

PRACE NAUKOWE GIG

GÓRNICTWO I ŚRODOWISKO
MINING & ENVIRONMENT

RESEARCH
REPORTS

Quarterly

KWARTALNIK



GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICTWA
CENTRAL MINING INSTITUTE

OWICE 2002

KATOWICE 2002

Rada Programowa: *prof. dr hab. inż. Jakub Siemek (przewodniczący), prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak, prof. dr hab. inż. Bernard Drzęźła, prof. dr hab. inż. Józef Dubiński, prof. dr hab. inż. Korneliusz Miksch, prof. dr hab. inż. Joanna Pinińska, prof. dr hab. inż. Janusz Roszkowski, prof. dr hab. inż. Antoni Tajduś, prof. dr hab. inż. Janusz W. Wandrasz, prof. dr hab. inż. Piotr Wolański*

Komitety Kwalifikacyjno-Opiniotwórcze: *prof. dr hab. inż. Antoni Kidybiński (przewodniczący), doc. dr hab. inż. Krystyna Czaplicka, prof. dr hab. inż. Jan Hankus, prof. dr hab. inż. Władysław Konopko, prof. dr hab. inż. Jerzy Kwiatek, doc. dr hab. Kazimierz Lebecki, prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan, prof. dr hab. inż. Kazimierz Rulka, prof. dr hab. Jerzy Sablik, doc. dr hab. inż. Jan Wachowicz*

Redaktor Naczelny

prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

Redakcja wydawnicza i korekta

Ewa Gliwa

Małgorzata Kuśmirek

Barbara Jarosz

Skład i łamanie

Krzysztof Gralikowski

ISSN 1643-7608

Nakład 100 egz.

Adres Redakcji:

**Zespół Wydawnictw i Usług Poligraficznych
Głównego Instytutu Górniczego, 40-166 Katowice, Pl. Gwarków 1
tel. (0-32) 259-24-03, 259-24-04, 259-24-05
fax 032/259-65-33
e-mail: cintexmk@gig.katowice.pl**

Spis treści

Wystąpienie Naczelnego Dyrektora Głównego z okazji Dnia Górnika	4
CEZARY BARTMAŃSKI	8
Automatyzacja badań metrologicznych przyrządów do pomiaru drgań	8
Automation of metrological tests of instruments for vibration measurement	8
BARBARA BIAŁECKA	17
Wspomaganie proekologicznego zarządzania zakładem energetycznym	17
Pro-ecological power plant management support	17
ROBERT SIATA.....	33
Badanie przypowierzchniowych warstw podłoża metodą sejsmiczną	33
Testing of foundation layers, adjacent to the surface, by means of the seismic method	34
JAN HANKUS.....	43
Zintegrowane metody badań i oceny stanu bezpieczeństwa lin stalowych	43
Integrated testing and assessment methods of the safety state of steel ropes	43
MARIUSZ ĆWIECZEK.....	59
Wpływ procesu zgazowania odpadów gumowych na emisję zanieczyszczeń do środowiska	59
Impact of the rubber waste gasification process on pollution emissions to the environment	59
JOANNA PINIŃSKA	80
Zastosowanie badań nieniszczących w wytrzymałościowej klasyfikacji skał i masywów skalnych	80
Application of non-destructive tests in rock and rock mass strength classification	80

WYSTĄPIENIE NACZELNEGO DYREKTORA GŁÓWNEGO Z OKAZJI DNIA GÓRNIKA

Panie, Panowie, Dostojni Goście! Drogie Koleżanki i Koledzy!

Uroczystość górniczego święta „Barbórki”, związana z dniem 4 grudnia – świętem patronki górniczego stanu Świętej Barbary, odmierza czas w górniczych zakładach pracy i instytucjach o górniczych korzeniach – urzędach, fabrykach, uczelniach i instytutach badawczych. Oznacza to, że w kalendarzu górniczym minął kolejny rok i nadeszła pora na bilans – na podsumowanie rzeczy dobrych i miłych oraz tych mniej przyjemnych. To święto ludzi, u których słowa górnictwo, kopalnia, węgiel, budzą żywsze bicie serca, rodzą myśli i uczucia. Cieszymy się, że jak co roku, możemy spotkać się w gronie naszych pracowników, jubilatów oraz zaproszonych gości.

Rok 2002, który dobiegnie końca za miesiąc, był kolejnym rokiem określanym mianem trudnych – myślę, że trudnym dla większości polskich przedsiębiorstw przemysłowych, instytucji i organizacji, w kraju i naszym regionie. Na pewno szczególnie trudnym dla sektora górnictwa węgla kamiennego, z którym Instytut współpracuje. Przyszło nam żyć w okresie dużych i szybkich zmian zachodzących nie tylko w naszym kraju, ale również w naszym otoczeniu – europejskim i światowym. Niewątpliwym wyzwaniem rodzącej się nowej cywilizacji XXI wieku jest umiejętność przewidywania tych zmian i odpowiednio wczesnego dostosowywania się do nich. Wyzwaniem jest rozwinięcie, w każdej organizacji, umiejętności korzystania z ogromu informacji, jakie codziennie napływają z różnych źródeł oraz uzyskanie tej jedynej informacji użytecznej i niezbędnej dla instytucji.

Rozwój tych zachowań i umiejętności jest w Głównym Instytucie Górnictwa codzienną, można powiedzieć organiczną pracą – w której widzimy nasze szanse na rozwój i efektywne istnienie w dalszych latach. Ich realizacja budzi jednak wiele pytań i wątpliwości. Czy nasi pracownicy to rozumieją i akceptują? Czy doraźne i codzienne ich potrzeby nie rodzą oporów przeciwko celom wyższym i przyszłościowym, formułowanym może już nie dla nas, ale dla naszych następców? Są to problemy bardzo trudne z jakimi przychodzi się zmierzyć w każdym polskim przedsiębiorstwie i organizacji.

Rok 2002 w takiej instytucji jak Główny Instytut Górnictwa był rokiem, w którym ze szczególną starannością analizowane były wydarzenia, jakie zaistniały w polskim przemyśle wydobywczym. Mam na myśli przede wszystkim polskie kopalnie węgla kamiennego będące naszym strategicznym partnerem i klientem, w których wydarzyło się w tym roku szereg katastrof górniczych i wypadków. Było to również naszą porażką. Tak więc potrzeby w zakresie poprawy stanu bezpieczeństwa pracy uwidoczniły się w tym roku z całą ostrością. W pracy w tym właśnie obszarze badań jest zaangażowana nasza najlepsza kadra i największe środki finansowe, jakie otrzymujemy z Komitetu Badań Naukowych. W nawiązaniu do zaistniałych zdarzeń wypadkowych podjęliśmy na nowo tematykę zagrożenia wyrzutami gazów i skał, doskonalimy metody oceny ryzyka w odniesieniu do najgroźniejszych zagrożeń górniczych występujących w warunkach koncentracji wydobywania. Wnioski, które sformułowane zostały na Forum Bezpieczeństwa Górniczego zorganizowanym w kwietniu bieżącego roku, są realizowane przez nasze zakłady badawcze.

Poza problemami bezpieczeństwa pracy nowoczesne górnictwo generuje również inne potrzeby ze sfery naukowo-badawczej z obszaru techniki, ochrony środowiska, zarządzania i szkoleń, które są potrzebne nie tylko górnictwu, ale również całemu regionowi, w którym ono funkcjonuje.

Mogę z całym przekonaniem stwierdzić, że te wszystkie wspomniane potrzeby górnictwa i regionu są w ciągły sposób identyfikowane i konsultowane z Wyższym Urzędem Górniczym, Ministerstwem Gospodarki, zarządami: spółek, kopalń węgla kamiennego i kopalń rud miedzi oraz instytucjami samorządowymi i administracji lokalnej. Mając na względzie ograniczoną ilość środków finansowych, jakie mogą być wydatkowane na prace badawczo-rozwojowe program naszych badań dostosowujemy do tych właśnie potrzeb i koncentrujemy się na wspólnie zidentyfikowanych priorytetach.

Rok 2002 był także kolejnym rokiem naszych intensywnych działań związanych z przygotowaniem się do niedalekiego już wstąpienia Polski do Unii Europejskiej. Problem ten rozumiemy w Głównym Instytucie Górnictwa bardzo szeroko. To nie tylko nasze własne przygotowanie, ale także nasza merytoryczna pomoc dla regionu, dla jego zakładów przemysłowych i firm, aby mogły one w strukturze nowej Europy znaleźć swoje miejsce i efektywnie skorzystać ze środków finansowych, jakie będą do ich dyspozycji. W tym zakresie podjęliśmy przygotowanie własnych specjalistów, jak również organizację specjalistycznych studiów podyplomowych i kursów. Wymienię tutaj tylko takie jak: „Zarządzanie przedsiębiorstwem w warunkach integracji europejskiej” oraz „Fundusze Unii Europejskiej”.

W tym nurcie spraw europejskich cieszą nas sukcesy odnotowane w mijającym roku. Instytut aktualnie realizuje 13 projektów badawczych w ramach V Ramowego Programu Ramowego Unii Europejskiej, Europejskiej Wspólnoty Węgla i Stali oraz innych programów europejskich.

Także w akcji przygotowawczej do VI Programu Ramowego tzw. „expression of interest” w czerwcu tego roku zgłosiliśmy i już zostaliśmy zarejestrowani w 21 projektach. Fakty te napawają nas optymizmem, ale również powinny mobilizować wszystkich pracowników do dalszych działań. Nie wolno tutaj marnować żadnej okazji i żadnego kontaktu, gdyż tylko aktywność i zaangażowanie są naszą szansą na znalezienie swojego godnego miejsca w Europejskim Obszarze Badawczym, wśród najlepszych europejskich instytutów badawczych.

Kolejnym bardzo ważnym etapem na naszej drodze ku Europie, były realizowane w tym roku prace na rzecz uzyskania statusu jednostki notyfikowanej do oceny wyrobów na zgodność z wymaganiami unijnych Dyrektyw „Nowego Podejścia”. Instytut uczestniczył w projekcie w ramach Programu PHARE 2000, w którym realizowane były prace wdrożeniowe w obszarze trzech dyrektyw, ważnych dla polskiego przemysłu, w tym również górnictwa, w aspekcie certyfikacji, akredytacji i oceny zgodności wyrobów. Oczekujemy, że w 2003 roku uzyskamy status Jednostki Notyfikowanej, uprawnionej do przeprowadzania procesu certyfikacji wyrobów na europejski znak „CE”.

Rok 2002 umocnił wiodącą pozycję Głównego Instytutu Górnictwa na polu zarządzania przez JAKOŚĆ. Dzięki wspólnemu wysiłkowi wszystkich naszych pracowników uzyskaliśmy w kwietniu tego roku certyfikat zintegrowanego systemu zarządzania. Certyfikat ten został wydany przez Polskie Centrum Badań i Certyfikacji w kwietniu 2002 roku i potwierdził zgodność wdrożonego zintegrowanego systemu zarządzania zgodnego z wymaganiami norm ISO 9001, PN-N 18001 i ISO 14001 dotyczących jakości, bezpieczeństwa i higieny pracy oraz środowiska. Jesteśmy dumni z tego, że Instytut nasz jest jedną z dwudziestu organizacji w Polsce, które uzyskały ten certyfikat oraz drugą w województwie śląskim. Wdrożone systemy

zarządzania są elementami stosowanego u nas kompleksowego zarządzania przez jakość, czyli Total Quality Management. Istota takiego systemu zarządzania, polegająca na aktywnym udziale wszystkich pracowników, koncentrowaniu na jakości i ustawicznym dążeniu do zadowolenia naszych klientów jest szansą dla dalszego rozwoju Instytutu.

Naszym niewątpliwym sukcesem w tym obszarze jest również uzyskanie uprawnień jednostki certyfikującej systemu zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Osobiście uważam, że jest to fakt o doniosłym znaczeniu dla polskiego górnictwa, gdzie jak już wspomniałem bezpieczeństwo pracy jest i nadal będzie priorytetem.

Podobnie, jak w przypadku problematyki europejskiej, tak również w przypadku problematyki związanej ze wspomnianymi systemami zarządzania, nie zamykamy się ze swoją wiedzą i doświadczeniami we własnym gronie. Dzielimy się nią ze wszystkimi polskimi firmami, pomagając im przejść przez trudne etapy przygotowawcze do wdrożenia tych systemów. Do sukcesów z tego zakresu naszej działalności w odniesieniu do naszych górniczych partnerów zaliczę przykładowo tylko następujące:

- przygotowanie KWK Piast i Spółki „Nadwiślański Węgiel” oraz Rudzkiej Spółki Węglowej S.A. do wdrożenia systemu zarządzania jakością,
- przeprowadzenie w kopalniach Katowickiego Holdingu Węglowego S.A. auditów certyfikujących wdrożenie systemu zarządzania bezpieczeństwem pracy.

