

Stanisław DUŻY  
Politechnika Śląska, Gliwice

## ZASTOSOWANIE SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH DO OCENY STOPNIA BEZPIECZEŃSTWA OBUDOWY WYROBISK GÓRNICZYCH

**Streszczenie.** W dotychczasowych badaniach związanych z jakością wyrobisk górniczych uwaga skierowana była głównie na pojedyncze aspekty lub końcową ocenę na podstawie skutków procesów, które zaszły w wyrobisku lub w jego otoczeniu. Zastosowanie metody sztucznych sieci neuronowych pozwala na ocenę stopnia bezpieczeństwa grupy wyrobisk o podobnych cechach konstrukcyjnych wykonanych i utrzymywanych w podobnych warunkach geologiczno – górniczych. W artykule przedstawiono przykład budowy sieci dla oceny stopnia bezpieczeństwa obudowy wyrobisk korytarzowych, w których zastosowano stalową obudowę odrzwiową podatną.

## THE USE OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN EVALUATING THE HEADINGS SUPPORT SAFETY DEGREE

**Summary.** In heading quality studies until now the attention was drawn to singular aspects or the final evaluation on the basis of effects of the processes that occurred in the heading or in its neighbourhood. The used artificial neural networks methods allow the evaluation of groups of headings, which have similar construction features and are maintained in similar geological – mining conditions, safety. The article presents an example of a networks structure that evaluates the degree of headings support, in which steel arch yielding support was used, safety.

### 1. Wprowadzenie

Wyrobiska górnicze i ich poszczególne elementy powinny być tak zaprojektowane i wykonane, aby mogły się przeciwstawić oddziaływaniom zewnętrznym, zachowując swoje parametry użytkowe w trakcie drażenia, pracy w warunkach normalnych oraz utrzymać

konstrukcyjną całość w przypadku wystąpienia zdarzeń losowych. W najczęściej stosowanych w projektowaniu modelach wyróżnia się trzy podstawowe wymagania, a mianowicie wymagania jakości, wymagania niezawodności i wymagania bezpieczeństwa [9].

Wymagania w zakresie systemów jakości w projektowaniu, wykonaniu i naprawach, w wytwarzaniu i montażu oraz w próbach odbiorowych regulują normy PN – ISO [9,10,11,12]. W przywołanych dokumentach jakość definiowana jest jako zbiór wszystkich cech charakterystycznych pewnej całości, która ma zdolność spełniania ustanowionych i zamierzonych potrzeb [9].

Z kolei wymagania niezawodności regulowane są przez PN – ISO 2394: 2000 [9] i uwzględniają trzy podstawowe zagadnienia, a mianowicie: użyteczność, bezpieczeństwo i niewrażliwość na katastrofę.

W odniesieniu do wyrobisk górniczych dotychczas nie sformułowano jednoznacznie zasad wiążących jakość wykonania wyrobiska z jego bezpieczeństwem. Próbę taką podjęto w normie PN-90/G-06011: 1990, w której określono wymagania i badania przy odbiorze nowo wykonanych wyrobisk, w przepisach dotyczących stosowania samodzielnej obudowy kotwiowej, oraz w normach PN-G-04210: 1996 i PN-G-04211 ujmujących w ogólny sposób ocenę stopnia bezpieczeństwa obudowy szybów górniczych, ze szczególnym uwzględnieniem obudowy betonowej.

