

# Wybrane aspekty ryzyka w procesie produkcyjnym realizowanym w przodkach ścianowych kopalń węgla kamiennego

## Selected aspects of risk in the production process in longwall fronts in coal mines



Prof. dr hab. inż. Ryszard Snopkowski\*)



Dr inż. Aneta Napieraj\*)



Dr inż. Marta Sukiennik\*)

**Treść:** W artykule podjęto próbę kwantyfikacji ryzyka produkcyjnego, związanego z procesem produkcyjnym realizowanym w przodkach ścianowych kopalń węgla kamiennego. Określono mapę cyklu produkcyjnego realizowanego w technologii jednokierunkowego urabiania oraz wyszczególniono potencjalne rodzaje ryzyka oraz skutki, jakie może powodować dane niepowodzenie. Wyznaczono formułę całkowitą, której wykorzystanie umożliwi wyznaczenie prawdopodobieństwa niewykonania planu produkcyjnego.

**Abstract:** This paper attempts to quantify the production risk connected with production process in longwall fronts in coal mines. A production cycle chart for one-way winning technology was determined and potential types of risk and effects which can be brought by a particular failure presented. An integral formula was defined which may be used to determine probability of failure in the execution of the production plan.

### Słowa kluczowe:

węgiel kamienny, ryzyko, mapa procesu, przodek ścianowy

### Key words:

hard coal, risk, process chart, longwall front

## 1. Wprowadzenie

Pojęcie ryzyka nieodłącznie towarzyszy każdej działalności człowieka. Ryzyko definiowane jako zdarzenie, które ma charakter niechciany, ale co do którego nie ma pewności, że się wydarzy [1], determinuje całkowicie przebieg praktycznie każdego procesu produkcyjnego. Typologia ryzyka oraz obszarów jego występowania w literaturze przedmiotu znajduje swoje miejsce choćby w publikacjach [1], [4]. W przypadku analizy ryzyka mającego miejsce w procesie produkcyjnym, możemy mówić o tzw. ryzyku produkcyjnym. Obejmuje ono wszystkie możliwe (zarówno pozytywne, jak i negatywne) odchylenia oraz wahania w obszarze założonych celów i osiągniętych wyników działania przedsiębiorstwa [4].

Proces produkcyjny realizowany w przodkach ścianowych kopalń węgla kamiennego charakteryzuje się występowaniem stosunkowo dużego ryzyka produkcyjnego, ze względu na szereg determinujących go czynników. Czynniki wpływające na proces wydobywczy można podzielić przede wszystkim na dwie grupy: warunki geologiczno-górnictwa oraz warunki techniczno-organizacyjne. Występowanie tych czynników sprawia, że cykl produkcyjny realizowany w przodku ścianowym może być destabilizowany. Decyzje podejmowane odnośnie tego procesu, są zatem ściśle związane z warunkami niepewności oraz ryzykiem, które można rozumieć jako skutki tej niepewności.

Badania literaturowe wykazują, że istnieje wiele metod, które określają wpływ wymienionych parametrów na wydajność wyrobiskową i wydobywcę. Metody te wykorzystują m.in. rachunek prawdopodobieństwa, regresji i korelacji, a także systemy rozmyte [2, 6, 7, 8].

\*) AGH w Krakowie

## 2. Mapa procesu produkcyjnego realizowanego w przodku ścianowym

W polskim górnictwie węgla kamiennego zdecydowana większość przodków ścianowych prowadzonych jest z załamem stropu, w których maszyną urabiającą jest kombajn. W przodkach ścianowych eksploatacja prowadzona jest w technologii jednokierunkowego lub dwukierunkowego urabiania kombajnem. Jako przykład mapy procesu produkcyjnego zaprezentowano w dalszej części mapę procesu dla technologii jednokierunkowego urabiania kombajnem. Mapa zawiera następujące czynności: zawrębianie kombajnu, przesuwanie obudowy, przesuwanie napędu, przesuwanie przenośnika, urabianie kombajnem, przesuwanie obudowy, przesuwanie zwrotni, przesuwanie obudowy, przesuwanie przenośnika, czyszczenie kombajnem, przesuwanie przenośnika [7].

Mapę procesu dla technologii jednokierunkowego urabiania zamieszczono na rysunku 1.



Rys. 1. Mapa procesu dla technologii jednokierunkowego urabiania kombajnem

Fig. 1. Process chart for the technology of one-way winning by a longwall shearer

Źródło: Opracowanie własne

Source: own elaboration

W ramach prezentowanego schematu można wyodrębnić 4 moduły:

- Moduł 1: prace przygotowawcze (m1)
- Moduł 2: urabianie (m2)
- Moduł 3: prace końcowe (m3)
- Moduł 4: czyszczenie (m4)

Strukturę modułową zaznaczono na rysunku 2.



