

Stanisław DUŻY

Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Gliwice

Optymalizacja konstrukcji wyrobisk korytarzowych z uwzględnieniem zmienności warunków geologiczno-górnicznych i niepewności informacji

Streszczenie

Projektowanie konstrukcji wyrobisk korytarzowych w kopalniach podziemnych wymaga znalezienia kompromisu pomiędzy zapewnieniem bezpieczeństwa pracy w tych wyrobiskach a maksymalizacją efektu ekonomicznego. Dodatkową trudnością w projektowaniu wyrobisk podziemnych są zmienność warunków naturalnych i górniczych na wybiegu wyrobiska oraz przybliżone wartości parametrów opisujących warunki jego utrzymania. Rozwiązanie tego problemu jest możliwe przy zastosowaniu probabilistycznych metod projektowania opartych o teorię niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji.

Wychodząc z założenia o losowym charakterze oddziaływania górotworu na obudowę wyrobiska oraz losowym charakterze nośności obudowy jako kryterium optymalizacji w procesie doboru obudowy wyrobiska przyjęto funkcję ryzyka wiążącą prawdopodobieństwo wystąpienia awarii z jej skutkami. Podjęty problem przedstawiono na przykładzie projektowania wyrobisk korytarzowych w podziemnych kopalniach węgla kamiennego.

1. Wprowadzenie

Stateczność wyrobisk górniczych wyraża się najczęściej poprzez zachowanie w określonym czasie wymaganych gabarytów wyrobiska oraz zapewnienie bezpieczeństwa pracujących w nim ludzi, maszyn i urządzeń, co jest podstawowym zadaniem ich projektowania i realizacji (Chudek 1986). Stateczność wyrobiska zapewniana jest m.in. poprzez zastosowanie w wyrobisku odpowiedniej obudowy skutecznie zabezpieczającej wyrobisko.

Projektowanie i dobór obudowy wyrobisk górniczych oparty jest z reguły na bilansowaniu obciążenia obudowy ze strony górotworu i jej nośnością. O wielkości i rozkładzie obciążenia obudowy, jak i jej nośności decyduje szereg czynników, które przyjmują, zarówno na wybiegu wyrobiska jak i w czasie jego użytkowania, wartości zmienne. Zmienność warunków zależy głównie od charakteru ośrodka skalnego, jakości wykonania wyrobiska oraz dokładności rozpoznania geologicznego (Duży 2004, 2005). Podstawowym zatem zadaniem projektanta jest jak najdokładniejsze określenie tych dwóch parametrów.

Drugim aspektem procesu projektowania jest uzyskanie takiego ostatecznego rozwiązania, aby osiągnąć maksymalny efekt ekonomiczny. Biorąc powyższe pod uwagę często podstawowym zadaniem projektanta jest znalezienie kompromisu pomiędzy najkorzystniejszymi rozwiązaniami z punktu widzenia kryteriów technicznych i użytkowych oraz kryterium ekonomicznego. Zadanie to rozwiązać można na drodze analizy optymalizacyjnej.

2. Elementy projektowania optymalnego

W praktyce projektowej stosowane są różne metody projektowania. O wyborze określonej metody decyduje charakter problemu projektowego oraz narzędzia i procedury używane w tej metodzie. Wśród metod projektowania można wyróżnić (Szymczak 1998):

- metody projektowania tradycyjnego – charakteryzujące się pełną integracją procesu projektowania z procesem realizacji budowlanej, dzięki której w miarę postępu prac projektant uzupełniał projekt wstępny oraz nanosił w nim konieczne poprawki;
- metody heurystyczne – polegające na określeniu charakteru rozpatrywanego problemu i wykorzystaniu odpowiedniej analogii;
- metody systematyczne – oparte na szczegółowej analizie problemu i występujących w nim zależnościach oraz systematycznym przeglądzie możliwych wariantów rozwiązań;
- metody systemowe – opierające się na teorii systemów stosowane w procesie projektowania złożonych przedmiotów (systemów);
- metody katalogowe – wykorzystujące w projektowaniu gotowe zestawy rozwiązań cząstkowych, które mają szerokie zastosowanie w projektowaniu obiektów typowych;
- metody projektowania wspomaganego komputerowo (CAD/CAM) – pozwalające na wykonanie złożonych i pracochłonnych operacji rachunkowych i graficznych prowadzące do wyboru jednego spośród wielu możliwych wariantów wykorzystując do tego celu zasady optymalizacji, czyli wyboru najlepszego rozwiązania w ramach przyjętych założeń i ograniczeń.

W procesie projektowania na każdym jego etapie, niezależnie od stosowanej metody, występuje ocena opracowanych rozwiązań. Ocenie podlegają własności techniczne, ekonomiczne i użytkowe.

Własności techniczne podlegające ocenie obejmują takie zagadnienia jak wielkość i rozkład naprężeń i przemieszczeń konstrukcji, parametry drgań konstrukcji, nośność graniczna konstrukcji, współczynniki bezpieczeństwa itp. Wymagane wartości własności technicznych często określane są przez normy i przepisy ruchowe, co powoduje, że niektóre rozwiązania projektowe nie mogą być realizowane.

Własności ekonomiczne związane są z nakładami finansowymi ponoszonymi na wykonanie i utrzymanie wyrobiska z wartością otrzymanych efektów. W warunkach gospodarki rynkowej rozwiązanie projektowe może być zaakceptowane, gdy jego wartość rynkowa jest nie mniejsza od wielkości poniesionych nakładów finansowych.