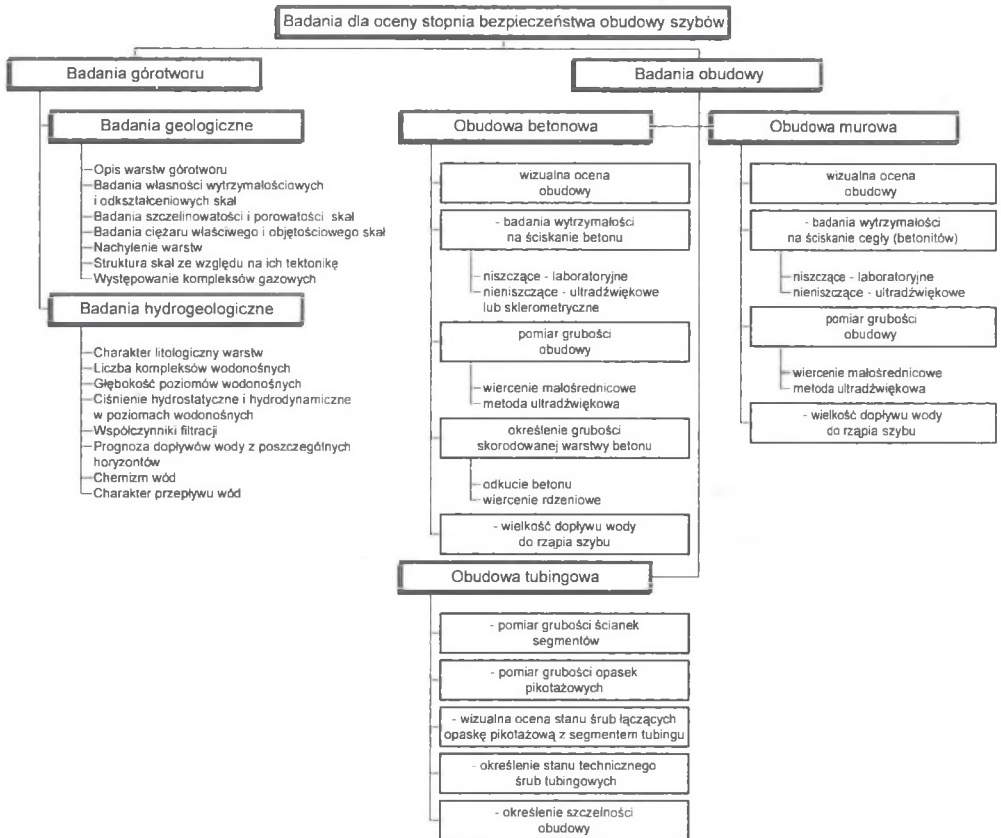
Biorąc powyższe pod uwagę, należy opracować spójną metodykę oceny stopnia bezpieczeństwa wyrobisk górniczych uwzględniających stan techniczny obudowy wynikający zarówno z jakości jego wykonania, jak i ze stopnia zużycia.

## **2. Badania jakości wyrobiska i jego obudowy**

W dotychczasowych badaniach związanych z jakością wyrobisk górniczych uwaga skierowana była głównie na pojedyncze aspekty lub końcową ocenę na podstawie skutków procesów, które zaszły w wyrobisku lub w jego otoczeniu. Badania jakości wyrobiska zależą od jego rodzaju i funkcji pełnionej w procesie technologicznym wydobywania kopaliny. Przykładowo poniżej przedstawiono wymagane zakresy badań dla:

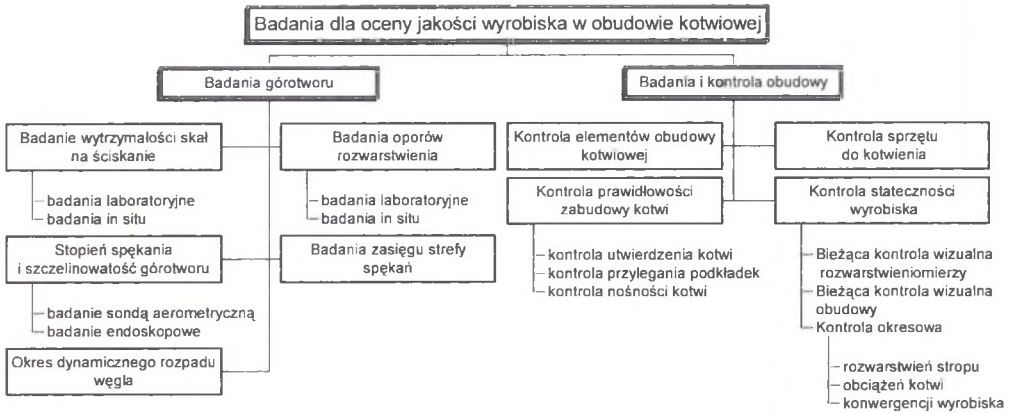
- szybów górniczych ze względu na konstrukcję obudowy (rys. 1),
- wyrobisk korytarzowych wykonywanych i utrzymywanych w samodzielnej obudowie kotwiowej (rys. 2),