Wspomniałem już o naszych inicjatywach szkoleniowych. Potrzebuje ich górnictwo i inne gałęzie przemysłu, a także mieszkańcy naszego regionu. Zreformowane w bieżącym roku Centrum Szkoleniowo-Informacyjne jest znaczącym ośrodkiem szkoleniowym, w którym od kilkunastu lat są prowadzone specjalistyczne szkolenia o szerokim zakresie tematycznym. Oczekujemy, że w bieżącym roku uczestnikami różnych form kształcenia w GIG będzie około 4000 osób. Do wyższych form kształcenia należą studia podyplomowe i szkolenia prowadzone we współpracy z wybitnymi autorytetami naukowymi, pracownikami naukowymi, specjalistami-praktykami oraz ekspertami z Głównego Instytutu Górnictwa oraz innych jednostek takich jak: WUG, CSRG czy ZUS, a także z najbardziej znaczącymi jednostkami naukowymi, między innymi, takimi jak: Szkoła Główna Handlowa, Uniwersytet Jagielloński, Politechnika Śląska

Wspomnieć należy także o ważnym wydarzeniu, jakim była inauguracja w październiku tego roku Śląskiego Środowiskowego Studium Doktoranckiego z zakresu inżynierii środowiska. Studium zostało zorganizowane przez wszystkie wiodące w tej tematyce instytucje naukowo-badawcze województwa śląskiego, pod patronatem Oddziału Polskiej Akademii Nauk w Katowicach. Merytorycznie za funkcjonowanie Studium odpowiadać będą Główny Instytut Górnictwa i Wydział Energetyki i Inżynierii Środowiska Politechniki Śląskiej. Nabór na studium ponad 60 słuchaczy świadczy, że był to dobry pomysł.

Sukcesy, jakie wymieniłem nie byłyby możliwe, gdyby nie pracownicy, którzy tworzą je swoją codzienną pracą i często ponad przeciętnym zaangażowaniem. Zawsze uroczystości z okazji górniczego święta są w naszym Instytucie okazją do uroczystej promocji tych pracowników, którzy podnieśli swoje kwalifikacje. Rok 2002 był kolejnym dobrym rokiem rozwoju naszej kadry badawczej. W wyniku przeprowadzonego przez Radę Naukową postępowania kwalifikacyjnego tytuł naukowy profesora uzyskał Pan Dyrektor Paweł Krzystolik. Ponadto siedem osób (w tym dwie spoza GIG) uzyskało stopień doktora, jedna osoba stopień doktora habilitowanego, a dwaj następni habilitanci są po kolokwium habilitacyjnym.

Oczywiście, są na naszej drodze również przeszkody, a nieodłącznym elementem działań mogą być również niepowodzenia. Nie były one może zbyt dotkliwe, ale uważamy że ich analiza powinna być dla nas inspiracją jak je w przyszłości przezwyciężać.

Szanowni Państwo!

Święto górnicze, to nie tylko refleksja nad minionym rokiem, ale także okazja do złożenia życzeń wszystkim pracownikom – tym obecnym tutaj na uroczystej akademii, jak i znajdującym się aktualnie na stanowiskach pracy. Pragnę Wam wszystkim w imieniu własnym, a także Rady Naukowej i Kierownictwa Instytutu złożyć serdeczne życzenia wszelkiego dobra, zdrowia i pomyślności. Niech życzenia te obejmą nie tylko miejsca pracy, ale także Wasze domy i rodziny. Nasza wspólna praca w Głównym Instytucie Górnictwa niech będzie w przyszłym roku pracą spokojną, dającą zadowolenie i gwarancję dobrobytu dla Was

i Waszych rodzin, niech sprzyja rozwojowi i dalszemu istnieniu Głównego Instytutu Górnictwa.

Pragnę także wszystkim naszym dostojnym gościom, z których wielu jest związanych z naszym Instytutem, górnictwem i województwem śląskim, życzyć z okazji Górniczego Święta – Barbórki dużo wszelkiego dobra i pomyślności.

Pozwólcie Państwo, że moje Barbórkowe wystąpienie zakończę górniczym pozdrowieniem

Szczęść Boże

Cezary Bartmański

AUTOMATYZACJA BADAŃ METROLOGICZNYCH PRZYRZĄDÓW DO POMIARU DRGAŃ

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań nad usprawnianiem procesu uwierzytelniania i kalibracji przyrządów do pomiaru drgań. Do wykonywania takich badań Laboratorium Akustyki Technicznej Głównego Instytutu Górniczego uzyskało uprawnienia Prezesa Głównego Urzędu Miar.

Podano akty prawne precyzujące wymagania odnośnie do konstrukcji i wartości parametrów technicznych przyrządów do pomiaru drgań, mających znaczenie dla bezpieczeństwa życia i ochrony zdrowia oraz wprowadzające obowiązek okresowego uwierzytelniania przyrządów.

Proces uwierzytelniania i kalibracji przyrządów wiąże się z wykonaniem wielu czynności sprawdzających na zgodność parametrów przyrządu z wymaganiami. Na podstawie analizy pracochłonności poszczególnych rodzajów czynności sprawdzających stwierdzono, że: najbardziej pracochłonny jest pomiar charakterystyki częstotliwościowej. W związku z powyższym zautomatyzowano metodę sprawdzania charakterystyki częstotliwościowej oraz wytypowano zestaw przyrządów, wymagany do jej realizacji. Sterowanie przyrządami stanowiska pomiarowego zrealizowano z wykorzystaniem standardu magistrali pomiarowej GPIB. W charakterze kontrolera magistrali zastosowano komputer klasy IBM PC, wyposażony w kartę GPIB-PCII/IIA firmy National Instruments Corp. W artykule przedstawiono opis programu wraz z algorytmem pracy oraz proces przetwarzania danych pomiarowych, przy wykorzystaniu arkusza kalkulacyjnego MS Excel 97. Formę udokumentowania wyników pomiarów zilustrowano fragmentem świadectwa uwierzytelnienia przyrządu.

Algorytm pracy programu stanowi implementację części dotyczącej sprawdzania charakterystyki częstotliwościowej, procedury pomiarowej nr 2 pn. „Sprawdzanie przyrządów do pomiaru drgań oddziałujących na organizm człowieka”, wchodzącej w skład Księgi Procedur Pomiarowych Laboratorium Pomiarowego nr 6, akredytowanego przez Prezesa Głównego Urzędu Miar i spełnia wymagania zawarte w dokumentach nadrzędnych, tj. w przepisach metrologicznych i instrukcji sprawdzania przyrządów do pomiaru drgań oddziałujących na organizm człowieka, wydanych przez Główny Urząd Miar.

Automation of metrological tests of instruments for vibration measurement

Abstract

The article presents the results of investigations relating to the improvement of the certification and calibration process of instruments designed for vibration measurement. The Laboratory of Technical Acoustics of the Central Mining Institute has gained the authority to perform such tests.

Legal acts were given, precising the requirements regarding the construction and technical parameter value of instruments for vibration measuring, and introducing the obligation of periodical instrument certification.

The certification and calibration process of instruments is connected with the performance of many checking actions relating to the conformity of instrument parameters with requirements. On the basis of labour intensity analyses of individual kinds of verification actions it has been ascertained that the most labour-consuming is the frequency response measurement. In connection with the above one has automated the method of frequency response and selected the set of instruments, required for its realization. Instrument steering of the measuring stand was realized with the use of GPIB measuring control bus standard. As control bus controller a computer of IBM PC class was applied, equipped with

GPIB-PCII/IIA card of the firm National Instruments Corporation. The article presents a description of the program along with the work algorithm and process of measuring sheet. The form of measuring results documenting was illustrated by a certificate fragment of instrument certification.

The work algorithm of the program constitutes the implementation of the part, concerning frequency response verification, of the measuring procedure no.2 entitled "Verification of instruments for the measurement of vibrations influencing the human organism", included in the Measuring Procedure Manual of the Measuring Laboratory no.6, accredited by the President of the Central Office of Measures, and meets the requirements covered by superordinated documents, i.e. metrological regulations and verification instruction for instruments serving the measurement of vibrations, influencing the human organism, issued by the Central Office of Measures.

1. WPROWADZENIE

Przyrządy do pomiaru drgań, mające znaczenie dla bezpieczeństwa życia i ochrony zdrowia, podlegają ściśle określonym wymaganiom dotyczącym konstrukcji i wartości parametrów technicznych. W Polsce, wymagania te określa norma PN-91/N-01355 „Drgania. Przyrządy do pomiaru drgań mechanicznych oddziałujących na organizm człowieka”. Spełnienie wymagań jest warunkiem zatwierdzenia typu przyrządu przez GUM, i tym samym, dopuszczenia do stosowania [4].

Istnieje obowiązek prawny okresowego uwierzytelniania przyrządów do pomiaru drgań mechanicznych oddziałujących na organizm człowieka, wprowadzony zarządzeniami Prezesa GUM [3, 5, 6], co wiąże się z wykonaniem badań na zgodność parametrów przyrządu z wymaganiami. Jednolity sposób przeprowadzania badań przez różne, uprawnione do tego laboratoria, zapewniają przepisy metrologiczne i instrukcje sprawdzania przyrządów wydane przez Prezesa GUM. Fakt spełnienia przez przyrząd określonych wymagań metrologicznych potwierdzany jest świadectwem uwierzytelnienia.

W dniu 31.12.1997 roku Laboratorium Akustyki Technicznej GIG uzyskało akredytację Prezesa Głównego Urzędu Miar w Warszawie (certyfikat akredytacji nr A 6/1/97) i uprawnienia do uwierzytelniania, wzorcowania i sprawdzania przyrządów wibroakustycznych (upoważnienie nr 4/97). Księga Procedur Pomiarowych, objęta akredytacją, zawiera sześć procedur pomiarowych, w tym Procedurę Pomiarową nr 2 „Sprawdzanie przyrządów do pomiaru drgań mechanicznych oddziałujących na organizm człowieka”, bezpośrednio związaną z tematem artykułu.

W procedurze tej zostało szczegółowo opisanych 12 rodzajów czynności sprawdzających, które należy wykonać w procesie uwierzytelniania przyrządów. Realizacja całej procedury pomiarowej jest pracochłonna – wymaga wypełnienia, co najmniej 13 stron protokołów z pomiarów i 9 stron świadectwa końcowego. Utrzymanie w tej sytuacji konkurencyjności świadczonych usług wymaga dobrze zorganizowanego i sprawnego ich wykonywania. W dużej mierze jest to możliwe dzięki wykorzystywaniu nowoczesnych, zautomatyzowanych technik pomiarowych. Efekt ich stosowania jest szczególnie widoczny podczas badań wymagających wykonania dużej liczby powtarzających się pomiarów. Liczbę pomiarów, potrzebną do wykonania określonego rodzaju czynności sprawdzających ze wskazaniem możliwości ich zautomatyzowania przedstawiono w tablicy 1. Zawarte w niej dane wskazują, że wprowadzenie automatyzacji pomiarów jest najbardziej pożądane w odniesieniu do sprawdzania

charakterystyki częstotliwościowej przyrządów, z powodu jego dużej pracochłonności. Jest to tym bardziej zasadne, że (czego nie uwidacznia tablica) z uwagi na specyfikę pomiaru w zakresie częstotliwości 0,1÷10 Hz, czas jednego pomiaru wynosi 4 minuty. W efekcie, czas wykonania sprawdzenia czterech charakterystyk częstotliwościowych, dla jednego przyrządu, wynosi ponad 5 godzin. Wprowadzenie wspomagania komputerowego do pomiarów i odciążenie obsługi od wykonywania wielokrotnie powtarzających się czynności w istotny sposób usprawnia przebieg procesu sprawdzania, zmniejszając jednocześnie prawdopodobieństwo popełnienia, przez obsługę, błędu. Należy również zwrócić uwagę na znaczne oszczędności czasu, który może być efektywnie wykorzystany na wykonanie innych prac.

Tablica 1. Liczba pomiarów potrzebna do wykonania określonego rodzaju czynności sprawdzających

Rodzaj sprawdzenia	Liczba pomiarów	Możliwość automatyzacji pomiarów
ogłędziny zewnętrzne	–	nie
sprawdzenie błędów podstawowych	9	nie
sprawdzenie charakterystyk częstotliwościowych	173	tak
sprawdzenie błędów przy zmianie zakresów pomiarowych	3	nie
sprawdzenie błędów liniowości przetwornika pomiarowego i urządzenia wskazującego	10	tak
sprawdzenie poziomu zakłóceń wewnętrznych	9	nie
sprawdzenie błędów pomiaru wartości skutecznej	24	półautomat ^{*)}
sprawdzenie błędów pomiaru wartości szczytowej	6	nie
sprawdzenie charakterystyk dynamicznych przetwornika wartości skutecznej	12	półautomat
sprawdzenie charakterystyk dynamicznych przetwornika wartości szczytowej	2	nie
sprawdzenie czasu spadku wskazań	6	nie
sprawdzenie błędów przetwornika uśredniająco-całkującego	3	nie

^{*)} Terminem „półautomat” zaznaczono czynności sprawdzające, w przypadku których możliwa jest jedynie częściowa automatyzacja, z uwagi na konieczność dokonywania odczytów z urządzenia wskazującego badanego przyrządu.