Własności użytkowe obejmują cechy przedmiotu projektowanego określające jego funkcjonalność, a więc np. gabaryty wyrobiska, łatwość konserwacji i utrzymania, właściwy układ przestrzenny umożliwiający bezpieczną realizację procesów technologicznych itp.

Poszukiwanie najkorzystniejszego rozwiązania końcowego (lub ich zbioru) z uwagi na przyjęte kryterium przy uwzględnieniu występujących ograniczeń nazywane jest optymalizacją (Karbownik 1976).

W procesie projektowania przedmiot projektowany w przestrzeni n -wymiarowej odwzorowany jest przez wektor $x(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, którego współrzędne są wartościami liczbowymi przyporządkowanymi odpowiednim wielkościom projektowym. Poszukując optymalnego rozwiązania projektowego w obszarze dopuszczalnym Φ , poszukuje się takiego wektora x , dla którego funkcja $f(x)$ przyjmuje wartości najkorzystniejsze (najmniejsze lub największe):

$$f(x) \rightarrow \text{optimum } f(x) \text{ dla } x \in \Phi \quad (2.1)$$

gdzie:

$f(x)$ – funkcja kryterium (funkcja celu),

x – zmienna decyzyjna,

Φ – obszar rozwiązań dopuszczalnych.

Obszar wyznaczający zakres możliwych rozwiązań projektowych przedstawiają warunki:

$$\begin{aligned} \varphi_j(x) &= 0 & \text{dla } j &= 1, 2, \dots, m \\ \varphi_j(x) &\geq 0 & \text{dla } j &= m+1, m+2, \dots, \rho \end{aligned} \quad (2.2)$$

gdzie:

φ_j – j -te ograniczenie,

m – ilość występujących ograniczeń.

Z matematycznego punktu widzenia optymalizacja rozwiązania projektowego polega na poszukiwaniu ekstremum warunkowego funkcji celu, czyli na poszukiwaniu tych wartości zmiennych decyzyjnych x_1, x_2, \dots, x_n , dla których funkcja celu

$$f = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (2.3)$$

osiąga wartość maksymalną lub minimalną oraz gdy równocześnie spełnione są warunki ograniczające:

$$\begin{aligned} \varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_n) &= 0 & \text{dla } j &= 1, 2, \dots, m \\ \varphi_j(x_1, x_2, \dots, x_n) &\geq 0 & \text{dla } j &= m+1, m+2, \dots, \rho \end{aligned} \quad (2.4)$$

Jedną z najbardziej efektywnych metod rozwiązywania problemów optymalizacyjnych jest sprowadzenie ich do problemu z jednym kryterium, którego najprostszym sposobem jest kombinacja liniowa poszczególnych kryteriów w postaci (Szymczak 1998):

$$f = \sum_{i=1}^n c_i \cdot f(x_i) \quad (2.5)$$

gdzie:

$f(x_i)$ – wartość funkcji celu dla i -tego kryterium,

c_i – współczynniki określające wagę poszczególnych kryteriów.

3. Sformułowanie problemu optymalizacji konstrukcji wyrobiska korytarzowego

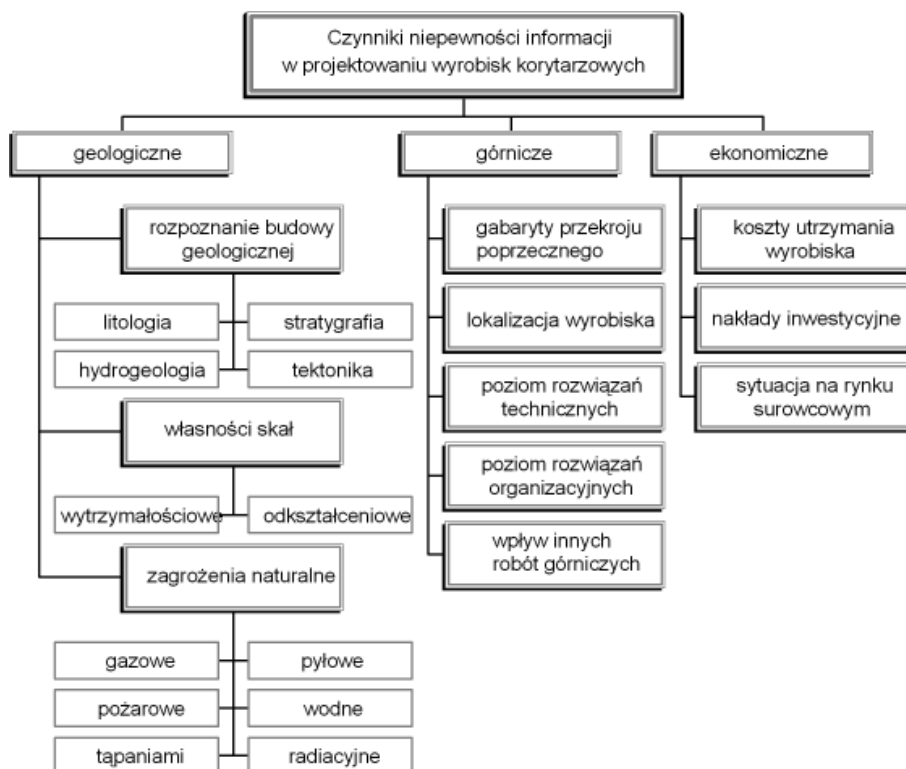
Stosowane dotychczas i szeroko opisane w literaturze metody rozwiązywania problemów optymalizacyjnych oparte są o metody deterministyczne opierające się na założeniu, że wszystkie dane wejściowe do projektowania określone są dokładnie jedną wartością, niezmieniającą się w całym okresie użytkowania konstrukcji. Doświadczenie budownictwa podziemnego wskazuje jednak, że w odniesieniu do wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego jest to bardzo trudne. Trudności te wynikają z tego, że wyrobiska wykonywane są w górotworze, który charakteryzuje się zmiennością zarówno budowy, jak i własności skał (Duży 2004, 2005).