- wyrobisk korytarzowych wykonywanych w stalowej obudowie odrzwiowej podatnej (rys. 3).



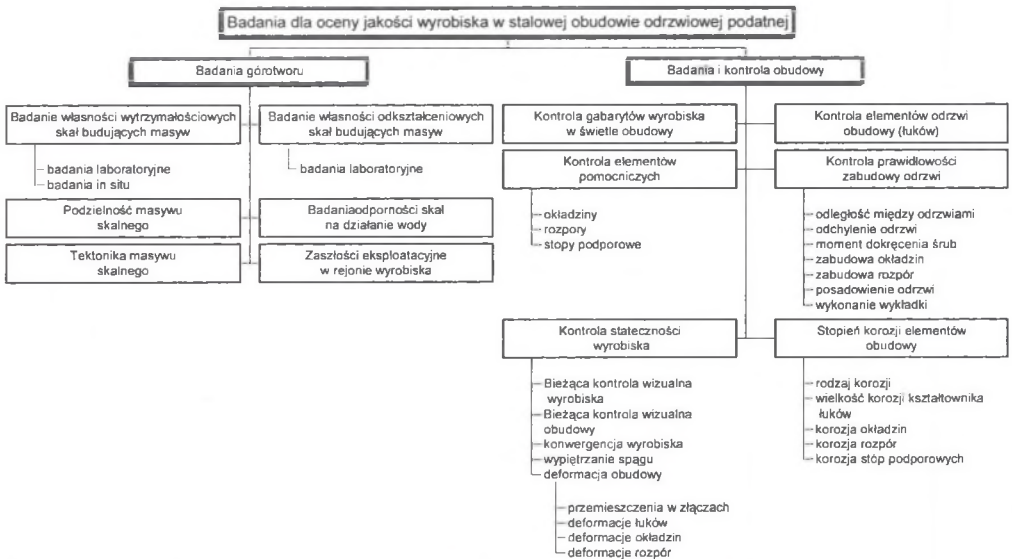
Rys. 1. Zakres niezbędnych badań dla oceny jakości obudowy szybów górniczych  
 Fig. 1. The range of the necessary research of the mining shafts support making quality

Z przedstawionych ogólnych założeń dotyczących oceny jakości wyrobiska górniczego wynika złożoność tego zagadnienia w związku z występowaniem wielu czynników o różnej wadze wpływających na bezpieczeństwo wyrobiska.



Rys. 2. Zakres niezbędnych badań dla oceny jakości obudowy kotwiowej

Fig. 2. The range of the necessary research of the roof bolting



Rys. 3. Zakres niezbędnych badań dla oceny stalowej obudowy odrzwiowej podatnej

Fig. 3. The range of the necessary research of the steel arch yielding support

### 3. Metody oceny jakości wyrobisk w świetle dotychczasowych propozycji rozwiązań

Jakość wykonania jest to relacja między zbiorem technicznych i użytkowych właściwości produktu przewidzianym w projekcie a tym zbiorem właściwości, który jest realizowany w procesie produkcji lub świadczenia usługi [6]. W praktyce podstawowymi miarami

poziomu jakości wykonania, w odniesieniu do wyrobisk korytarzowych, były: wadliwość (poprawność), przeciętna liczba wad w jednostce oraz zdolność jakościowa procesu [2,3].