Rys. 2. Podział cyklu produkcyjnego realizowanego w przodkach ścianowych na moduły

Fig. 2. Division of production cycle in longwall fronts into modules

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

W każdym z modułów można wyodrębnić ryzyko, mogące pojawić się ze strony warunków techniczno-organizacyjnych jak również geologiczno-górnictwowych, a polegające na braku realizacji procesu, co przekłada się na brak wydobycia.

## 3. Ogólna identyfikacja ryzyka w przodku ścianowym

Uwarunkowania geologiczno-górnictwowe stanowią szereg utrudnień w przebiegu procesu produkcyjnego, który jest realizowany w warunkach specyficznych, tj. pod ziemią [9]. Specyfika uwarunkowań techniczno-organizacyjnych polega m.in. na wykorzystywaniu maszyn i urządzeń współpracujących ze sobą w określony sposób, uzależniony od stosowanej technologii, a także na konieczności uwzględniania w sumarycznym czasie pracy czasu, który jest tracony na dojazd (dojazd) do przodka [6].

W tabelicy 1 wyszczególniono potencjalne rodzaje ryzyka, skutki, jakie może powodować dane niepowodzenie oraz wskazano niektóre przyczyny jego występowania.

Ocena opisowa ryzyka może stanowić wstęp do próby jego skwantyfikowania. Tego typu badania są podejmowane i w kolejnych pracach przewiduje się ich publikację. W przykładzie kwantyfikacji ryzyka zamieszczono procedurę definiowania i oceny ryzyka w zakresie realizacji planu produkcyjnego [7].

## 4. Przykład kwantyfikacji ryzyka

Zakłada się, że wydobycie  $Q_z$  jest zmienną losową, którą można opisać funkcją gęstości prawdopodobieństwa.

W celu wyprowadzenia postaci ogólnej tej funkcji, skorzystano ze znanej zależności

$$Q_z = w_c \cdot L_c \tag{1}$$

gdzie:

$L_c$  – liczba cykli produkcyjnych wykonywanych w czasie zmiany roboczej cykl/zm.

$w_c$  – wydobycie z cyklu produkcyjnego, czyli

$$w_c = l \cdot h \cdot k_c \cdot \gamma \tag{2}$$

dla oznaczeń:

**Tablica 1. Ogólna identyfikacja ryzyka w poszczególnych modułach cyklu produkcyjnego**  
**Table 1. General identification of risk in particular modules of the production cycle**

Moduł	Czynność	Potencjalne niepowodzenie	Skutki	Przyczyna
Moduł 1	Zawrębiecie kombajnu	Brak zawrębiecia	Postój ściany	Awaria maszyny
				Brak zasilania
	Przesuwanie obudowy	Brak zabezpieczenia stropu - ryzyko obwał	Postój ściany	Warunki geologiczne
				Czynnik ludzki
Przesuwanie napędu	Brak całkowitego urobienia ściany (wnęki)	Możliwość urabiania tylko jednego cyklu	Awaria techniczna	
			Czynnik ludzki	
Przesuwanie przenośnika	Brak całkowitego urobienia ściany (wnęki)	Możliwość urabiania tylko jednego cyklu	Awaria techniczna	
			Czynnik ludzki	
Moduł 2	Urabianie kombajnem	Brak urobku	Postój ściany	Awaria maszyny
				Brak zasilania
	Przesuwanie obudowy	Brak zabezpieczenia stropu	Postój ściany	Warunki geologiczne
				Zasypanie przenośnika
Przesuwanie zwrotni	Brak płynności urabiania w następnym cyklu	Postój ściany	Czynnik ludzki	
			Awaria techniczna	
Moduł 3	Przesuwanie obudowy	Brak zabezpieczenia stropu - ryzyko obwał	Postój ściany	Brak zasilania
				Zasypanie urobkiem
	Przesuwanie przenośnika	Brak płynności urabiania w następnym cyklu	Postój ściany	Czynnik ludzki
				Awaria techniczna
Moduł 4	Czyszczenie kombajnem	Brak możliwości uruchomienia następnego cyklu	postój ściany	Awaria techniczna
				Brak zasilania
	Przesuwanie przenośnika	Brak możliwości urabiania w następnym cyklu	Postój ściany	Czynnik ludzki
				Awaria techniczna
				Czynnik ludzki

Źródło: Opracowanie własne

$l$  – długość przodka ścianowego, m  
 $h$  – wysokość przodka ścianowego, m  
 $\gamma$  – ciężar objętościowy węgla, Mg/m<sup>3</sup>  
 $k_c$  – krok cyklu produkcyjnego obliczany wg wzoru:

$$k_c = \eta_z \cdot z \quad (3)$$

gdzie:

$\eta_z$  – średni współczynnik wykorzystania zabioru [-]  
 $z$  – zabiór cyklu produkcyjnego, m/cykl

Można założyć, że wydobywanie z cyklu produkcyjnego  $w_c$  dla danych parametrów geometrycznych przodka – jest wielkością stałą, natomiast zmienną losową jest liczba cykli produkcyjnych wykonywanych w czasie zmiany roboczej. Zakłada się zatem, że zmienną  $L_c$  opisuje funkcja gęstości oznaczona symbolem  $f_{l_c}$ .