W praktyce projektowej do opracowania prognozy oddziaływania górotworu na obudowę wyrobisk górniczych powszechnie stosowane są metody deterministyczne zakładające,

że analizowane wyrobisko zlokalizowane jest w ośrodku o tej samej budowie i własnościach na całym przyjętym odcinku wyrobiska. Jako reprezentatywne wartości poszczególnych parametrów niezbędnych do obliczeń prognostycznych przyjmuje się ich wartości średnie.

Nośność obudowy określana jest najczęściej w oparciu o badania laboratoryjne lub w oparciu o metodę stanów granicznych nośności i użytkowania konstrukcji.

W celu uwzględnienia ewentualnych zmian w budowie ośrodka lub jego własnościach oraz zmian nośności obudowy przyjmuje się współczynniki bezpieczeństwa, które pozwalają na projektowanie obudowy z pewnym zapasem. Stosowane w projektowaniu budowli podziemnych współczynniki nie obejmują zmienności poszczególnych parametrów, a raczej związane są z praktycznym doświadczeniem projektanta lub autorów stosowanych metod projektowania. Na rys. 3.1 przedstawiono główne czynniki powodujące niepewność informacji w projektowaniu budowli podziemnych. Niepewność informacji wynika głównie z zmienności ośrodka skalnego, jakości wykonania wyrobiska, jakości elementów obudowy, jakości wykonania obudowy, dokładności rozpoznania geologicznego, złożoności warunków górniczych, stopnia rozpoznania geologicznego, warunków rynkowych itp.



Rys. 3.1. Główne czynniki niepewności informacji w procesie projektowania wyrobisk korytarzowych
Fig. 3.1. Main features of information uncertainty in the process of excavation designing

Jak z rys. 3.1 wynika, dobór obudowy dla wyrobisk podziemnych wykonywany jest w przy wykorzystaniu szeregu danych określanych z mniejszym lub większym przybliżeniem. Stan

ten prowadzi do sytuacji, w której większość danych można traktować jako zmienne losowe. Oszacowanie bezpieczeństwa wyrobisk górniczych możliwe jest jedynie przy wykorzystaniu teorii bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji.

Podstawowym zadaniem przy formułowaniu problemu optymalizacji jest zdefiniowanie kryterium optymalizacji, czyli parametru lub zespołu parametrów, których wartość wskazuje na „dobroć” rozwiązania projektowego. Ponieważ przy rozwiązywaniu zagadnień technicznych występują zagadnienia nie tylko techniczne, ale i ekonomiczne, najogólniejszym kryterium optymalizacyjnych w przedmiotowym zadaniu jest ryzyko.

Ryzyko jest to funkcja prawdopodobieństwa wystąpienia określonych niebezpiecznych zdarzeń i wynikających z nich konsekwencji. Często ryzyko określa się w sposób ilościowy z zależności (Sobała, Rosmus 1996):

$$R = p \cdot k \quad (3.1)$$

gdzie:

R – ryzyko,

p – prawdopodobieństwo wystąpienia awarii,

k – konsekwencje wynikające z zagrożeń.

Takie przedstawienie ryzyka pozwala na ocenę i porównanie jego poziomów wynikających z różnych zagrożeń. Ocena ryzyka jest to proces szacowania jego wielkości i określanie warunków, kiedy ono może być tolerowane lub akceptowane.

3.1. Prawdopodobieństwo wystąpienia awarii konstrukcji wyrobiska

Na wielkość prawdopodobieństwa wystąpienia awarii konstrukcji wyrobiska podziemnego decydujący wpływ mają obciążenie konstrukcji i jej nośność.

W celu uwzględnienia zmienności warunków geologicznych i górniczych dane przyjmowane do obliczeń obciążenia obudowy można traktować jako zmienne losowe, co powoduje, że oddziaływanie górotworu na obudowę również traktować można jako zmienną losową wielowymiarową.

Wykorzystując metody analizy statystycznej przeprowadzić można badania rozkładu potrzebnych do projektowania budowli podziemnych parametrów charakteryzujących własności masywu. W efekcie analizy statystycznej jako dane wejściowe do obliczeń obciążenia obudowy stalowej podatnej uzyskuje się następujące wielkości (Duży 2004, 2005):

- wartość średnia i odchylenie standardowe wytrzymałości na ściskanie określonego pakietu skał – \bar{R}_c, s_{Rc} ;
- wartość średnia i odchylenie standardowe modułu sprężystości określonego pakietu skał – \bar{E}, s_E ;
- wartość średnia i odchylenie standardowe naprężeń w górotworze otaczającym wyrobisko – $\bar{\sigma}_z, s_{\sigma_z}$;
- wartości średnie i odchylenia standardowe gabarytów wyrobiska – $\bar{S}_w, s_{S_w}, \bar{W}_w, s_{W_w}$.

Nośność stalowej obudowy łukowej podatnej określana jest najczęściej w oparciu o badania laboratoryjne, lub w oparciu o analizę rozkładu i wielkości sił wewnętrznych w obudowie i na tej podstawie określanie nośności z dwóch kryteriów, a mianowicie kryterium wytrzymałości kształtownika oraz kryterium nośności zamków obudowy (Chudek 1986).