Wadliwość można definiować jako prawdopodobieństwo uzyskania efektu niezgodnego z zamierzonym w projekcie. Niezgodność z projektem może dotyczyć jednego lub większej liczby parametrów charakteryzujących wyrób.

W przypadku drażenia wyrobisk korytarzowych jakość wykonania można ocenić również za pomocą przeciętnej liczby wad w jednostce długości wyrobiska. W przypadku stosowania tej miary ustala się miary cząstkowe z punktu widzenia poszczególnych własności i określa się sumaryczną liczbę wad w jednostce, dzieląc je na mało istotne i istotne [6].

Zdolność jakościowa procesu polega na określeniu zgodności między wymaganiami wynikającymi z projektu i możliwościami procesu technologicznego, w którym analizowany produkt jest wytwarzany.

Przedstawione powyżej metody oceny jakości wyrobisk dotyczą tylko jakości wykonania obudowy wyrobiska. Stateczność wyrobiska zależy również od jakości otaczającego górotworu oraz interakcji zachodzących w układzie obudowa – górotwór. Stan taki powoduje konieczność poszukiwania nowych metod pozwalających na analizę i opis procesów, na przebieg których wpływa wiele czynników o różnej wadze.

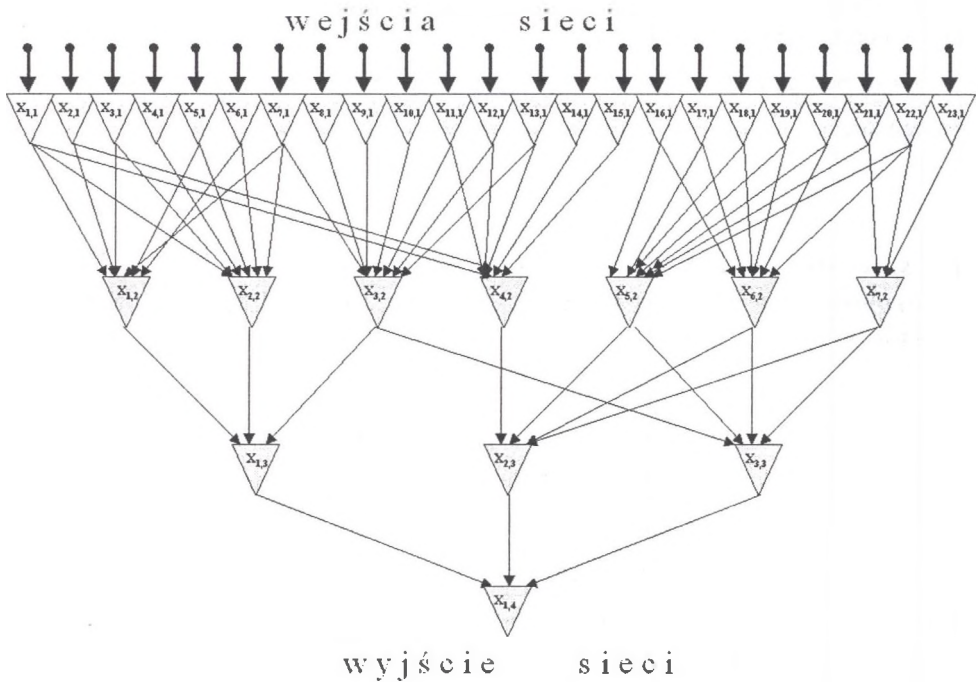
#### **4. Podstawowe zasady budowy i wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do oceny stopnia bezpieczeństwa obudowy wyrobisk górniczych**