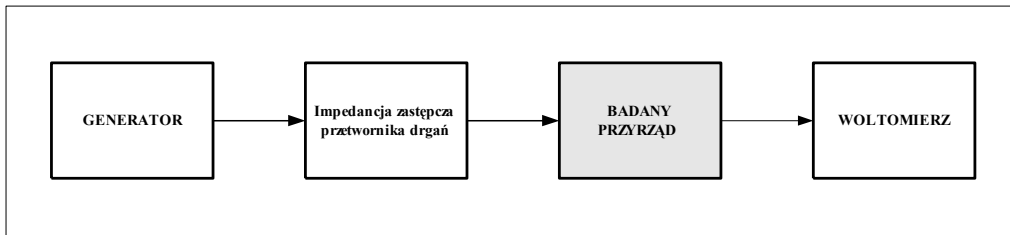
2. METODA SPRAWDZANIA CHARAKTERYSTYKI CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ

Przyrządy do pomiaru drgań oddziałujących na organizm człowieka mają cztery rodzaje filtrów kształtujących ich charakterystyki częstotliwościowe:

- WBxy, WBz – filtry służące do pomiaru wartości skorygowanej przyspieszenia drgań mechanicznych o ogólnym oddziaływaniu na organizm człowieka, odpowiednio dla kierunków poziomych i pionowego,

- H-A – filtr służący do pomiaru wartości skorygowanej przyspieszenia drgań mechanicznych o miejscowym oddziaływaniu na organizm człowieka,
- LIN – filtr służący do pomiaru szerokopasmowej wartości skutecznej przyspieszenia drgań.

Przebieg każdej z tych charakterystyk, wraz z dopuszczalnymi odchyłkami dla poszczególnych częstotliwości, jest podany w przepisach metrologicznych [2], w postaci tabelarycznej. Celem sprawdzania jest określanie, czy odchyłki zmierzonej charakterystyki częstotliwościowej nie przekraczają wartości dopuszczalnych, w określonym zakresie częstotliwości. Sprawdzenie wykonywane jest w układzie pomiarowym, którego schemat blokowy przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego dla sprawdzania charakterystyki częstotliwościowej

Fig. 1. Block scheme of measuring system for frequency response verification

Na wejście badanego przyrządu, przez równoważną impedancję elektryczną przetwornika drgań, podawany jest sygnał sinusoidalny. Częstotliwość sygnału dla poszczególnych punktów pomiarowych wybrana jest zgodnie z wytycznymi instrukcji sprawdzania przyrządów [1], dla określonego rodzaju filtru. Wartość napięcia sygnału z generatora, ustalona przez osobę realizującą pomiary, jest stała dla wszystkich punktów pomiarowych. Powinna ona być tak dobrana, aby można było uzyskać maksymalną dynamikę pomiarów w całym zakresie częstotliwości mierzonych. Dla każdej wartości częstotliwości, wykonywany jest pomiar napięcia na wyjściu badanego przyrządu. Następnie dla każdego punktu pomiarowego określa się błąd względny charakterystyki częstotliwościowej, zgodnie z poniższymi wzorami:

$$\delta_i = \frac{K_i - K_{p,i}}{K_{p,i}} 100\% \quad (1)$$

gdzie: K_i – wzmacnienie dla i -tego punktu pomiarowego,

$$K_i = \frac{U_{wyj,i}}{\frac{U_{wyj,ref}}{K_{p,ref}}} \quad (2)$$

$U_{wyj,i}$ – napięcie na wyjściu przyrządu dla i -tego punktu pomiarowego,

$U_{wyj,ref}$ – napięcie na wyjściu przyrządu dla częstotliwości odniesienia,

- $K_{p,i}$ – wartość poprawna wzmocnienia, dla i -tego punktu pomiarowego, zgodnie z przepisami metrologicznymi [2],
- $K_{p,ref}$ – wartość poprawna wzmocnienia, dla częstotliwości odniesienia, zgodnie z przepisami metrologicznymi [2].

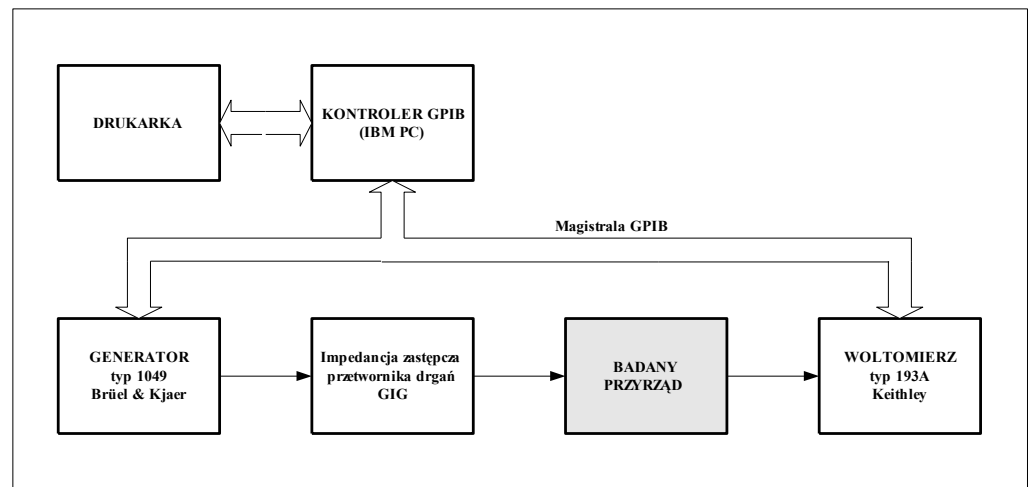
Błędy dla poszczególnych punktów pomiarowych porównywane są z wartościami dopuszczalnymi, określonymi w przepisach metrologicznych. Wynik sprawdzenia danego filtra jest pozytywny, jeśli błędy charakterystyki częstotliwościowej nie przekraczają wartości dopuszczalnych błędów dla wszystkich punktów pomiarowych.

Dane identyfikujące przyrząd oraz wyniki pomiarów i obliczeń zapisywane są w protokole z pomiarów. Protokoły ze wszystkich czynności sprawdzających, z pozytywną oceną błędów pomiaru, stanowią podstawę wydania dokumentu końcowego, jakim jest świadectwo uwierzytelnienia przyrządu.

2.1. Opis układu pomiarowego i algorytm pracy

Schemat blokowy układu pomiarowego, przeznaczonego do zautomatyzowanego sprawdzania charakterystyk częstotliwościowych przyrządów, przedstawiono na rysunku 2. Prezentowany na rysunku 1 układ pomiarowy został rozbudowany o część sterowania cyfrowego w postaci kontrolera i magistrali pomiarowej GPIB. W charakterze kontrolera zastosowano komputer klasy IBM PC z zainstalowaną kartą typu GPIB-PCII/IIA, firmy National Instruments Corp. Magistrala łączy z kontrolerem wszystkie przyrządy wymagające sterowania, w czasie wykonywania pomiarów. Program przystosowany jest do sterowania zestawem przyrządów pomiarowych, w skład którego wchodzi:

- generator sygnałów sinusoidalnych typu 1049 firmy Brüel & Kjær,
- woltomierz typu 193A firmy Keithley.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego dla automatycznej realizacji pomiarów

Fig. 2. Block scheme of measuring system for automatic measurement realization

Wykorzystanie innych typów przyrządów pomiarowych jest możliwe, lecz wymaga uprzedniego dostosowania programu do specyfiki sterowania konkretnego przyrządu. Formaty rozkazów, funkcjonalnie tych samych przyrządów, lecz wyprodukowanych przez różnych wytwórców, zazwyczaj różnią się od siebie.

Praca układu pomiarowego odbywa się pod kontrolą programu komputerowego, realizującego opisaną metodykę pomiaru. Wszelkich zmian nastaw generatora sygnałowego i woltomierza, wynikających z wykonywanej procedury pomiarowej, dokonuje kontroler systemu pomiarowego za pośrednictwem magistrali GPIB. Również tą drogą przesyłane są do kontrolera wyniki pomiarów, gdzie następuje ich rejestracja, w celu dalszego przetwarzania.

Program rozpoczyna pracę od przełączenia sterowania przyrządów pomiarowych na tryb zdalnego sterowania. Od tego momentu woltomierz i generator „reagują” jedynie na polecenia przesyłane magistralą pomiarową. Uruchomienie pomiarów poprzedzone jest wyborem rodzaju filtru, dokonywanym przez użytkownika. W konsekwencji wyboru, ustalone zostają parametry będące funkcją rodzaju filtru (tabl. 2).

Tablica 2. Parametry wykonania programu jako funkcja rodzaju filtru

Rodzaj filtru	<i>F</i> _{min.} Hz	<i>F</i> _{max} Hz	Plik danych wejściowych	Plik wyników pomiarów
WBxy	0,1	800	wbxy.dat	wbxy.pom
WBz	0,1	800	wbz.dat	wbz.pom
H-A	0,8	10 000	h_a.dat	h_a.pom
LIN	0,1	10 000	lin.dat	lin.pom

Sterowanie zmianami częstotliwości pomiarowych realizowane jest w pętli. Zmiana częstotliwości odbywa się od wartości najmniejszej do największej, w obrębie przedziału $\langle F_{min}; F_{max} \rangle$. Poszczególne wartości częstotliwości odczytywane są z właściwego pliku danych i są zgodne ze znormalizowanym ciągiem wartości 1/3-oktawowych. Dla każdej częstotliwości, po zaprogramowaniu generatora, wykonywany jest pomiar napięcia, a wynik pomiaru zapamiętany i wyświetlony wraz z wartością częstotliwości, na ekranie.

Po wykonaniu pomiarów, dla wszystkich zadeklarowanych częstotliwości, wyniki zostają zapisane na dysku w pliku wynikowym, o określonej nazwie, po czym następuje wyłączenie generatora oraz zmiana sterowania przyrządami pomiarowymi na sterowanie lokalne, kończąc tym samym działanie algorytmu.

Uzyskane wyniki pomiarów stanowią podstawę do wyznaczenia błędów sprawdzanej charakterystyki częstotliwościowej. Wszystkie obliczenia wykonywane są z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego MS Excel 97, w pliku roboczym, skojarzonym ze sprawdzanym przyrządem. Plik ten tworzony jest jako kopia pliku wzorcowego, zawierającego implementację wszystkich wzorów obliczeniowych, stosowanych w procedurze pomiarowej. W wyniku otwarcia, w programie MS Excel 97, pliku roboczego *.xls, na zakładce odpowiadającej wybranemu rodzajowi filtru oraz właściwego pliku z wynikami pomiarów *.pom, dane pomiarowe

zostają automatycznie skopiowane do arkusza kalkulacyjnego po czym, w wyniku dokonanych obliczeń, zostaje wypełniona tabela pliku roboczego, zawierająca informacje o błędach charakterystyki częstotliwościowej. Ponadto, zostają utworzone:

- tabela do protokołu z pomiarów,
- tabela do świadectwa uwierzytelnienia,
- wykres charakterystyki częstotliwościowej do świadectwa uwierzytelnienia,

niezbędne do edycji dokumentów końcowych, wynikających z zapisów w procedurze pomiarowej. Na rysunku 3 przedstawiono przykładowy fragment świadectwa uwierzytelnienia, zawierającego wyszczególnione wyżej, tworzone automatycznie elementy.