Analogicznie, jak w przypadku obciążenia konstrukcji, dane wejściowe do określenia nośności obudowy stalowej podatnej można określić jako (Duży 2004, 2005):

- wartość średnią i odchylenie standardowe wytrzymałości na rozciąganie stali, z której wykonane są łuki odrzwi obudowy – \bar{f}_d, s_{f_d} ;
- wartość średnią i odchylenie standardowe maksymalnego momentu zginającego występującego w najbardziej wyężonym przekroju odrzwi obudowy – $\bar{M}_{\max}, s_{M_{\max}}$;
- wartość średnią i odchylenie standardowe wskaźnika zginania przekroju profilu, z którego wykonane są odrzwia obudowy – \bar{W}_x, s_{W_x} ;
- wartość średnią i odchylenie standardowe siły osiowej występującej w najbardziej wyężonym przekroju odrzwi obudowy – \bar{N}_0, s_{N_0} ;
- wartość średnią i odchylenie standardowe współczynnika wyobczeniowego dla danego profilu oraz wielkości odrzwi – $\bar{\varphi}, s_{\varphi}$;
- wartość średnią i odchylenie standardowe przekroju poprzecznego profilu, z którego wykonane są odrzwia obudowy – \bar{A}, s_A ;
- wartość średnią i odchylenie standardowe nośności zamka odrzwi obudowy – N_z, s_{N_z} ;
- wartość średnią i odchylenie standardowe siły osiowej w miejscu najbardziej wyężonego zamka odrzwi obudowy – \bar{N}, s_N .

Przyjmując dane wejściowe do projektowania konstrukcji wyrobiska jako zmienne losowe o rozkładzie normalnym uzyskuje się wielkości losowe nośności obudowy i jej obciążenia o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa w postaci (Biegus 1999) (rys. 3.2):

$$f(P) = \frac{1}{s_p \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{P - \bar{P}}{2 \cdot s_p}\right)$$

$$f(q) = \frac{1}{s_q \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \exp\left(-\frac{q - \bar{q}}{2 \cdot s_q}\right)$$
(3.2)

gdzie:

$f(P), f(q)$ – gęstość prawdopodobieństwa nośności i obciążenia obudowy,

\bar{P}, \bar{q} – średnie wartości nośności obudowy i jej obciążenia,

s_p, s_q – odchylenia standardowe wartości nośności obudowy i jej obciążenia.

Bezpieczeństwo konstrukcji, opierające się na idei „najślabszego ogniwa”, pozwala przyjąć za wartości progowe kwantyle nośności P_0 i obciążenia q_0 w postaci:

$$P_0 = \bar{P} - t_p \cdot s_p$$

$$q_0 = \bar{q} + t_q \cdot s_q$$
(3.3)

gdzie:

t_p, t_q – współczynniki zależne od przyjętego poziomu prawdopodobieństwa.

Jako miarę bezpieczeństwa przyjmuje się współczynnik niezawodności Cornella t :

$$t = \frac{\bar{P} - \bar{q}}{\sqrt{s_p^2 + s_q^2}}$$
(3.4)

Wartość dystrybuanty współczynnika niezawodności $p(t)$ oznacza prawdopodobieństwo bezpieczeństwa konstrukcji obudowy, natomiast wartość $p = [1 - p(t)]$ oznacza prawdopodobieństwo awarii konstrukcji (utrata stateczności przez obudowę).

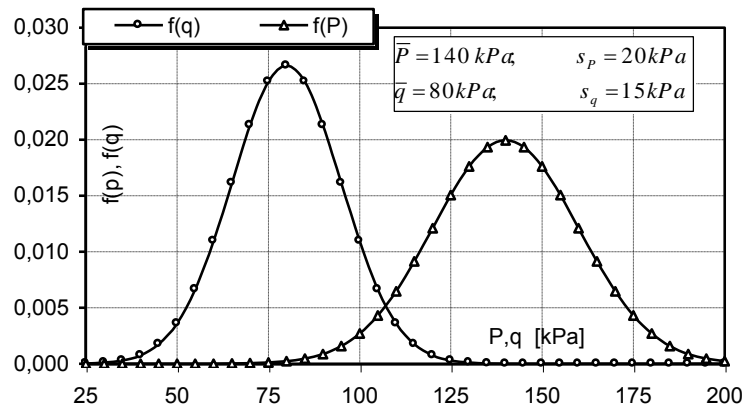
W przypadku, gdy awaria może wystąpić wskutek wielu różnych niezależnych od siebie czynników, prawdopodobieństwo awarii można określić jako:

$$p = \prod_{i=1}^n p_i \quad (3.5)$$

gdzie:

p_i – prawdopodobieństwo powstania i -tej awarii,

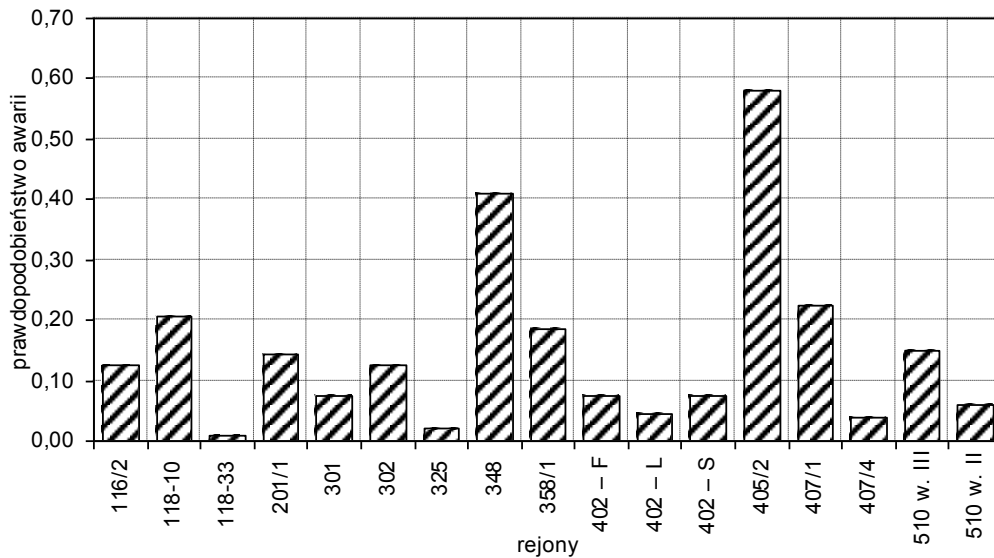
n – ilość awarii.