Neurony połączone między sobą tworzą układ, który nazywany jest sztuczną siecią neuronową. W zależności od sposobu połączenia neuronów rozróżnia się sieci jednokierunkowe lub rekurencyjne. W rozwiązaniach zadań najczęściej stosowana jest sieć jednokierunkowa, wielowarstwowa o neuronach typu sigmoidalnego. Przepływ sygnałów w tych sieciach odbywa się tylko w jednym kierunku: od wejścia do wyjścia. Ich matematyczny opis jest stosunkowo prosty i przejrzysty, a rozwiązanie daje się wyrazić w postaci jednej zależności funkcyjnej typu algebraicznego. Uczenie takiej sieci odbywa się zwykle z nauczycielem, a podstawą uczenia jest zbiór stowarzyszonych par uczących – wektor wejścia wraz z odpowiadającym mu wektorem wyjściowym [7].

W celu oceny stopnia bezpieczeństwa obudowy ŁP wyrobiska korytarzowego zbudowano sieć jednokierunkową z dwoma warstwami ukrytymi (rys. 4). Zbiór wektorów

wejściowych tworzą czynniki wywierające istotny wpływ na stopień bezpieczeństwa obudowy wyrobisk korytarzowych, natomiast wektorem wyjściowym jest klasa warunków utrzymania stateczności wyrobiska.

Jako czynniki wywierające istotny wpływ na stopień bezpieczeństwa obudowy wyrobisk korytarzowych przyjęto: rodzaj skał ( $x_{1,1}$ ), wytrzymałość na ściskanie skał ( $x_{2,1}$ ), moduł sprężystości skał ( $x_{3,1}$ ), odporność skał na działanie wody ( $x_{4,1}$ ), tektonika masywu ( $x_{5,1}$ ), zaszczości eksploatacyjne ( $x_{6,1}$ ), głębokość lokalizacji ( $x_{7,1}$ ), gabaryty wyrobiska ( $x_{8,1}$ ), kształt przekroju poprzecznego wyrobiska ( $x_{9,1}$ ), zagrożenie tapaniami i wstrząsami górotworu ( $x_{10,1}$ ), metoda urabiania skał ( $x_{11,1}$ ), konstrukcja obudowy ( $x_{12,1}$ ), zagrożenie gazowe ( $x_{13,1}$ ), zagrożenie pożarowe ( $x_{14,1}$ ), zagrożenie wodne ( $x_{15,1}$ ), rodzaj kształtownika obudowy ( $x_{16,1}$ ), typ złącza ( $x_{17,1}$ ), rodzaj okładzin ( $x_{18,1}$ ), rodzaj rozpór ( $x_{19,1}$ ), stopień korozji obudowy ( $x_{20,1}$ ), deformacje obudowy ( $x_{21,1}$ ), konwergencja wyrobiska ( $x_{22,1}$ ) oraz okres istnienia wyrobiska ( $x_{23,1}$ ).



Rys. 4. Ogólny schemat sieci dla oceny stopnia bezpieczeństwa obudowy wyrobisk korytarzowych  
Fig. 4. The range of the necessary research of the steel arch yielding support

Do wejść neuronów kolejnej warstwy doprowadzane są sygnały dochodzące z neuronów warstwy poprzedniej. Każdy sygnał mnożony jest przez odpowiadającą mu wartość liczbową zwaną wagą. Zsumowane iloczyny sygnałów i wag stanowią argument funkcji aktywacji

neuronu. Przy takim oznaczeniu sygnał wyjściowy  $i$ -tego neronu pierwszej warstwy ukrytej opisany jest funkcją:

$$y_{i,1} = f \left( \sum_{j=1}^{23} w_{i,j}^{(1)} \cdot x_{i,j} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$y_{i,1}$  – sygnał wyjściowy  $i$ -tego neuronu pierwszej warstwy ukrytej,

$w_{i,j}^{(1)}$  – wartość wagi warstwy 1,

$x_{i,j}$  – sygnał wejściowy  $i$ -tego neuronu warstwy 1.

