIP 99*. Berlin: Springer-Verlag, 169-194.
40. Trocki, M., Grucza, B., Ogonek, K. (2003). *Zarządzanie projektami*. Warszawa: PWE.
41. van der Aalst, W.M.P. (2016). *Process Mining: Data Science in Action*. Berlin: Springer-Verlag.
42. Warchoń, M., Dreineter, B. (1976). Wpływ kompleksowej mechanizacji robót produkcyjnych na wydajność wyrobiskową. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 2. Katowice.
43. Zabierowski, J., Jaśkowski, A., Cyrnek, C. (1980). O metodach badań naukowych w programowaniu przemysłu górniczego. *Projekty-Problemy*, 7-8.
44. Zając, E. (1977). Modelowe ujęcie zależności przyczynowo-skutkowych pomiędzy wydajnością wyrobiskową a przyjętymi parametrami dla kopalń eksploatujących ściany z zawałem stropu. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, 11. Katowice.