Rys. 3.2. Przykład rozkładu obciążenia i nośności obudowy jako zmiennych losowych o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa

Fig. 3.2. Exemplary distribution of loading and bearing capacity of the lining as random variables of normal distribution of probability

Na rys. 3.3 przedstawiono uogólnione wyniki kształtowania się prawdopodobieństwa awarii dla 178 wyrobisk zlokalizowanych w przyjętych do analizy 17 rejonach kopalń GZW.



Rys. 3.3. Prawdopodobieństwo awarii konstrukcji obudowy wyrobisk

Fig. 3.3. Probability of failure of excavation support construction

3.2. Konsekwencje wynikające z występujących zagrożeń

Wystąpienie awarii konstrukcji wyrobiska spowoduje określone straty. Występujące straty mogą być policzalne lub niepoliczalne. Do strat policzalnych zaliczyć można:

- wzrost kosztów utrzymania wyrobiska w wyniku konieczności przeprowadzenia jego przebudowy (np. pobierka spągu, przebudowa wyrobiska, wymiana obudowy lub jej elementów itp.);
- wzrost kosztów produkcji wynikający z negatywnych wpływów awarii wyrobiska (np. wzrost kosztów przewietrzania przodków w wyniku nadmiernego zmniejszenia przekroju wyrobiska, ograniczenie możliwości transportowych, geomechaniczne problemy związane z oddziaływaniem na inne wyrobiska itp.);
- konieczność likwidacji zniszczonego obiektu i budowa nowego.

Do niepoliczalnych skutków awarii wyrobiska podziemnego zalicza się wszelkie problemy związane z powstającym zagrożeniem dla życia i zdrowia przebywających tam ludzi.

Z punktu widzenia budowy modelu matematycznego jako skutki awarii konstrukcji uwzględnia się koszty jej usunięcia. Ogólnie wielkość skutków występującej awarii można określić w postaci:

$$k = \sum_{i=1}^n c_i \cdot k_i \quad (3.5)$$

gdzie:

c_i – współczynnik wagowy i-tej pozycji skutków uwzględniający m.in. jej wpływ na czynniki niepoliczalne,

k_i – wartość i-tej pozycji skutków spowodowanych awarią.

3.3. Sformułowanie funkcji celu

W świetle przedstawionych założeń, funkcja ryzyka w procesie doboru obudowy dla danego wyrobiska może stanowić kryterium optymalizacji. Za optymalne rozwiązanie konstrukcji obudowy w określonych warunkach można uważać to rozwiązanie, dla którego ryzyko osiągnie wartość najmniejszą. Ogólnie uproszczoną postać funkcji celu można zapisać w postaci:

$$R = \sum_{i=1}^n p_i \cdot c_i \cdot k_i \rightarrow \min \quad (3.6)$$

gdzie:

p_i – prawdopodobieństwo powstania i-tej awarii,

c_i – współczynnik wagowy i-tej pozycji skutków uwzględniający m.in. jej wpływ na czynniki niepoliczalne,

k_i – wartość i-tej pozycji skutków spowodowanych awarią.

Postać przyjętej funkcji celu określa warunek, że najkorzystniejszym rozwiązaniem jest to, które osiągać będzie najmniejszą wartość ryzyka przy spełnieniu określonych wstępnie warunków ograniczających. Warunkiem ograniczającym w omawianej analizie optymalizacyjnej może być np. wymagany poziom prawdopodobieństwa bezpieczeństwa konstrukcji, wynoszący co najmniej 0,95 (prawdopodobieństwo awarii mniejsze od 0,05). Innymi warunkami ograniczającymi mogą być warunki techniczne związane z funkcjonowaniem wyrobiska.

Rozwiązanie funkcji celu może być realizowane za pomocą metody analitycznej, w której znane są rozkłady prawdopodobieństwa wszystkich danych wejściowych do projektowania i w efekcie można doprowadzić do osiągnięcia wyników również w postaci zmiennych zespolonych o określonym rozkładzie prawdopodobieństwa. Inną metodą umożliwiającą rozwiązanie funkcji celu może być metoda iteracyjna (np. metoda zbiorów losowych, metoda Monte Carlo itp), w której nie wymaga się znajomości rozkładów prawdopodobieństwa, a tylko zakres zmienności poszczególnych danych.