Na wartość sygnału wyjściowego mają wpływ wagi wszystkich warstw, podczas gdy sygnały wytwarzane w warstwach ukrytych nie zależą od wag warstwy wyjściowej i dla  $k$ -tego neuronu opisane mogą być wzorem:

$$y_k = f \left\{ \sum_{i=0}^3 w_{k,i}^{(3)} \cdot f \left[ \sum_{j=0}^7 w_{k,j}^{(2)} \cdot f \left( \sum_{l=0}^{23} w_{k,l}^{(1)} \cdot x_{l,1} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

gdzie:

$w_{i,j}^{(1)}$ ,  $w_{i,j}^{(2)}$ ,  $w_{i,j}^{(3)}$  – wartości wag poszczególnych warstw,

$x_{l,1}$  – sygnał wejściowy  $l$ -tego neuronu warstwy 1.

Dobór wag sieci w sieci wielowarstwowej przeprowadzono według algorytmu propagacji wstecznej przy wykorzystaniu gradientowych metod optymalizacji.

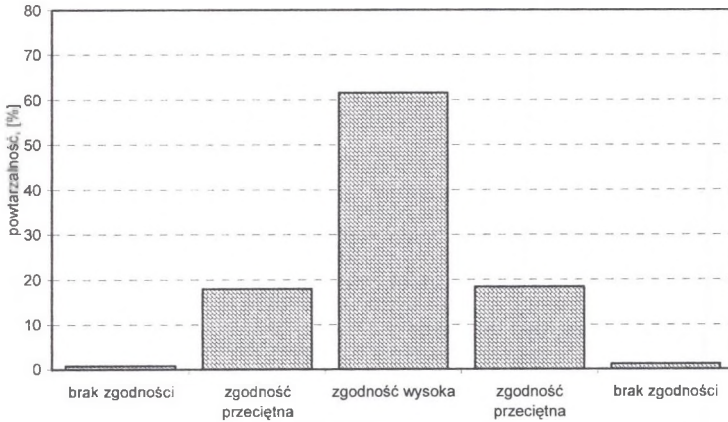
Opracowana sieć wykorzystana została do analizy zbioru złożonego z 250 wyrobisk korytarzowych zlokalizowanych w różnych rejonach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego [2,3,4]. Na podstawie wartości sygnału wyjściowego wyrobiska podzielono na 6 klas wzorowanych na klasyfikacji warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych podanej w pracy [4] (I – dobre, II – zadowalające, III – dostateczne, IV – dopuszczalne, V – trudne, VI – niedopuszczalne), a następnie porównano z obserwowanym ich stanem technicznym. W przypadku zgodności opisu deformacji wyrobiska w predykcji opracowanej metodą sieci neuronowych z obserwacjami dołowymi dokonano podziału według zasady:

- zgodność w co najmniej 75% porównywanych czynników – zgodność wysoka,
- zgodność 45 – 75% porównywanych czynników – zgodność przeciętna,
- zgodność w mniej niż 45% porównywanych czynników – brak zgodności.

Wyniki porównania zgodności opisu deformacji z obserwacjami dołowymi przedstawiono na rys. 5.

Przeprowadzona analiza wykazała zbieżność wyników rozważań teoretycznych z obserwacjami dołowymi. W świetle przeprowadzonej analizy tylko w przypadku 2% wyrobisk

uzyskano wynik negatywny, natomiast aż w około 60% przypadków uzyskano wysoką zgodność. Świadczy to o pełnej przydatności metody do stosowania w rozwiązywaniu problemów inżynierskich.



Rys. 5. Porównanie prognozy warunków utrzymania wyrobisk korytarzowych z wynikami obserwacji dołowych  
Fig. 5. Comparison of heading maintenance conditions prediction with results of underground observations

## 5. Podsumowanie

Na warunki utrzymania stateczności wyrobisk górniczych wpływ ma wiele czynników naturalnych i górniczych, co powoduje trudności w zdefiniowaniu jasnych i prostych kryteriów ustalania danych wejściowych do obliczeń. Dodatkową trudność sprawia zmienność warunków naturalnych i górniczych.