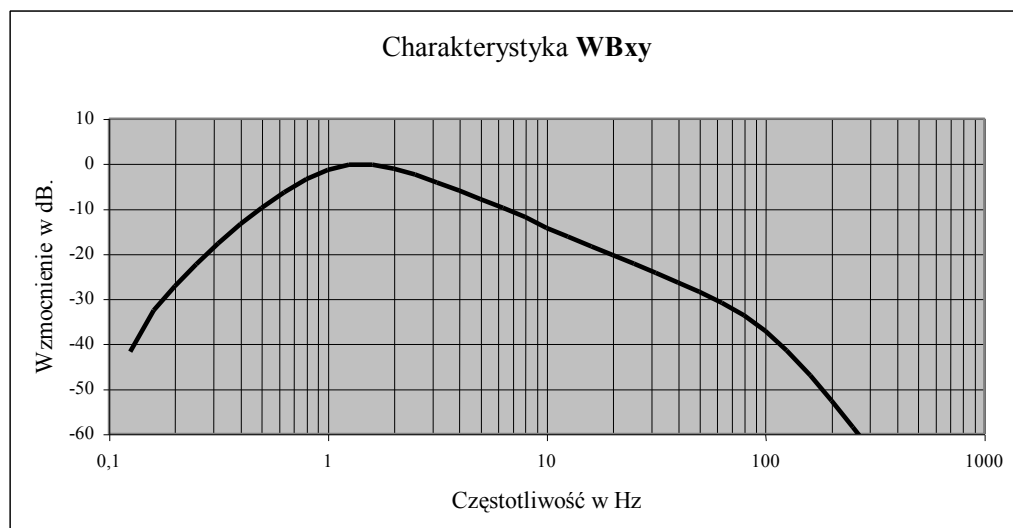
ŚWIADECTWO UWIERZYTELNIENIA wydane przez Laboratorium Pomiarowe Akredytowane nr 6		
Data wydania: 03 grudnia 2001	Nr świadectwa: TEST	Strona 3/9

3. Charakterystyki częstotliwościowe

f – częstotliwość

U_{wyj} – napięcie na wyjściu AC

Charakterystyka: WBxy					
f w Hz	U_{wyj} w V	Błąd w %	f w Hz	U_{wyj} w V	Błąd w %
0,1			10	0,317	-4,2
0,125	0,0133	-67,9	12,5	0,255	-2,6
0,16	0,0355	-45,9	16	0,200	-3,7
0,2	0,0686	-34,0	20	0,160	-3,1
0,25	0,122	-25,8	25	0,128	-2,1
0,315	0,209	-19,7	31,5	0,1012	-2,0
0,4	0,345	-15,0	40	0,0792	-2,8
0,5	0,530	-14,4	50	0,0622	-1,9
0,63	0,786	-12,6	63	0,0473	-2,0
0,8	1,108	-7,6	80	0,0338	-3,2
1	1,411	-2,0	100	0,0228	-1,9
1,25	1,609	2,6	125	0,0139	0,5
1,6	1,615	2,5	160	0,00730	-3,7
2	1,465	-0,4	200	0,00383	-3,1
2,5	1,251	-2,4	250	0,00195	-1,6
3,15	1,027	-3,0	315	0,00096	-2,5
4	0,824	-3,0	400	0,00050	1,1
5	0,663	-1,4	500	0,00033	-1,4
6,3	0,530	-0,2	630		
8	0,419	0	800		



Rys. 3. Fragment świadectwa uwierzytelnienia przyrządu

Fig. 3. Certificate fragment of instrument certification

3. PODSUMOWANIE

- Weryfikacja poprawności pracy programu została przeprowadzona przez porównanie wyników uzyskanych, z jego zastosowaniem, z wynikami otrzymanymi podczas dotychczasowego, ręcznego sterowania przyrządami pomiarowymi.
- Program został wdrożony w Laboratorium Pomiarowym nr 6, akredytowanym przez Prezesa GUM, potwierdzając spodziewane walory użytkowe.
- Przenośność oprogramowania ograniczona jest do systemów pomiarowych o identycznym, ze specyfikacją zestawie przyrządów. Wynika to z różnego formatu danych sterujących, dla funkcjonalnie takich samych przyrządów, lecz pochodzących od różnych producentów. Wykorzystanie programu w systemach z innym zestawem przyrządów wymaga jedynie wprowadzenia zmian, uwzględniających specyfikę sterowania konkretnych przyrządów.
- Program może być wykorzystany do sprawdzania charakterystyk częstotliwościowych dowolnych przyrządów i urządzeń, pracujących w zakresie częstotliwości 0,1÷10 kHz.

Literatura

1. Instrukcja sprawdzania przyrządów do pomiaru drgań mechanicznych oddziałujących na organizm człowieka. Załącznik do zarządzenia nr 108 Prezesa GUM z dnia 4.09.1995.
2. Przepisy metrologiczne o przyrządach do pomiaru drgań mechanicznych oddziałujących na organizm człowieka. Załącznik do zarządzenia nr 107 Prezesa GUM z dnia 4.09.1995.

3. Zarządzenie nr 2 Prezesa GUM z dnia 03.01.1994 r. w sprawie określenia warunków i trybu zgłaszania przyrządów pomiarowych do uwierzytelniania oraz do określenia wzorów cech uwierzytelnienia.
4. Zarządzenie nr 10 Prezesa GUM z dnia 15.04.1994 r. w sprawie ustalenia trybu postępowania przy zatwierdzaniu typu przyrządów pomiarowych.
5. Zarządzenie nr 12 Prezesa GUM z dnia 22.04.1994 r. w sprawie określenia przyrządów pomiarowych podlegających obowiązkowi uwierzytelnienia.
6. Zarządzenie nr 31 Prezesa GUM z dnia 01.07.1999 r. zmieniające zarządzenie w sprawie wprowadzania przepisów metrologicznych o przyrządach do pomiaru drgań mechanicznych oddziałujących na organizm człowieka.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Adam Lipowczan

Barbara Bialecka

WSPOMAGANIE PROEKOLOGICZNEGO ZARZĄDZANIA ZAKŁADEM ENERGETYCZNYM

Streszczenie

Wprowadzenie nowych, drastycznych norm emisji, zgodnych z wymogami UE, może w niedalekiej przyszłości spowodować zamykanie elektrowni opalanych węglem kamiennym, obciążających środowisko naturalne. Aby elektrownie te nie musiały być zamykane możliwe jest przystosowanie ich instalacji do obowiązujących norm środowiskowych, przez modernizację i inwestycje doposażeniowe. Działania te, oprócz zaangażowania znacznych środków inwestycyjnych, wymagają także pełnej informacji o wdrożonych technologiach obejmujących ich wycenę w powiązaniu z efektywnością ekologiczną oraz o przydatności do dalszej eksploatacji posiadanych przez elektrociepłownię środków technicznych.

Z tych przesłanek wynikał cel pracy, który dotyczył sporządzenia modelu umożliwiającego zwiększenie (podwyższenie) trafności decyzji dotyczących wyboru technologii redukcji zanieczyszczeń gazowych w określonej sytuacji ekonomicznej i technicznej zakładu.

Przy rozwiązywaniu problemów związanych z modernizacją elektrociepłowni wymagana jest optymalizacja decyzji, zaś matematyczne ujęcie tematu w postaci modelu decyzyjnego gwarantuje prawidłową procedurę i kompleksowe uwzględnienie dominujących zmiennych decyzyjnych i dominujących parametrów w procesie doboru trafnych rozwiązań.

Sporządzenie modelu decyzyjnego wymagało zdefiniowania, w układzie sekwencyjnym, następujących elementów: głównych celów, funkcji kryterialnej, warunku optymalizacyjnego podstawowych zmiennych decyzyjnych.

Czynnikami warunkującymi podejmowanie trafnych decyzji inwestycyjnych dotyczących modernizacji EC jest znajomość aktualnie stosowanych technologii produkcji, stanu technicznego maszyn i urządzeń oraz dostępnych technologii chroniących środowisko naturalne.

Istotne znaczenie mają przyjęte w modelu mierniki i kryteria oceny efektywności działań modernizacyjnych. Do podstawowych kryteriów, od których był uzależniony wybór technologii, zaliczono: skuteczność ekologiczną, efektywność ekonomiczną oraz sprawność energetyczną. Do realizacji przyjętego celu badawczego podstawowe znaczenie miało zebranie danych będących podstawą baz wiedzy dostępnych w programie, jak również zebranie i przygotowanie danych empirycznych do weryfikacji modelu.

Model wykonano zgodnie ze zdefiniowanymi celami i zadaniami, przyjętymi założeniami dotyczącymi jego struktury, z rodzajem wykorzystywanych danych oraz scenariuszami badawczymi. W artykule przedstawiono strukturę i opis matematyczny zbudowanego modelu, jego implementację komputerową i weryfikację pod kątem poprawności działania.

Pro-ecological power plant management support

Abstract

The introduction of new, drastic, consistent with EU requirements, emission standards may cause in near future the closure of hard coal-fired power plants, affecting the natural environment. In order to avoid the closure of these power plants, possible is the adaptation of their installation to being in force environmental standards by means of modernization and equipment-related investments. These activities, apart from the engagement of considerable investment funds, require also complete information on the implemented technologies, comprising their valuation in connection with ecological

efficiency and the suitability of technical means, being in the power plant's possession, for further exploitation.

From these promises arose the aim of the work, which concerned the development of a model enabling to improve the accuracy of decisions regarding the selection of technologies relating to the reduction of gaseous pollutions in a determined economic and technical situation of the plant.

In case of solving problems connected with the modernization of a thermal-electric power station, optimization of decisions is required, and a mathematical approach to the problem in the form of a decision-making model guarantees correct procedure and comprehensive consideration of predominant decisive variables and predominant parameters in the process of accurate solution selection.

The development of the decisive model has required to define, in a sequential system, the following elements: main objectives, criterial function, optimization condition of basic decisive variables.

The factors conditioning accurate investment decision taking, concerning the modernization of thermal-electric power stations, is the knowledge of currently applied production technologies, technical state of machines and devices, and accessible technologies, protecting the natural environment.

Essential significance have the measuring instruments and efficiency criteria of modernization activities, adopted in the model. To the basic criteria, relating to technology selection, belong: ecological efficiency, economic effectiveness and power efficiency. For the realization of the adopted investigation objective, the basic significance had the collection of data, which constituted the basis of data bases available in the programme, as well as actions aiming at the collection and preparation of empirical data for model verification.

The model has been performed in accordance with defined objectives and targets, adopted assumptions concerning its structure, with the kind of data use and research scenarios. The article presents the structure and mathematical description of the constructed model, its computer implementation and verification regarding the correctness of action.

1. WSTĘP

Transformacja polskiej gospodarki wymuszająca zmiany w procesie zarządzania przedsiębiorstwem powoduje, że rozszerza się zakres potrzeb informatycznych kadry kierowniczej, warunkujących podejmowanie trafnych, odpowiedzialnych decyzji strategicznych, uwzględniających współczesne, a także przyszłościowe wymagania ekologiczne wynikające z przystosowania polskiej gospodarki do integracji z Unią Europejską.

Przy opracowywaniu strategii rozwoju lub podejmowaniu decyzji inwestycyjnych w przedsiębiorstwach sektora energetycznego, oprócz analizy aktualnych krajowych uwarunkowań prawnych, ekologicznych, technologicznych, finansowych czy paliwowych, niezbędne staje się przewidywanie nadchodzących zmian oraz poszerzanie analiz o wymagania europejskie, a czasami również światowe. Uwzględnienie tych wymagań jest warunkiem niezbędnym do osiągnięcia sukcesu w najbliższej przyszłości.

W celu rozszerzenia możliwości podejmowania trafniejszych decyzji, na przykładzie decyzji dotyczących modernizacji elektrociepłowni opracowano model wspomagający. Model ten obejmuje aspekty ekologiczne, techniczne i ekonomiczne w ujęciu uwzględniającym zarówno wymagania współczesnej ekonomii, techniki zarządzania, jak i metod minimalizacji kosztów.

2. MODEL WSPOMAGANIA DECYZJI

Wybór określonego sposobu redukcji zanieczyszczeń wymaga stworzenia odpowiedniego narzędzia badawczego, które w zakładach elektroenergetycznych pozwoli na określenie skutków ekonomicznych takiej decyzji. Narzędzie to powinno umożliwić określenie optymalnych kosztów i nakładów inwestycyjnych modernizacji proekologicznej dla różnych scenariuszy badawczych precyzujących wymagania ochrony środowiska [2, 6, 10, 15]. Założenia takie może spełnić omawiany model wspomagający decyzję modernizacji proekologicznej, który dla konkretnych warunków działania zakładu elektroenergetycznego umożliwi podjęcie decyzji optymalnej pod względem ekologicznym, technicznym i ekonomicznym.

W opracowanym modelu, określenie skutków ekonomicznych jest związane z wyborem odpowiedniej strategii redukcji zanieczyszczeń. Szczegółowo rozważono dwie strategie, zgodnie z którymi:

- zakładano respektowanie aktualnie obowiązującego prawodawstwa (strategia reaktywna) oraz
- wskazywano na możliwość spełniania wymogów Unii Europejskiej (strategia aktywna).

Dla każdej z analizowanych strategii oceniano efektywnie ekologicznie procesy redukcji SO_2 , NO_2 i pyłu na podstawie:

- analizy redukcji zanieczyszczeń gazowych poprzez dobór paliw węglowych ze szczególnym uwzględnieniem jakości i cen dostarczanego węgla,
- analizy redukcji emisji poprzez modernizację proekologiczną,
- analizy redukcji emisji poprzez budowę instalacji odsiarczania i odazotowania spalin.