4. Przykład analizy optymalizacyjnej konstrukcji wyrobiska korytarzowego

Jako przykład analizy optymalizacyjnej konstrukcji wyrobiska korytarzowego przyjęto wyrobisko zlokalizowane w górotworze charakteryzującym się zmiennością budowy geologicznej oraz własności wytrzymałościowych i odkształceniowych skał. Do obliczeń przyjęto następujące założenia:

- wyrobisko wykonane będzie w stalowej obudowie odrzwiowej łukowej podatnej;
- wyrobisko korytarzowe posiada przekrój odpowiadający obudowie ŁP-9;
- do analizy przyjmuje się trzy warianty obciążenia obudowy, a mianowicie 100 kPa, 150 kPa i 200 kPa;
- do zabezpieczenia wyrobiska przyjmuje się możliwość stosowania obudowy ŁP-9 z profili V25, V29, V32 i V36;
- wymagany poziom prawdopodobieństwa bezpieczeństwa konstrukcji przyjmuje się 0,95;
- dobrana odległość pomiędzy odrzwiami powinna zapewnić możliwie największy postępowanie drążenia chodnika;
- współczynnik zmienności obciążenia obudowy wyrobiska wynosi 0,2;
- współczynnik zmienności nośności obudowy wynosi 0,2;
- jako skutki wystąpienia awarii przyjmuje się wielkość kosztów wykonania i utrzymania wyrobiska, których wielkość zależy od wielkości przekroju poprzecznego, rodzaju obudowy, wielkości kształtownika, konstrukcji poszczególnych elementów obudowy, odległości pomiędzy odrzwiami itp.;
- wyrobisko użytkowane będzie w krótkim okresie czasu.

W świetle przedstawionych założeń, funkcja ryzyka w procesie doboru obudowy dla danego wyrobiska może stanowić kryterium optymalizacji. Za optymalne rozwiązanie konstrukcji obudowy w określonych warunkach można uważać to rozwiązanie, dla którego ryzyko osiągnie wartość najmniejszą przy spełnieniu założonych ograniczeń. Ogólnie uproszczoną postać funkcji celu można zapisać w postaci:

$$R = p \cdot [k_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + k_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + k_3(x_1, x_2, \dots, x_n)] \rightarrow \min \quad (4.1)$$

gdzie:

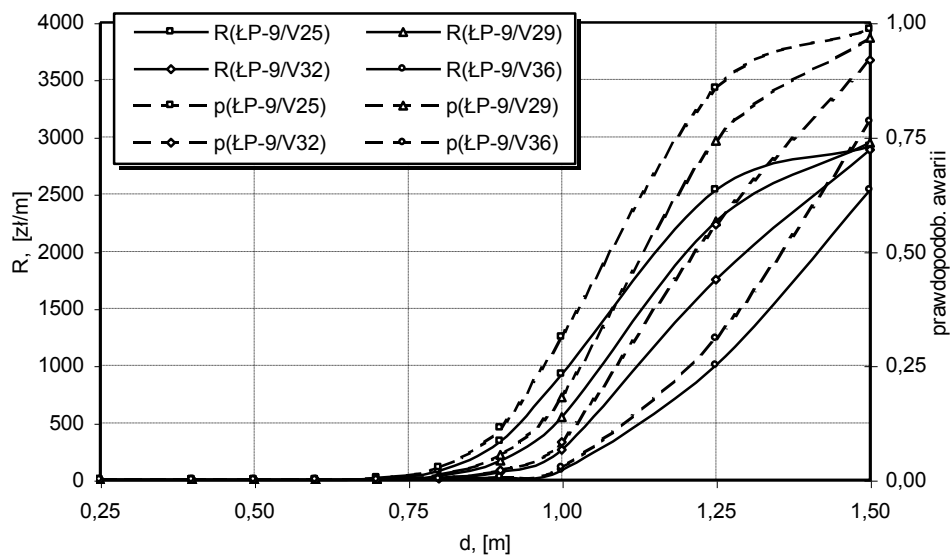
p – prawdopodobieństwo wystąpienia awarii,

$k_1(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – koszty wykonania wyrobiska,

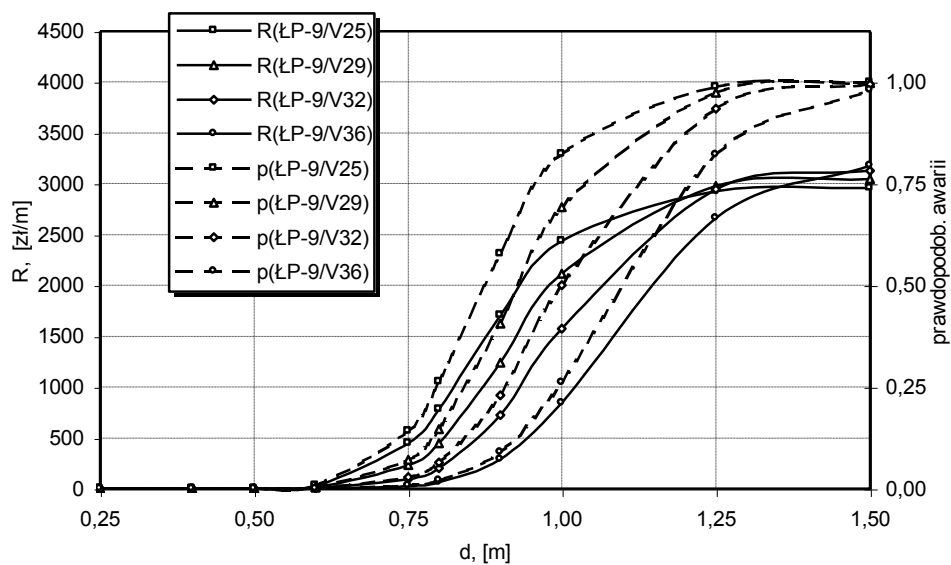
$k_2(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – koszty użytkowania wyrobiska,

$k_3(x_1, x_2, \dots, x_n)$ – koszty związane z przebudowami i naprawami wyrobiska.