Podstawowym celem artykułu było poszukiwanie nowej metody określania stopnia bezpieczeństwa wyrobiska korytarzowego z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi w postaci sztucznych sieci neuronowych. Nowatorstwo zaproponowanego rozwiązania polega również na tym, że pozwala na uwzględnienie wpływu poszczególnych czynników i ich zmienności na stopień bezpieczeństwa wyrobiska.

Metoda ta, opierając się na wynikach analizy (uczenia sieci) większych zbiorów wyników badań i obserwacji dołowych, może pozwolić na predykcję stopnia bezpieczeństwa obudowy wyrobiska zlokalizowanego w podobnych warunkach geologiczno – górniczych. Ze względu na złożoność metody oraz jej pracochłonność zastosowanie tej metody w praktyce projektowej może się okazać trudne do bieżącego stosowania, jednak jako metoda wielokryterialnej analizy wyników może być wykorzystywana do aktualizacji uproszczonych



modeli stosowanych w projektowaniu poprzez korektę np. stosowanych powszechnie współczynników bezpieczeństwa.

Zastosowanie sieci neuronowych do oceny stopnia bezpieczeństwa obudowy wyrobisk górniczych jest stosunkowo nowym podejściem, dlatego wymaga dalszych badań głównie w kierunku doboru metod uczenia sieci, dla których konieczne są bazy danych pozwalające na specyfikację zbiorów do uczenia opracowywanych sieci dla konkretnych warunków. Bazy te powinny obejmować wyrobiska o różnych warunkach geologiczno – górniczych, które mogą wystąpić w konkretnym zadaniu projektowym, gdyż tylko w takim przypadku możliwe będzie wyspecyfikowanie zbioru wieloelementowego do uczenia sieci.

## BIBLIOGRAFIA

1. Chudek M.: Obudowa wyrobisk górniczych. Część 1. Obudowa wyrobisk korytarzowych i komorowych. Wyd. „Śląsk”, Katowice 1986.
2. Duży S.: Elementy zarządzania jakością w procesie drażenia wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, Tom 23 – Zeszyt Specjalny 2, Kraków 2007.
3. Duży S.: Statystyczna charakterystyka jakości procesu drażenia wyrobisk korytarzowych. ZN Pol. Śl., seria Górnictwo, z. 270, Gliwice 2005.
4. Duży S.: Studium niezawodności konstrukcji obudowy i stateczności wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego z uwzględnieniem niepewności informacji. ZN Pol. Śl., seria Górnictwo, z. 277, Gliwice 2007.
5. Hamroł A., Mantura W.: Zarządzanie jakością. Teoria i praktyka. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
6. Iwasiewicz A.: Zarządzanie jakością. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
7. Osowski S.: Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
8. Polska Norma PN-90/G-06011: 1990. Wyrobiska korytarzowe poziome i pochyłe w kopalniach. Wyrobiska obudowane odrzwiami z kształtowników korytkowych. Wymagania i badania przy odbiorze.
9. Polska Norma PN-ISO 2394: 2000. Ogólne zasady niezawodności konstrukcji.
10. Polska Norma PN-ISO 9001: 1996. Systemy jakości. Modele zapewnienia jakości w projektowaniu, pracach rozwojowych, produkcji, instalowaniu i serwisie.
11. Polska Norma PN-ISO 9001: 2001. System zarządzania jakością. Wymagania.
12. Polska Norma PN-ISO 9002: 1994. Systemy jakości. Modele zapewnienia jakości w pracach rozwojowych, produkcji, instalowaniu i serwisie.
13. Polska Norma PN-G-04210: 1996. Szyby górnicze. Obudowy i zbrojenia szybów. Ogólne zasady badań.
14. Polska Norma PN-G-04211: 1996. Szyby górnicze. Obudowa betonowa. Kryteria oceny i metody badań.