W przypadku zakładów elektroenergetycznych o średnim i niskim czasie wykozystania w ciągu roku oraz wyposażonych w stare jednostki kotłowe (dobiegające granicznego czasu żywotności) rozważono także:

- możliwość przestawienia się na inny rodzaj paliwa,
- ograniczenie produkcji poprzez wycofywanie jednostek, których modernizacja jest nieopłacalna,
- możliwość zakupu pozwoleń na emisję.

Analiza wyników obliczeń powinna umożliwić sformułowanie wskazań dla zarządu EC kształtującego politykę ekologiczną zakładu, dotyczących kierunku usprawniania jego funkcjonowania [1, 5].

Uogólniając, opracowany model matematyczny umożliwi określanie optymalnych kosztów w celu osiągnięcia redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych dla różnych scenariuszy badawczych, a wyniki obliczeń będą stanowić podstawę podjęcia decyzji o zastosowaniu odpowiedniego rozwiązania.

2.1. Opis matematyczny modelu

Strukturę modelu przedstawiono na rysunku 1. Dotrzymanie przez elektrociepłownię wybranych, zgodnie z przyjętą strategią, limitów emisji wymaga podjęcia określonych działań. Generalnie elektrociepłownie dysponują trzema sposobami redukcji zanieczyszczeń gazowych: zakup węgla o lepszych parametrach eksploatacyjnych, modernizacja procesu spalania, budowa instalacji redukcji zanieczyszczeń. Konieczna wielkość redukcji zanieczyszczeń jest w ścisłym związku z jakością dostarczanego paliwa, a budowa instalacji redukcji zanieczyszczeń uwarunkowana jest możliwościami zakładu. Wybór określonego sposobu redukcji zanieczyszczeń wpływa znacząco na koszty wytwarzania energii elektrycznej [3, 4, 7, 9]. Celem zakładu jest więc minimalizacja proekologicznych nakładów inwestycyjnych, jak i rocznych kosztów produkcji, a zadanie optymalizacyjne sprowadza się do minimalizacji kosztów redukcji emisji przy założonym jej poziomie. Wybór najtańszego rozwiązania spełniającego to podstawowe ograniczenie umożliwia zastosowanie modelu wspomagającego.

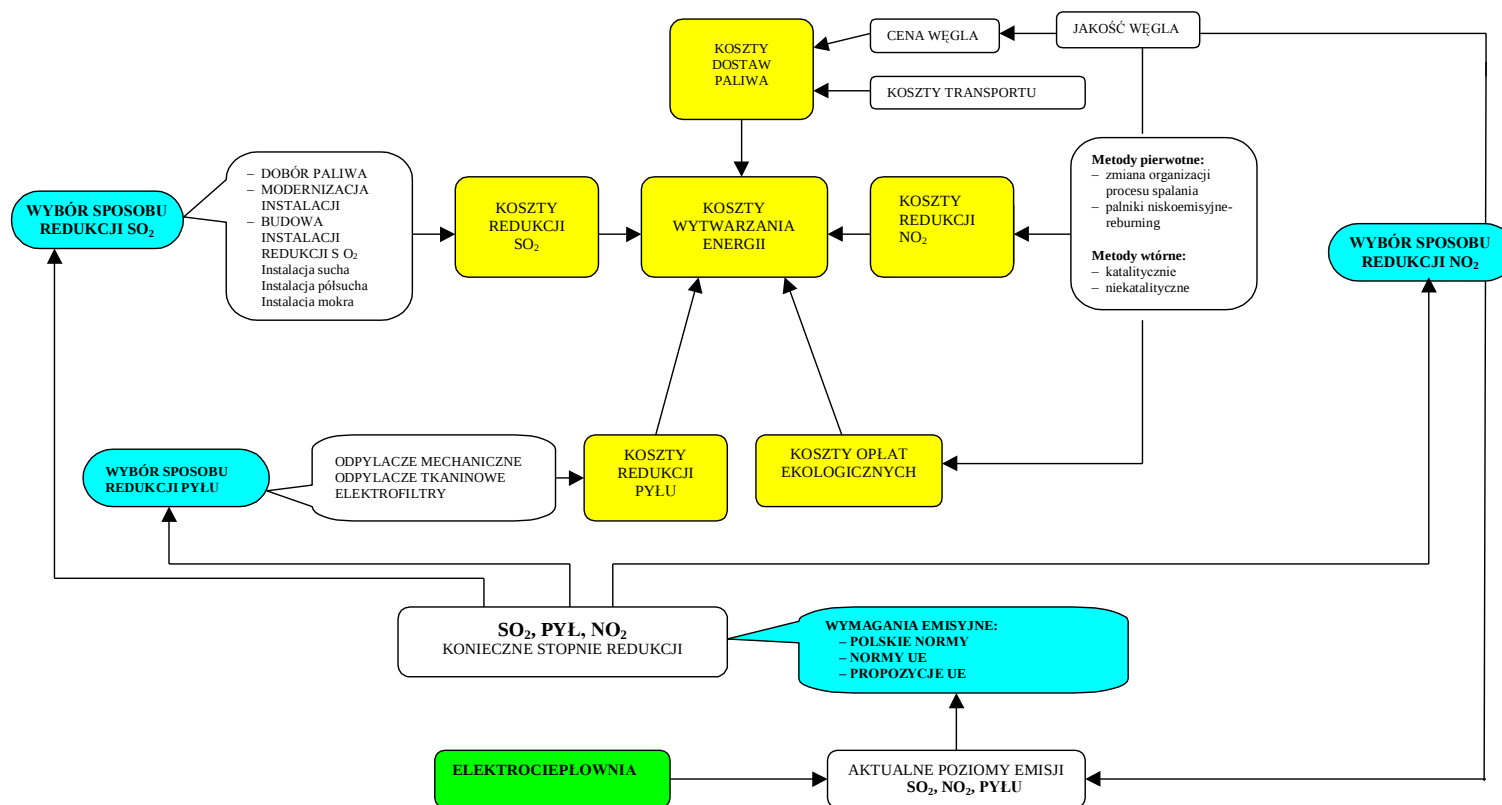
Zmienne decyzyjne, zawarte w modelu, to: wybór jakości dostaw węgla kamiennego, stopień redukcji emisji SO_2 , NO_2 i pyłów, a co za tym idzie wybór sposobu technicznej eksploatacji zakładu. Zbiór decyzji jest zatem zbiorem skończonym, a konkretna decyzja polega na wyborze określonego wariantu modernizacyjnego, a więc na inwestowaniu w kolejnych miesiącach lub latach, środków inwestycyjnych w określonej wysokości na wybrany wariant modernizacji proekologicznej. Źródłem tych środków jest fundusz przedsiębiorstwa, który może być uzupełniany kredytami bankowymi, ewentualnie emisją akcji i/lub obligacji, a także obsługa zadłużeń oraz wypłata dywidend dla akcjonariuszy.

Jako decyzje jest także traktowane niepodejmowanie decyzji inwestycyjnych, a w związku z tym zgoda na płacenie, oprócz opłat emisyjnych, dodatkowo kar za przekroczenie lub naruszenie warunków korzystania ze środowiska.

W opracowanym modelu można wyróżnić następujące grupy równań:

- ogólne równania charakteryzujące zachowania zakładu w zależności od kosztów urządzeń ochrony środowiska oraz możliwych do zastosowania instrumentów ochrony środowiska,
- funkcję celu będącą jednocześnie kryterium optymalizacyjnym,
- równania kosztów opisujące poszczególne składniki funkcji celu,
- równania bilansowe.

Poniżej przedstawiono główne równania modelu oraz stosowane kryteria optymalizacyjne.



Rys. 1. Struktura modelu wspomaganie decyzji modernizacji proekologicznej (opracowanie własne)

Fig. 1. Structure of model of pro-ecological modernization decision support (own elaboration)

Ogólne równania. Za podstawę działań proekologicznych przyjmuje się spełnienie przez zakład standardów emisyjnych

$$VE_i \leq E_{sti}$$

gdzie:

- i – indeks zanieczyszczenia,
- j – indeks urządzenia do redukcji zanieczyszczenia i ,
- E_i – końcowa emisja zanieczyszczenia i $E_i = E_{0i} - \sum_j U_{ij}$,
- E_{0i} – początkowa emisja zanieczyszczenia i w zakładzie,
- U_{ij} – poziom redukcji zanieczyszczenia i w urządzeniu j ,
- E_{sti} – przyjęty do obliczeń standard emisji dla zanieczyszczenia i .

Zadanie optymalizacyjne dla zakładu sprowadza się do minimalizacji kosztów redukcji (Ku) pozwalających na dotrzymanie założonych standardów emisyjnych krajowych lub UE

$$\sum_i \sum_j Ku_{ij} \Rightarrow \min$$

Dla danego zakładu koszt całkowity związany z redukcją emisji zanieczyszczeń powietrza składa się z sumy kosztów redukcji oraz końcowych opłat emisyjnych O_i (zł/jednostkę emisji zanieczyszczenia i) po zainstalowaniu urządzeń redukujących emisję

$$\sum_i (O_i E_i + \sum_j Ku_{ij}) \Rightarrow \min$$

Funkcja celu. W procesie podejmowania decyzji funkcja celu jest podstawowym kryterium oceny decyzji polegających na wyborze zdefiniowanych wartości zmiennych modelu. Przyjętą w modelu funkcją celu jest minimalizacja kosztów wytwarzania energii, przy czym analizie poddaje się przede wszystkim koszty związane z ochroną powietrza atmosferycznego, na które składają się: koszty dostaw węgla kamiennego, koszty redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych i koszty opłat ekologicznych. Dodatkowo uwzględnia się koszty zakupu pozwoleń na emisję. Matematyczny zapis zastosowanej w modelu funkcji celu przedstawiono poniżej.

- minimalizacja kosztów pozwalających na spełnienie dopuszczalnych poziomów emisji

$$\sum_t a_t (K_t^w + Ku_t^{SO_2} + Ku_t^{NO_2} + Ku_t^P) \Rightarrow \min$$

gdzie:

- K_t^w – koszt dostaw węgla kamiennego,
- $Ku_t^{SO_2}$ – koszt redukcji dwutlenku siarki,

- $Ku_t^{NO_2}$ – koszt redukcji tlenków azotu,
 Ku_t^P – koszt redukcji pyłu,
 a_t – czynnik dyskontujący,
 t – czas analizy.

Podczas korzystania z programu wszystkie obliczenia prowadzono z uwzględnieniem stopy dyskonta. Wyliczone zdyskontowane koszty i korzyści każdej z analizowanych technologii redukcji stanowią podstawowy parametr oceny danej technologii. Według tego parametru można dokonywać rankingu technologii redukcji.

Model umożliwia przeprowadzanie obliczeń modernizacji proekologicznej w dwojaki sposób. Zgodnie z pierwszym sposobem obliczenie kosztów redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych przeprowadza się bazując na szacunkowych jednostkowych nakładach inwestycyjnych i operacyjnych wybranych technologii redukcji. Jednostkowe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne stosuje się do obliczeń wstępnych tylko w przypadku odsiarczania spalin. Koszty odazotowania i odpylania spalin analizuje się w każdym przypadku, bazując na indywidualnej ocenie procesu spalania realizowanego w kotle dla lokalnych warunków elektrowni. Kosztów zamykających w przypadku szacunkowych obliczeń nie uwzględnia się.

Drugi sposób obliczeń pozwala na pełną ocenę wszystkich elementów kosztów. Podstawę obliczeń stanowią dane udostępnione przez krajowe elektrociepłownie, które wdrożyły instalacje redukcji zanieczyszczeń oraz dane przekazane przez producentów instalacji redukcji. Dane te zawarte są w bazie danych, która stanowi integralną część komputerowego systemu wspomagania decyzji.

Budowa programu wspomagania decyzji modernizacji proekologicznych

Program napisano w języku programowania FOX PRO wykorzystywanym do obsługi baz danych. Struktura programu umożliwia modernizację jego funkcji oraz dostosowanie do potrzeb użytkownika. Całość oprogramowania została napisana i uruchomiona przez autorkę niniejszego artykułu.

Dialog pomiędzy użytkownikiem a programem nie wymaga od użytkownika przygotowania informatycznego i odbywa się poprzez okna dialogowe. Program pozwala na:

- wykonanie kompletu obliczeń dla każdego rozwiązania,
- porównanie wyników obliczeń.

W wyniku obliczeń w zbiorze roboczym programu akumulowane są wielkości opisujące stan obliczanego układu. W celu prześledzenia zmian parametrów, program umożliwia wydrukowanie tabel kontrolnych dla dowolnie wybranego okresu czasu obliczeń.