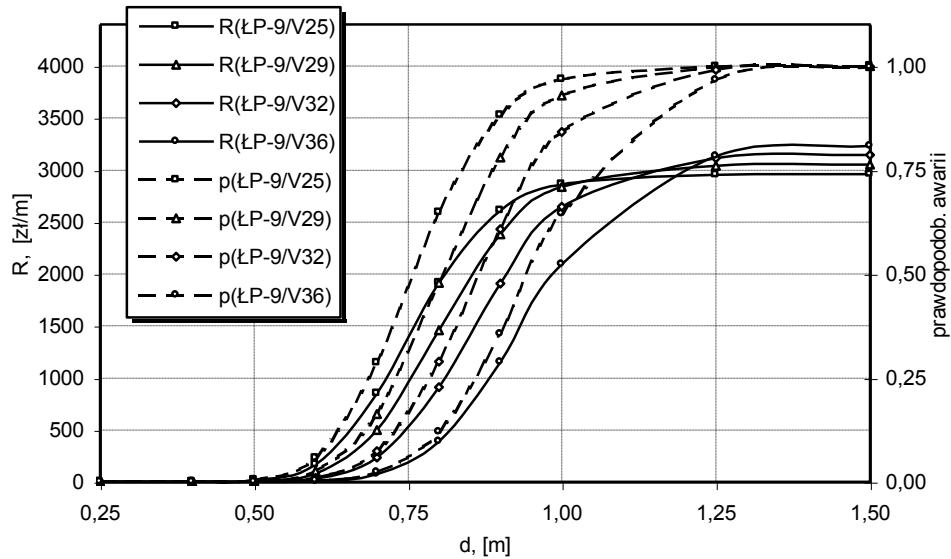
Przyjmując wymienione założenia przeprowadzono obliczenia prawdopodobieństwa awarii oraz wielkości ryzyka dla różnych odległości pomiędzy odrzwiami. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 4.1, 4.2 i 4.3.



Rys. 4.1. Prawdopodobieństwo awarii i wielkość ryzyka dla konstrukcji obudowy ŁP-9 – $q = 100$ kPa
 Fig. 4.1. Probability of failure and risk for ŁP-9 support construction – $q = 100$ kPa



Rys. 4.2. Prawdopodobieństwo awarii i wielkość ryzyka dla konstrukcji obudowy ŁP-9 – $q = 150$ kPa
 Fig. 4.2. Probability of failure and risk for ŁP-9 support construction – $q = 150$ kPa



Rys. 4.3. Prawdopodobieństwo awarii i wielkość ryzyka dla konstrukcji obudowy ŁP-9 – $q = 200$ kPa
 Fig. 4.3. Probability of failure and risk for ŁP-9 support construction – $q = 200$ kPa

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że w analizowanym zakresie parametrów wejściowych do analizy optymalizacyjnej ograniczenie wymaganego poziomu prawdopodobieństwa bezpieczeństwa konstrukcji spełniają następujące warianty.

- Dla wariantu obciążenia $q = 100$ kPa obudowy ŁP-9 wykonanej z profilu:
 V25 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,84 m,
 V29 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,89 m,
 V32 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,96 m,
 V36 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 1,05 m.
- Dla wariantu obciążenia $q = 150$ kPa obudowy ŁP-9 wykonanej z profilu:
 V25 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,69 m,
 V29 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,73 m,
 V32 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,78 m,
 V36 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,86 m.
- Dla wariantu obciążenia $q = 200$ kPa obudowy ŁP-9 wykonanej z profilu:
 V25 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,50 m,
 V29 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,63 m,
 V32 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,68 m,
 V36 – odległość pomiędzy odrzwiami maksymalnie do 0,75 m.

W oparciu o przeprowadzoną analizę optymalizacyjną można stwierdzić, że optymalnym rozwiązaniem obudowy jest:

- dla wariantu obciążenia $q = 100$ kPa obudowy ŁP-9 wykonanej z profilu V25 co 0,75 m,
- dla wariantu obciążenia $q = 150$ kPa obudowy ŁP-9 wykonanej z profilu V25 co 0,50 m lub alternatywnie z profilu V32 co 0,75 m,
- dla wariantu obciążenia $q = 200$ kPa obudowy ŁP-9 wykonanej z profilu V25 co 0,5 m.

5. Podsumowanie

Proces projektowania charakteryzuje się tym, że na każdym etapie projektowania dokonuje się oceny rozwiązania wykorzystując do tego odpowiednie procedury i narzędzia. Do oceny rozwiązań projektowych wykorzystuje się metody optymalizacyjne oparte o różne założenia i algorytmy.

Zagadnienie doboru obudowy dla wyrobisk korytarzowych dokonywane jest za pomocą metod deterministycznych, a miarą bezpieczeństwa konstrukcji jest współczynnik bezpieczeństwa. Dobór obudowy opiera się najczęściej o metodę stanów granicznych, a dobrana obudowa winna charakteryzować się współczynnikiem bezpieczeństwa o wartości akceptowanej (co najmniej większym od jedności). Proces optymalizacji zaś dokonywany jest najczęściej w oparciu o kryterium minimalizacji kosztów. Stosowanie dotychczasowych metod nie uwzględniało jednej z podstawowych cech procesu projektowania, a mianowicie niepewność informacji w zakresie danych wejściowych. Niepewność informacji w projektowaniu górnictwem wynika nie tylko z niepełnego rozpoznania geologicznego, ale w głównej mierze ze zmienności budowy geologicznej górotworu wzdłuż wybiegu wyrobiska oraz zmienności własności skał.