W celu wyznaczenia gęstości  $f_{q_z}$  zmiennej losowej:  $Q_z = w_c \cdot L_c$ , skorzystać można z następującego twierdzenia [5]:

Jeżeli  $X$  jest zmienną losową ciągłą o gęstości skoncentrowanej na przedziale  $(ab)$  oraz  $y=g(x)$  jest funkcją o pochodnej  $g'(x) \neq 0$  w tym przedziale, przy czym  $x = h(y)$  jest funkcją odwrotną do  $y = g(x)$ , to gęstość  $k$  zmiennej losowej ciągłej  $Y = g(X)$  jest postaci

$$k(y) = f[h(y)]|h'(y)| \quad (4)$$

Wykorzystując powyższe, funkcję gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $Q_z$  scharakteryzować można równaniem:

$$f_{q_z}(q_z) = \frac{1}{|w_c|} \cdot f_{l_c}\left(\frac{q_z}{w_c}\right), \quad q_z \in R^+ \quad (5)$$

Wydobywanie z cyklu  $w_c$  jest zawsze większe od zera, więc wzór przyjmuje postać

$$f_{q_z}(q_z) = \frac{1}{w_c} \cdot f_{l_c}\left(\frac{q_z}{w_c}\right), \quad q_z \in R^+ \quad (6)$$

gdzie:

$f_{q_z}(q_z)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $Q_z$  – wydobywanie zmianowe

$f_{l_c}\left(\frac{q_z}{w_c}\right)$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $L_c$  – liczba cykli produkcyjnych w ciągu zmiany roboczej ( $L_c = q_z/w_c$ ).

Zmienną  $L_c$  można przedstawić również wzorem

$$L_c = \frac{T_e}{T_c} \quad (7)$$

dla oznaczeń:

$T$  – efektywny czas pracy w przodku ścianowym, min,  
 $T_e$  – czas trwania cyklu produkcyjnego, min

Założono, że  $T_e$  oraz  $T_c$  są zmiennymi losowymi opisywanymi funkcjami gęstości odpowiednio  $f_{T_e}$  oraz  $f_{T_c}$ . Przyjęto, że czas  $T_e$  to czas przebywania w przodku ścianowym w trakcie jednej zmiany roboczej, pomniejszony o czas przerwy wynikających z awarii maszyn i urządzeń.

Wzór (7) jest zatem ilorzem dwóch zmiennych losowych o gęstościach  $f_{ie}$  oraz  $f_{ic}$  co oznacza, że aby wyznaczyć gęstość  $f_{ic}$  zmiennej  $L_c$  można skorzystać z twierdzenia [5]:

Jeśli zmienna losowa  $U$  jest ilorzem zmiennych losowych  $X$  i  $Y$  czyli

$$U = \frac{X}{Y} \quad (8)$$

wówczas gęstość  $k_1$  ilorazu zmiennych losowych  $X$ ,  $Y$  jest określona wzorem

$$k_1(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(uy, y)|y|dy \quad (9)$$

oraz w przypadku, gdy  $X$ ,  $Y$  są niezależnymi zmiennymi losowymi o gęstościach odpowiednio  $f_1, f_2$  wtedy

$$k_1(u) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(uy)f_2(y)|y|dy \quad (10)$$

Zmienne losowe  $T_e$  oraz  $T_c$  są zmiennymi niezależnymi, gdyż efektywny czas pracy w przodku ścianowym nie ma wpływu na długość czasu trwania cyklu produkcyjnego.

W oparciu o powyższe, ogólną postać funkcji gęstości prawdopodobieństwa zmiennej przedstawia wzór

$$f_{lc}(l_c) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{te}(l_c t_c) f_{tc}(t_c) |t_c| dt_c \quad (11)$$

gdzie:

$f_{lc}$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $L_c$  – liczba cykli produkcyjnych w ciągu zmiany,

$f_{te}$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $T_e$  – efektywny czas pracy w przodku ścianowym,

$f_{tc}$  – funkcja gęstości prawdopodobieństwa zmiennej losowej  $T_c$  – czas trwania cyklu produkcyjnego.