Obecnie nie jest możliwa graficzna interpretacja wyników obliczeń. Jednakże dane w formie tabelarycznej można przetransponować do formatu czytanego przez arkusz kalkulacyjny EXCEL.

Poprawność opracowanego modelu stwierdzono na podstawie badań wpływu najistotniejszych parametrów modelu na wartość funkcji celu. Opracowano program –

test umożliwiający minimalizację czasu obliczeń oraz badanie stabilności układu (zależność rozwiązań od warunków początkowych) oraz czułości na zmiany parametrów modelu i scenariuszy badawczych.

Struktura programu

Program wspomagania decyzji dotyczących modernizacji proekologicznych zawiera następujące elementy:

- podprogram ekonomiczny,
- podprogram ocen efektywności proponowanych rozwiązań według przyjętych mierników,
- podprogram optymalizacji decyzji według przyjętej funkcji celu

oraz bazy danych zawierające:

- zbiór danych o krajowych węglach energetycznych,
- zbiór przepisów ochrony środowiska krajowych, obowiązujących w UE oraz przygotowywanych do wprowadzenia,
- zbiór technologii/metod obniżania emisji zanieczyszczeń,
- zbiór wskaźników umożliwiających ocenę stanu technicznego elementów instalacji.

Podprogram ekonomiczny

Pomimo technicznego charakteru niniejszej pracy, ze względu na ekonomiczną funkcję procesów modernizacyjnych konieczne stało się włączenie do metodyki modelowania elementów systemu ekonomicznego [12, 13]. W programie rozpatrzono dwa problemy:

- koszty modernizacji proekologicznych,
- wpływ modernizacji na kondycję finansową zakładu.

W celu oceny nakładów inwestycyjnych na realizację inwestycji proekologicznych w podsystemie nakładów finansowych wydzielono oddzielny blok realizujący tę funkcję.

W ramach tego bloku opracowano dwa podprogramy:

- podprogram rozliczeń wyniku finansowego,
- podprogram kosztów.

Warunki działalności elektrociepłowni w czasie modernizacji przedstawiono w formie syntetycznego raportu ekonomiczno-finansowego, która zawiera informacje obrazujące kondycję finansową firmy. Dodatkowo w raporcie tym zawarto informacje o ilości wyprodukowanej energii elektrycznej i/lub ciepłej, mocy dyspozycyjnej elektrowni, cenach mocy dyspozycyjnej i energii.

Warunki działalności zakładu przed rozpoczęciem inwestycji stanowią element zbioru danych wejściowych do programu.

W podprogramie kosztów uwzględniono dwie opcje, tj. koszty związane z bieżącą działalnością EC (koszt paliwa, koszt transportu paliwa, koszt opłat ekologicznych) oraz koszty modernizacji proekologicznych.

Podprogram ocen efektywności

W przyjętej metodzie obliczeń za mierniki oceny inwestycji przyjęto:

- skuteczność ekologiczną (stopień redukcji),
- zintegrowany efekt ekologiczny,
- wartość zaktualizowaną netto przychodów i kosztów,
- wskaźnik efektywności przedsięwzięcia ekologicznego jako stosunek zdyskontowanych przychodów i kosztów,
- analizę całkowitych kosztów budowy i eksploatacji instalacji,
- analizę zysku netto,
- okres zwrotu.

Wszystkie te mierniki powinny być obliczane dla każdej analizowanej technologii.

Należy podkreślić znaczenie możliwości wyboru oceny, która zapewnia analiza powyższych mierników. Zapewnienie możliwości wyboru jest bardzo ważnym elementem analizy często rozumianej jako pewien proces, którego wynik ma zdecydować o realizacji lub zaniechaniu realizacji określonego przedsięwzięcia. Otrzymane wyniki mogą służyć do porównania różnych rozwiązań i wyboru najkorzystniejszych pod względem ekologicznym w aktualnych warunkach finansowych przedsiębiorstwa. Gdy brak jest wielu rozwiązań alternatywą zawsze może być stan istniejący i ocena wykonywana w odniesieniu do tego stanu.

Warunkami ograniczającymi możliwość zastosowania danego rozwiązania modernizacyjnego jest szeroko pojęta ekonomika działania przedsiębiorstwa energetycznego.

Podprogram optymalizacji decyzji według przyjętej funkcji celu

Podprogram umożliwia wybór najlepszej możliwości z myślą o osiągnięciu celu lub realizacji zadania, co można uznać za optymalizowanie (minimalizowanie lub maksymalizowanie) pewnej obiektywnej funkcji kryterium, takiej jak nakłady na redukcję zanieczyszczeń [8, 11, 14]. W praktyce nakłady te są uzależnione od techniczno-ekonomicznych wskaźników, charakteryzujących przyjęty sposób redukcji zanieczyszczeń. W procesie optymalizacji tak dobiera się wskaźniki techniczno-ekonomiczne (w trybie wyboru wariantu technologii redukcji), aby koszt modernizacji był możliwie najmniejszy.

Dane do obliczeń

Zbiór warunków charakteryzujących działalność elektrociepłowni przed modernizacją można przedstawić ogólnie w postaci

$$Y = \{a, b, c, d, e, f, g, h, i\}$$

gdzie:

- a – ilość i skład spalin,
- b – charakterystyka ilościowo-jakościowa stosowanego paliwa,
- c – charakterystyka urządzenia kotłowego,

- d – uwarunkowania techniczne (aktualny stan maszyn i urządzeń),
- e – uwarunkowania lokalizacyjne,
- f – możliwość zbytu bądź składowania produktu z zastosowanej technologii oczyszczania spalin,
- g – posiadane środki finansowe (raport finansowo-księgowy),
- h – sposób finansowania inwestycji (kredyty, dotacje itp.),
- i – dopuszczalny poziom emisji (wybór scenariusza obliczeń).

Warunki a i b razem wskazują na konieczną wielkość instalacji oczyszczania spalin oraz jej pożądaną skuteczność. Relacja ta pozwala wskazać bądź wykluczyć konkretne działania modernizacyjne. Warunki a+b+c oraz d mogą wybór ten dalej zrelatywizować. Dodatkowe rozważenie warunku e umożliwia dalszą eliminację. I wreszcie warunki g+h mogą zdecydować o końcowym ukierunkowaniu przedsięwzięcia z określeniem jego zakresu i komfortu rozwiązań.

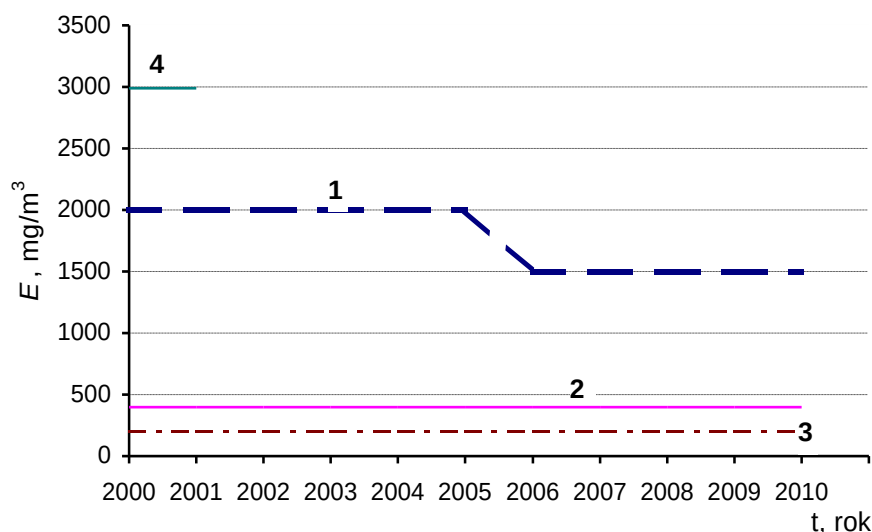
Minimalna ilość danych niezbędna do uruchomienia programu to około 200 informacji zgromadzonych zarówno w bazach danych, jak również w zbiorze danych wejściowych. Wśród wielkości wejściowych do obliczeń wiele z nich to dwu- i trójwymiarowe tablice.

Aktualne poziomy emisji analizowanych zanieczyszczeń stanowią dane wejściowe do modelu. Poziomy emisji po zastosowaniu paliwa innej jakości oblicza się na podstawie wzorów na emisję, uwzględniających wielkość zużycia i parametry jakościowe węgla oraz typ zainstalowanego kotła dla SO_2 , jak również wskaźniki emisji dla NO_2 i popiołu.

Przykład zastosowania modelu

Dotychczasowe wdrożenia opracowanego modelu mają charakter wstępny – były realizowane na jednym obiekcie i służyły głównie weryfikacji modelu. Zrealizowane przykładowe obliczenia optymalizacyjne dają obraz korzyści, jakie wynikają z zastosowania opracowanego modelu wspomagającego decyzje modernizacyjne. Poniżej przedstawiono przykład szczególnie ważnego procesu decyzyjnego, jakim jest dobór paliwa.

Analizie poddano kocioł typu OR-16. Eksploatacja kotła powoduje emisję dwutlenku siarki znacznie przekraczającą dopuszczalną normę. Emisję SO_2 z kotła, z uwzględnieniem obowiązujących w kraju dopuszczalnych emisji dla kotłów uruchomionych przed 28.03.1990 roku przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Emisja SO_2 z kotła typu OR-16: 1 – w Polsce (dopuszczalna), 2 – w Unii Europejskiej (dopuszczalna), 3 – w Unii Europejskiej (proponowana), 4 – aktualna, t – czas, E – emisja

Fig. 2. SO_2 emissions from boiler of OR-16 type: 1 – in Poland (admissible), 2 – in the European Union (admissible), 3 – in the European Union (proposed), 4 – current, t – time, E – emission

W pierwszym kroku program, analizując dane wejściowe charakteryzujące urządzenie kotłowe i stosowane paliwo, wskazuje konieczne stopnie redukcji emisji SO_2 w celu spełnienia norm dopuszczalnej emisji, zgodnie z wybranym scenariuszem obliczeń. Analizowano możliwości dostosowania się do krajowych norm emisji. Najtańszym dopuszczalnym rozwiązaniem jest optymalizacja doboru paliwa do procesu spalania. Obliczenia doboru paliwa przeprowadzono dla siedmiu rodzajów węgla kamiennych i ich mieszanek. Przy wyborze węgla do analizy wzięto pod uwagę: zróżnicowanie zawartości siarki w produkowanych sortymentach, cenę paliwa, odległość kopalni od elektrociepłowni. Ceny paliw i transportu paliw do analizy przyjęto jak w roku 2000.

Charakterystykę węgla przyjętych do analizy zamieszczono w tablicy 1. Wynika z niej wyraźna zależność ceny węgla dla celów energetycznych od jego parametrów jakościowych. Ceny węgla wzrastają wraz ze zwiększaniem się kaloryczności węgla oraz zmniejszaniem się zawartości popiołu i siarki. W tablicy 1 także podano przykład jak mieszanie kilku sortymentów handlowych może wpływać na koszt pozyskania paliwa.

Wstępne obliczenia wykazały, że do końca 2005 roku dla analizowanego kotła wystarczy spalać węgiel o zawartości siarki do 0,82% (węgle o nr 3, 4, 5, 6, 7 oraz mieszanka 8), aby sprostać wymogom ochrony środowiska. Znacznie większe wymagania, które wystąpią w okresie od 2006 do 2010 roku wymuszą na użytkownikach kotłów zastosowanie innych metod, zapewniających większą redukcję emisji SO_2 . Analiza stanu technicznego kotła, ocena trwałości indywidualnej, projektowej i dopuszczalnej, krytycznych jego elementów, wskazała na brak celowości technicznej

i ekonomicznej angażowania znacznych kosztów na modernizację proekologiczną. Z obliczeń przeprowadzonych przez autorkę wynika, że nakłady na modernizację analizowanego kotła są uzasadnione tylko wtedy, gdy możliwa jest dalsza eksploatacja elektrowni przez 10–15 lat. To założenie wymaga jednocześnie nakładów na zwiększenie sprawności urządzeń. W aktualnej sytuacji zakładu dopuszczalne rozwiązania to:

- zmiana paliwa (olejowe, gazowe),
- zakup pozwoleń na ponadnormatywną emisję,
- wyłączenie kotła.

Po ocenie efektu ekologicznego, będącego wynikiem określonego działania, konieczne jest dokonanie kalkulacji ich opłacalności.