Stosowanie w procesie projektowania konstrukcji budowli podziemnych metod probabilistycznych umożliwia uwzględnienie czynnika niepewności danych wejściowych w wynikach prowadzonych analiz i obliczeń poprzez określenie prawdopodobieństwa wystąpienia wartości obciążenia i nośności konstrukcji. Wybierając najkorzystniejsze rozwiązanie konstrukcji budowli podziemnej, przy zastosowaniu metod probabilistycznych, uwzględniać można wpływ czynnika niepewności poprzez zastosowanie funkcji ryzyka jako kryterium optymalizacji.

Przeprowadzone obliczenia i analiza ich wyników wykazała, że na stopień bezpieczeństwa konstrukcji budowli podziemnej istotny wpływ ma zmienność danych wejściowych. Im większa zmienność własności skał budujących masyw tym większe prawdopodobieństwo awarii konstrukcji w wyniku wzrostu wariacji obciążenia obudowy. Podobne zależności obserwuje się w odniesieniu do parametrów charakteryzujących obudowę. Wraz ze wzrostem wariacji nośności konstrukcji rośnie prawdopodobieństwo awarii.

Projektując utrzymanie stateczności wyrobiska kierując się tylko względami ekonomicznymi można doprowadzić do nadmiernego „odchudzenia” obudowy i w efekcie wzrostu zagrożenia awarią. Ma to szczególnie znaczenie w warunkach znacznej zmienności warunków utrzymania stateczności wyrobiska. Określone prawdopodobieństwo awarii konstrukcji (wystąpienia zdarzeń niekorzystnych dla jej bezpiecznego użytkowania) pozwala określić wartość funkcji ryzyka, która łącząc niepewność z innymi czynnikami technicznymi i ekonomicznymi może być kryterium optymalizacji konstrukcji.

Stosowanie w analizie optymalizacyjnej konstrukcji budowli podziemnych metod probabilistycznych pozwala na uzyskanie dodatkowego wymiernego ograniczenia, jakim może być prawdopodobieństwo wystąpienia określonych wartości opisujących przedmiot projektowany. Można bowiem sformułować warunek, iż końcowe rozwiązanie projektowe winno charakteryzować się określonym wymaganym poziomem prawdopodobieństwa.

Podsumowując przeprowadzone rozważania można stwierdzić, że dobrze zaprojektowana konstrukcja budowli podziemnych winna charakteryzować się jak najmniejszą wartością funkcji ryzyka, posiadać wymagany poziom prawdopodobieństwa bezpieczeństwa (np. 0,95) oraz spełniać inne sformułowane warunki ograniczające – techniczne i użytkowe.

Poruszony w referacie problem jest bardzo złożony i z konieczności przedstawiony został w sposób bardzo ogólny. Zasygnalizowane zostały w nim problemy wymagające dalszych badań w celu dopracowania się w miarę obiektywnych mierników „dobroci” rozwiązania projektowego konstrukcji budowli podziemnych. Dotychczasowe badania wskazują, że systematyczne poznawanie procesów naprężeniowo-deformacyjnych w otoczeniu wyrobisk górniczych oraz rozwój metod projektowania stwarza takie możliwości.

Literatura

- [1] Biegus A. 1999: Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych. Wyd. PWN, Warszawa – Wrocław.
- [2] Chudek M. 2002: Geomechanika z podstawami ochrony środowiska górniczego i powierzchni terenu, Wyd. Pol. Śl., Gliwice.
- [3] Chudek M. 1986: Obudowa wyrobisk górniczych. Cz. I. Obudowa wyrobisk korytarzowych i komorowych, Wyd. „Śląsk”, Katowice.
- [4] Chudek M., Duży S., Kleta H., Kłeczek Z., Stoiński K., Zorychta A. 2000: Zasady doboru i projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych i ich połączeń w zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny, Wyd. Katedry Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Ochrony Powierzchni Politechniki Śląskiej, Gliwice – Kraków – Katowice.
- [5] Duży S. 2005: Elementy teorii niezawodności i bezpieczeństwa konstrukcji w projektowaniu budowli podziemnych. Górnictwo i Geoinżynieria, rok 29, nr 3/1, 199–206.
- [6] Duży S. 2005: Ocena bezpieczeństwa konstrukcji wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego z uwzględnieniem zmienności warunków naturalnych i górniczych. Warsztaty Górnicze 2005 z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”, Kazimierz Dolny nad Wisłą, 243–256.
- [7] Duży S. 2004: Probabilistyczna analiza stateczności budowli podziemnych. Przegląd Górniczy nr 4, 33–38.
- [8] Duży S. 2004: Projektowanie budowli podziemnych w świetle teorii niezawodności. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., s. Górnictwo, z. 261, 149–158.
- [9] Karbownik A. 1981: Podstawy teorii projektowania. Zagadnienia wybrane dla kierunków górniczych. Skrypt Uczelniany Pol. Śl., nr 1030, Gliwice.
- [10] Sobala J., Rosmus P. 1996: System zarządzania bezpieczeństwem pracy w zakładach górniczych, Wyd. GIG, Katowice.
- [11] Szymczak C. 1998: Elementy teorii projektowania, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

The optimization of excavation construction including the changeability of the mining-geological conditions and uncertainty of information

Designing excavation constructions in underground mines demands finding a compromise between assuring safety in those excavations and maximizing the economic effect. Another difficulty in designing underground excavations is the changeability of natural and mining conditions on of the excavation and the approximate parameter values describing the maintenance conditions. Solving this problem is possible due to the usage of the probabilistic designing method based on the construction reliability and safety theory.

Basing on the random character of the rock massive effect on excavation support and the random character support load capacity, as the optimizing criterion in the process of support choice, a function of risk linked with the failure, with the results, probability is assumed. The raised problem is presented on the example of excavation designing in underground collierys.

Przekazano: 20 marca 2006 r.