Uwzględniając, że zmienne losowe  $L_c$  oraz  $T_c$  przyjmują wartości ze zbioru liczb rzeczywistych dodatnich, otrzymujemy

$$f_{lc}(l_c) = \int_0^{\infty} f_{te}(l_c t_c) f_{tc}(t_c) t_c dt_c \quad (12)$$

Podstawiając obliczoną postać funkcji  $f_{lc}$  do wzoru (6) uzyskujemy

$$f_{qz}(q_z) = \frac{1}{w_c} \int_0^{\infty} f_{te}\left(\frac{q_z}{w_c} t_c\right) f_{tc}(t_c) t_c dt_c \quad (13)$$

Załóżmy, że plan wydobycia dla danego przodka ścianowego ustala się na poziomie równym  $Q_{zplan}$ . Można zatem postawić pytanie:

Jakie jest prawdopodobieństwo, że wydobycie zmianowe uzyskiwane w warunkach tego przodka ścianowego przekroczy wartość  $Q_{zplan}$ ?

W celu rozwiązania tak postawionego zagadnienia, skorzystać można ze wzoru (13), uwzględniając przy tym własności funkcji gęstości prawdopodobieństwa, czyli

$$P(Q_z > Q_{zplan}) = 1 - \frac{1}{w_c} \int_0^{Q_{zplan}} \int_0^{\infty} f_{te}\left(\frac{q_z}{w_c} t_c\right) f_{tc}(t_c) t_c dt_c dq_z \quad (14)$$

Prawdopodobieństwo, że wydobycie z tego przodka nie przekroczy wartości planowej  $Q_{zplan}$  jest zatem równe:

$$P(Q_z \leq Q_{zplan}) = \frac{1}{w_c} \int_0^{Q_{zplan}} \int_0^{\infty} f_{te}\left(\frac{q_z}{w_c} t_c\right) f_{tc}(t_c) t_c dt_c dq_z \quad (15)$$

Wzór (15), który otrzymano jest kwantyfikacją ryzyka niewykonania planu produkcyjnego. Jednostką ryzyka jest w tym przypadku prawdopodobieństwo zaistnienia opisanego zdarzenia.

## 5. Podsumowanie

Cechą charakterystyczną procesu produkcyjnego realizowanego w przodku ścianowym jest występowanie tzw. ryzyka produkcyjnego. Jest to skutek występowania specyficznych uwarunkowań tego procesu. Opis tych uwarunkowań, ich identyfikacja, była i jest przedmiotem wielu publikacji.

Znacznie rzadziej podejmowany jest problem kwantyfikacji ryzyka w kontekście występujących uwarunkowań procesu produkcyjnego. W pracy podjęto próbę takiej kwantyfikacji, uzyskując formułę całkową, której wykorzystanie umożliwia wyznaczenie prawdopodobieństwa niewykonania planu produkcyjnego, rozumiane jako ryzyko wystąpienia takiego zdarzenia.

**Publikację wykonano w 2015 roku w ramach badań statutowych zarejestrowanych na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie pod nr 11.11.100.693**

## Literatura:

1. *Adamska A.*: Ryzyko w działalności przedsiębiorstwa – podstawowe zagadnienia, w Ryzyko w działalności przedsiębiorstw. Wybrane aspekty, red. Firela A. Oficyna Wydawnicza Szkoły Głównej Handlowej, Warszawa 2009.
2. *Brzywczy E., Kęsek M., Napieraj A., Sukiennik M.*: The use of fuzzy systems in the designing of mining process in hard coal mines, Archives of Mining vol. 59 no. 3, Kraków 2014.
3. *Gawor P.*: Możliwości ograniczania ryzyka związanego z zagrożeniami elektrycznymi w górnictwie, Kwartalnik Górnictwo i Geologia, t5 z.4, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2009.
4. *Kaczmarek T.*: Ryzyko i zarządzanie ryzykiem. Ujęcie dyscyplinarne. Wydawnictwo Difin Warszawa, 2009.
5. *Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M.*: Calculus of probability and mathematical statistics in mining, PWN, Warszawa 1986.
6. *Napieraj A.*: Metoda probabilistycznego modelowania czasu trwania czynności cyklu produkcyjnego realizowanego w przodkach ścianowych kopalń węgla kamiennego, Wydawnictwa AGH, Kraków 2012.
7. *Snopkowski R.*: Longwall output plan considered in probability aspects, Archives of Mining Sciences; vol. 47 iss. 3, Kraków 2002.
8. *Snopkowski R.*: 2012, Stochastyczne metody analizy procesu produkcyjnego realizowanego w przodkach ścianowych kopalń węgla kamiennego, Wydawnictwa AGH, Kraków.
9. *Sukiennik M.*: Metoda wyznaczania obsady w przodkach ścianowych kopalń węgla kamiennego z uwzględnieniem stochastycznego charakteru procesu produkcyjnego, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2012.