Tablica 1. Przykładowe dane do obliczeń dla kotła typu OR-16

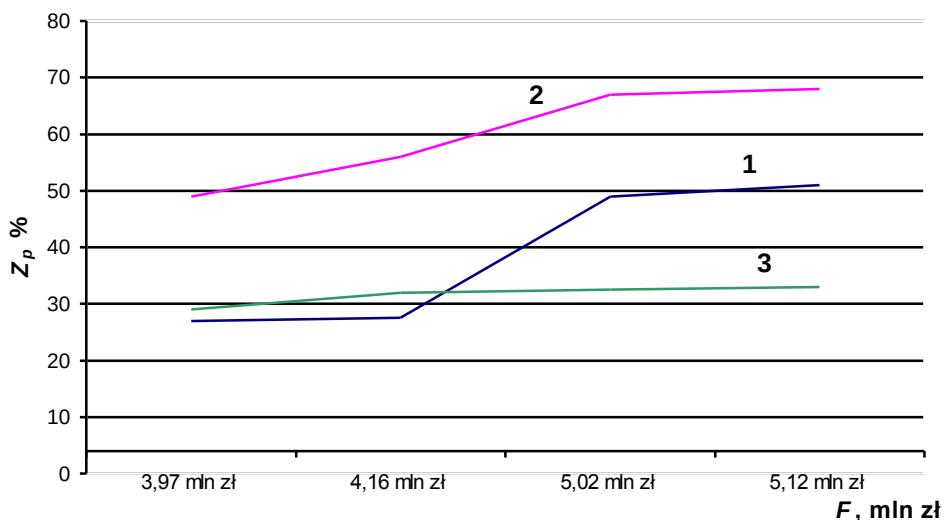
Wyszczególnienie	Jednostka	Paliwo bazowe 0	Paliwo 1 przerost	Paliwo 2 przerost	Paliwo 3 miał	Paliwo 4 miał	Paliwo 5 miał	Paliwo 8 Mieszanka 50% paliwo 3 50% paliwo 5	Paliwo 6 miał	Paliwo 7 miał wzbogacony
wartość opałowa	KJ/kg	17 500	17 580	19 800	20 330	22 600	24253	22 281	24 900	25 000
$S_{całk}$	%	–	1,02	0,99	0,69	0,77	0,76	0,73	0,56	0,81
S_{palna}	%	–	0,82	0,72	0,61	0,60	0,58	0,55	0,42	0,60
popiół	%	<36	23,22	20,86	25,4	19,80	17,30	21,34	14,71	9,76
zużycie	Mg/rok	30000	29259	25041	22037	21037	20413	20012	19911	19833
cena	zł/Mg	108,00	112,54	148,54	126,83	187,63	174,28	132,57	232,92	245,49
transport (z najbliższej kopalni)	zł/Mg	217	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17

Wartość minimum funkcji celu osiągnięto dla mieszanki węgla 8. Także dla węgla 3 i 5 funkcja celu znajduje się w pobliżu minimum około 4,2 mln zł.

Zmiany parametrów charakteryzujących paliwo w % bezwzględnych przedstawiono na rysunku 3. Poniżej, na rysunku 4, przedstawiono wpływ zmian cen węgla na zmianę cen wyprodukowanej energii. Obliczenia prowadzono przy założeniu, że cena paliwa stanowi około 50% kosztów produkcji energii elektrycznej. W analizie (tabl. 1) uwzględniono węgle różniące się około 55% ceną.

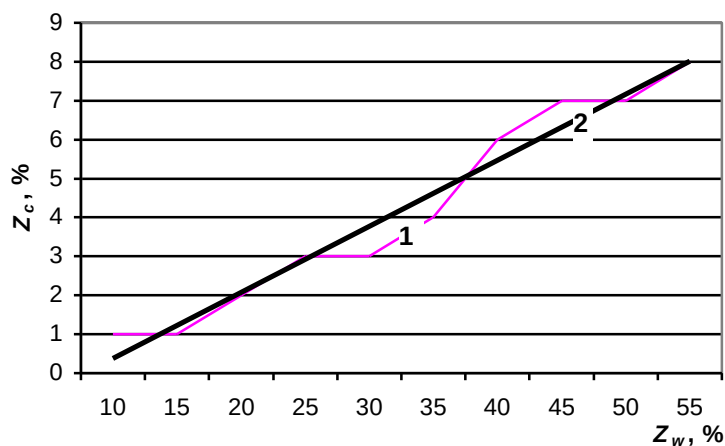
Koszty obciążenia środowiska naturalnego w przypadku zastosowania w procesie spalania w kotle OR-16 węgla 4, 6, 7 oraz mieszanki 8 przedstawiono na rysunku 5.

W analizie przedstawiono wybrane z tablic generowanych przez program i opracowane graficznie wartości parametrów, które mogą stanowić podstawę do podjęcia decyzji odnośnie do doboru paliwa do elektrociepłowni. W każdym z analizowanych przypadków dobór paliwa nie zagrażał płynności finansowej zakładu.



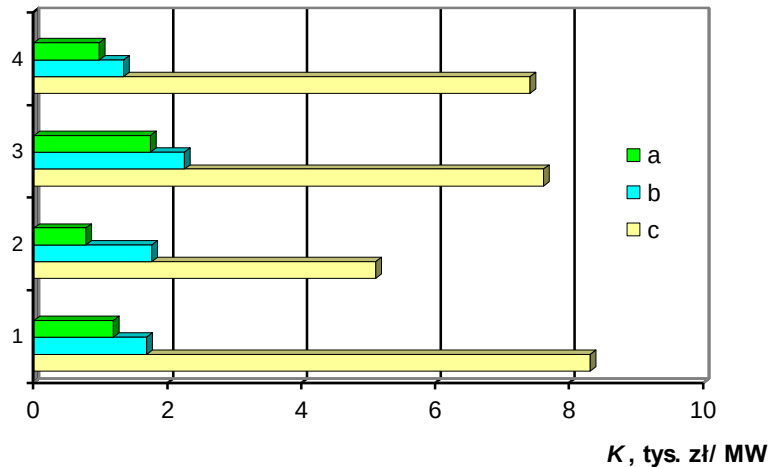
Rys. 3. Wpływ zmian podstawowych parametrów Z_p charakteryzujących paliwa na funkcję celu F modelu: 1 – S_{palna} , 2 – SO_2 , 3 – zużycie paliwa

Fig. 3. Impact of changes of basic parameters Z_p , characterizing fuels as regards objective function F of model: 1 – $S_{\text{combustible}}$, 2 – SO_2 , 3 – fuel consumption



Rys. 4. Wpływ zmian cen węgla Z_w na zmianę cen energii Z_c : 1 – wzrost cen energii, 2 – liniowy wzrost cen energii

Fig. 4. Influence of changes of coal prices Z_w on the change of energy prices Z_c : 1 – increase of energy prices, 2 – linear increase of energy prices



Rys. 5. Koszty obciążenia środowiska naturalnego K w przypadku zastosowania: 1 – paliwa 4, 2 – paliwa 6, 3 – paliwa 7, 4 – paliwa 8, a – pył, b – NO_2 , c – SO_2

Fig. 5. Costs of natural environment lading K in case of application: 1 – fuel 4, 2 – fuel 6, 3 – fuel 7, 4 – fuel 8, a – dust, b – NO_2 , c – SO_2

PODSUMOWANIE

Opracowany model stanowi odpowiednie narzędzie badawcze do wspomagania podejmowania decyzji dotyczących wyboru sposobów modernizacji proekologicznej, co uzasadniają własności modelu wynikające z przyjętych założeń oraz wyniki analiz uzyskane za pomocą tego narzędzia. Model umożliwia analizę wielu zagadnień związanych z modernizacją zakładu, a przede wszystkim:

- analizę prawodawstwa krajowego i obowiązującego w krajach Unii Europejskiej,
- analizę jakościową krajowych węgli kamiennych wraz z wyborem produkujących je grup kapitałowych, kopalń,
- analizę ekonomicznie efektywnych technologii redukcji zanieczyszczeń powietrza w elektrowniach,
- analizę wysokości koniecznych do poniesienia nakładów w celu dostosowania się do obecnych przepisów emisyjnych oraz norm wynikających ze zobowiązań międzynarodowych,
- analizę ekonomicznie efektywnego zakresu redukcji emisji zanieczyszczeń powietrza w zakładzie.

Własności modelu oraz otrzymane wyniki badań potwierdzają aplikacyjny charakter opracowanego programu komputerowego oraz możliwość wykorzystania go do optymalizacji procesu produkcji energii. Po przeprowadzeniu modernizacji proekologicznej program ten może stanowić stałe narzędzia kontroli osiąganego efektywności ekologicznej. Ma on charakter uniwersalny i może być wykorzystywany do podejmowania decyzji dotyczących modernizacji w różnych obszarach energetyki.

Podkreślić należy, że dokładność wyników uzyskanych z zastosowaniem modelu jest ściśle uzależniona od odwzorowania rzeczywistych warunków i potencjalnych możliwości realizacji inwestycji w elektrowni z uwzględnieniem wszelkich występujących ograniczeń, co wiąże się z koniecznością dostarczenia kilkuset danych do programu.

Literatura

1. Beberka K.: *Przegląd wybranych modeli komputerowych umożliwiających szacowanie i prognozowanie kosztów ochrony środowiska*. Ekonomia i Środowisko, Kraków 1995.
2. Biolik W.W.: *Ekometryczne modele wspomagania decyzji w przedsiębiorstwie*. Zeszyty Naukowe Akademii Ekonomicznej w Katowicach. Katowice 1993.
3. Bis Z., Gajewski W.: *Analiza porównawcza niskoemisyjnych technik spalania*. Gospodarka Paliwami i Energią 1997 nr 6.
4. Brzozowski W.: *Modelowanie i optymalizacja procesu eksploatacji elektrowni cieplnej*. Seria Monografie nr 35, Częstochowa, Wydaw. Politechniki Częstochowskiej 1995.
5. Bujko J., Kyzioł A., Majchrzak H., Szwada J., Witos T.: *Ochrona środowiska a proces planowania pracy elektrowni zawodowych na przykładzie Elektrowni Opole*. Energetyka 2000 nr 2.
6. Burchard-Dziubińska M.: *Strategiczne zarządzania środowiskowe w przedsiębiorstwie przemysłowym*. Ekonomia i Środowisko nr 1(16) Białystok 2000.
7. Chmielniak T.: *Stan rozwoju i znaczenie nowych technologii energetycznych dla modernizacji, rekonstrukcji oraz budowy instalacji wytwarzania energii elektrycznej i ciepła*. Gospodarka Paliwami i Energią, 1995 nr 11.
8. Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J.: *Metody numeryczne*. Warszawa, WNT 1992.
9. Kaproń F.: *Efektywność technologii energetycznych*. Rynek Energii 1998 nr 3.
10. Kożuchowski J.: *Informatyka, sterowanie i zarządzanie w elektroenergetyce*. Warszawa, PWN 1987.
11. Krawczyk S.: *Matematyczna analiza sytuacji decyzyjnych*. Warszawa, PWE 1990.
12. Krusztal J., Lorek E., Lorek D.: *Ocena efektywności ekonomicznej inwestycji proekologicznych*. Ekoinżynieria 1998 nr 11.
13. Kryk B.: *Proekologiczne zarządzanie firmą*. Problemy Ekologii 1999 nr 1.
14. Legh W.E., Doherty M.E.: *Decision support and expert systems*. Cincinnati, Ohio, South-West Publ. Co. 1996.
15. Malik K., Parvi R.: *Potrzeby informatyczne w ekologizacji zarządzania przedsiębiorstwem*. Czysta Produkcja w Polsce 1999 nr 2.
16. Piontek F.: *Środowisko przyrodnicze a strategia gospodarowania*. Problemy Ekologii 1999 nr 2.
17. Sroczan E.M.: *Zarządzanie współpracą elektrowni w systemie elektroenergetycznym*. Rynek Energii 1998 nr 2.

Recenzent: dr inż. Krzysztof Stańczyk

Robert Siata

BADANIE PRZYPOWIERZCHNIOWYCH WARSTW PODŁOŻA METODĄ SEJSMICZNĄ

Streszczenie

Określenie budowy i własności fizycznych ośrodka skalnego ma duże znaczenie dla:

- budownictwa podziemnego i lądowego,
- prognozy zagrożeń naturalnych,
- rozpoznania budowy geologicznej,
- modelowania analitycznego.

Podstawową metodą wyznaczania płytkich granic litologicznych i strefy małych prędkości fal sejsmicznych jest metoda sejsmiczna, której wariantem jest metoda płytkiej refrakcji. Może ona służyć do wyznaczania granic litologicznych do głębokości 30-50 m w zależności od lokalnych warunków geologicznych.

Określane tą metodą prędkości mogą być również wykorzystywane do klasyfikacji masywu skalnego z zastosowaniem skali opracowanych między innymi przez Bartona, Bieniawskiego, Bestyńskiego (dla fliszu karpackiego).

Warstwy leżące najpłycej utworzone są najczęściej z osadów trzecio i czwartorzędowych oraz utworów zwietrzałych. Warstwę, którą charakteryzują najniższe wartości prędkości fal sejsmicznych, tzw. strefę małych prędkości (SMP) tworzą grunty nieskonsolidowane lub utwory zwietrzałe. Prędkości te nie przekraczają 1000 m/s, podczas gdy prędkości fal sejsmicznych w twardym podłożu są większe od 1500 m/s (2000 m/s). Dodatkowym czynnikiem wpływającym na prędkości fal sejsmicznych w ośrodku jest poziom zwierciadła wód gruntowych.

SMP charakteryzuje się wzrostem prędkości fal wraz z głębokością, lecz może również charakteryzować się jedną wartością prędkości. Drugi przypadek występuje, gdy na przykład w pobliżu znajdują się warstwy piasków.

Prędkości fal sejsmicznych w warstwach zalegających nad twardym podłożem określono metodą płytkiej refrakcji wzdłuż profili sejsmicznych w następujących rejonach:

- Jaworzno, rejon zalewu Łęg,
- OG KWK Halemba, przy szybie Grunwald.
- Kopalnia Doświadczalna Barbara, przy szybie Barbara.

Do interpretacji uzyskanego materiału pomiarowego wykorzystano analizę hodografów zbieżnych. Wyznaczono prędkości i miąższości poszczególnych warstw metodą średnich arytmetycznych. Tak wyznaczony model ośrodka posłużył jako model startowy do tomograficznego odwzorowania na podstawie czasów pierwszych wejść fali sejsmicznej. Wyniki przedstawiono w postaci dwuwymiarowych map prędkości (rys. 1a, 2a, 3a).

W miejscach wykonywania pomiarów sejsmicznych stwierdzono dużą zmienność prędkości propagacji podłużnej fali sejsmicznej w utworach zaliczanych do nadkładu czwartorzędowego w zakresie od 300 do 1800 m/s. Najniższe wartości występowały w strefie przypowierzchniowej.

Zmian prędkości nie można w prosty sposób korelować z wykształceniem geologicznym utworów. Jest to spowodowane faktem, że utwory czwartorzędowe wykształcone są głównie w postaci piasków, żwirów, pyłów, glin oraz rumoszu, w przypadku których prędkości fal sprężystych związane są głównie ze stopniem zagęszczenia (gęstością) i zawodnieniem. Z tych względów płytkie granice sejsmiczne nie pokrywają się z granicami litologicznymi, a zakres zmienności prędkości fal dla podobnych utworów jest bardzo duży. Można stwierdzić, że dla piasków prędkości zmieniają się od około 300 m/s (suche

i zalegające bezpośrednio na powierzchni) do około 1500 m/s dla utworów zawodnionych. Utwory identyfikowane ze stropem karbonu zaznaczają się w postaci granicy refrakcyjnej o prędkości w przedziale 1800-2200 m/s.

Testing of foundation layers, adjacent to the surface, by means of the seismic method

Abstract

The determination of the structure and physical properties of the rock medium has great significance for:

- underground building and civil engineering,
- natural hazard prediction,
- identification of geological structure,
- analytic modelling.

The basic method of determination of shallow lithological limit and zone of small seismic wave velocity is the seismic method, a variant of which is the shallow refraction method. It can serve the determination of lithological limits up to the depth of 30-50 m, depending on local geological conditions.

The velocities determined by means of this method can be also applied for rock mass classification with the use of scales, developed among others by Barton, Bieniawski, Bestyński (for the Carpathian flysch).

The layers localized close to the surface are most frequently formed of Tertiary and Quarternary deposits and weathered formations. The layer, characterized by the lowest values of seismic wave velocities, the so-called low velocity zone (SMP) form non-consolidated grounds and weathered formations. These velocities do not exceed 1000 m/s, whereas the velocities of seismic waves in hard foundations are bigger than 1500 m/s (2000 m/s). An additional factor influencing the velocities of seismic waves in the medium is the underground water level.

A low velocity zone is characterized by the increase of wave velocity along with the depth, but it can be also characterized by one velocity value. The second case takes place, when for example, sandstone layers occur in the vicinity.

The velocities of seismic waves in layers occurring above the hard foundation were determined by the method of shallow, refraction on seismic profiles in the following regions:

- Jaworzno, the Łęg water reservoir region,
- Mining area of Halemba mine, at Grunwald shaft,
- Experimental Mine "Barbara" at Barbara shaft.

For the interpretation of the obtained measuring material the convergent hodograph analysis was used. The velocities and thickness of individual layers were determined by means of the arithmetic average method. The medium model, determined in such a way, served as start model for tomographic mapping on the basis of times of first seismic wave entries. The results were presented in the form of two-dimensional velocity maps.

In sites of seismic measuring execution one has stated big variability of velocity propagation of longitudinal seismic wave in formations classified among Quarternary overburden within the range from 300 to 1800 m/s. The lowest values occurred in the zone, adjacent to the surface.

Velocity changes cannot be in a simple way correlated with the structure of geological formations. This is caused by the fact that Quarternary formations occur mainly in the form of sands, gravels, dusts, clays, and rubble, in case of which the velocities of elastic waves are connected first of all with the consolidation (density) degree and water content. For these reasons the shallow seismic limits do not coincide with lithological limits, and the range of wave velocity variability for similar formations is very high. One can state that for sands the velocities change from about 300 m/s (dry and occurring directly on the surface) to about 1500 m/s for watered formations. Formations identified with the Carboniferous roof appear in the form of refraction limit with velocity within the interval 1800-2200 m/s.

1. WSTĘP

Poznanie budowy ośrodka skalnego, jego jakości i wytrzymałości ma duże znaczenie dla:

- budownictwa podziemnego i lądowego,
- określenia miąższości strefy małych prędkości,
- prognozy zagrożeń naturalnych,
- rozpoznania budowy geologicznej,
- wyznaczania głębokości zwierciadła wód gruntowych,
- modelowania analitycznego.

Podstawową metodą stosowaną do wyznaczania granic litologicznych na małych głębokościach i strefy małych prędkości jest metoda sejsmiczna. Granice litologiczne do głębokości 30÷50 m, w zależności od lokalnych warunków geologicznych, wyznaczyć można metodą płytkiej refrakcji, która stanowi jeden z wariantów metody sejsmicznej. Metodą tą możliwe jest także wyznaczenie parametrów dynamicznych (modułu sprężystości postaciowej i objętościowej, współczynnika Poissona, współczynnika dobroci) na podstawie zmierzonych prędkości propagacji podłużnych i poprzecznych fal sprężystych i znanej gęstości ośrodka.

Zaletą wyznaczania parametrów dynamicznych skał jest możliwość ich wyznaczania in situ w warunkach naprężeniowo-deformacyjnych, bez naruszania struktury skał. Wadą jest mniejsza dokładność pomiarowa (w porównaniu, np. z metodą ultradźwiękową) oraz całościowe traktowanie większej objętości masywu, bez możliwości wydzielenia mniejszych fragmentów (przy prędkości fali sejsmicznej 4000 m/s i częstotliwości fali 200 Hz rozdzielczość przestrzenna metody wynosi 5÷10 m).

Wyznaczone prędkości mogą być wykorzystywane również do klasyfikacji masywu skalnego na podstawie skał opracowanych, między innymi przez Bartona, Bieniawskiego, Bestyńskiego (dla fliszu karpackiego) [2, 3].

2. PODSTAWY FIZYCZNE PROPAGACJI FAL SEJSMICZNYCH W OŚRODKU SKALNYM

2.1. Kinematyczne parametry propagacji fal sejsmicznych

Podstawowym założeniem przy wyznaczaniu własności fizycznych jest fakt, że zachowuje się on sprężystość w zakresie odkształceń wywołanych propagacją fal sprężystych. Z rozwiązania równania różniczkowego dla fal podłużnych i poprzecznych propagujących w ośrodku sprężystym otrzymuje się ich prędkości wyrażone zależnościami [1, 4, 5]:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 4G/3}{\rho}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

gdzie:

V_P – prędkość fali podłużnej,

V_S – prędkość fali poprzecznej,

λ – moduł sprężystości objętościowej,

G – moduł sprężystości postaciowej,

ρ – gęstość ośrodka.

Fale podłużne w ośrodku izotropowym są falami kulistymi, ruch ich polega na zmianie objętości. Fale poprzeczne polegają na zmianie postaci cząsteczek, ich ruch odbywa się w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się drgań. Fale poprzeczne nie propagują w płynach ($G = 0$) [1].

Prędkości fal podłużnych i poprzecznych ujęte są zależnością

$$V_P = V_S \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$

W powyższym wzorze stała Poissona ν zmienia się w zakresie od 0 do 0,5, z czego wynika, że prędkość fal podłużnych jest zawsze większa od poprzecznych. Dla typowych skał krystalicznych $\nu=0,25$, co daje stosunek prędkości $k = V_P/V_S = 1,73$. Dla utworów luźnych stosunek ten zmienia się w zakresie od 3 do 12.

Przy znajomości prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych można wyznaczyć dynamiczne stałe sprężyste z następujących zależności [1, 5, 6]:

$$\lambda_d = \rho \left(V_P^2 - \frac{4V_S^2}{3} \right)$$

$$G_d = \rho V_S^2$$

$$E_d = \rho V_S^2 \frac{3k^2 - 4}{k^2 - 1}$$

$$\nu_d = 0,5 \frac{k^2 - 2}{k^2 - 1}$$

gdzie:

V_P – prędkość fali podłużnej,

V_S – prędkość fali poprzecznej,

$k = V_P/V_S$,

λ_d – dynamiczny moduł sprężystości objętościowej,

G_d – dynamiczny moduł sprężystości postaciowej,
 E_d – dynamiczny moduł sprężystości,
 ν_d – dynamiczny współczynnik Poissona,
 ρ – gęstość ośrodka.

2.2. Dynamiczne parametry propagacji fal sejsmicznych

Fale sejsmiczne, podczas rozchodzenia się, w ośrodku lepko-sprężystym ulegają tłumieniu i wykazują efekt dyspersji. Jest to wynikiem lepkości ośrodka. Wielkość amplitudy przemieszczeń A fali sejsmicznej w odległości r od źródła można przedstawić wzorem [1]

$$A = A_0 \frac{e^{-\alpha(f) \cdot r}}{r^\beta}$$

gdzie:

A_0 – amplituda fali w źródle,
 $\alpha(f)$ – współczynnik tłumienia, zależny od częstotliwości drgań,
 r – odległość.

Współczynnik dobroci Q dla określonej częstotliwości drgań f definiuje się jako

$$Q = \frac{\pi f}{\alpha V}$$

gdzie:

Q – współczynnik dobroci,
 f – częstotliwość,
 V – prędkość fali,
 α – współczynnik tłumienia.

Współczynnik dobroci Q charakteryzuje ośrodek dla określonej częstotliwości fal (pasma częstotliwości). Współczynnik dobroci bądź tłumienia w ośrodku jest bardziej czuły (od prędkości) na zmiany własności fizykomechanicznych ośrodka, a w szczególności na obecność spękań.

3. PŁYTKIE BADANIA REFRAKCYJNE

Warstwy najpłycej zalegające w górotworze najczęściej składają się z osadów trzecio i czwartorzędowych oraz utworów zwietrzałych. Warstwą o najniższych wartościach prędkości fal sejsmicznych jest tzw. strefa małych prędkości (SMP), którą tworzą grunty nieskonsolidowane lub utwory zwietrzałe. Strefa ta charakteryzuje się małymi wartościami prędkości poniżej 1000 m/s, podczas gdy twarde podłoże charakteryzuje się prędkościami większymi od 1500 m/s (2000 m/s). Dodatkowym czynnikiem wpływającym na prędkości fal w ośrodku jest poziom zwierciadła wód gruntowych. SMP charakteryzuje się wzrostem prędkości wraz z głębokością, lecz

może również charakteryzować się jedną wartością prędkości. Drugi przypadek występuje, na przykład przy warstwach piasków.

4. SEJSMICZNE POMIARY POŁOWE DLA ROZPOZNANIA BUDOWY GEOLOGICZNEJ WARSTW PRZYPOWIERZCHNIOWYCH

4.1. Metoda pomiaru

Do określenia prędkości fal sejsmicznych w warstwach zalegających nad twardym podłożu zastosowano metodę płytkiej refrakcji. Na profilach sejsmicznych rozmieszczano 24 geofony w odległościach $3\div 5$ m. Falę sejsmiczną wzbudzano po obydwu stronach profilu w odległościach $5\div 10$ m oraz w środku rozstawu. Profile sejsmiczne zostały wykonane w następujących rejonach:

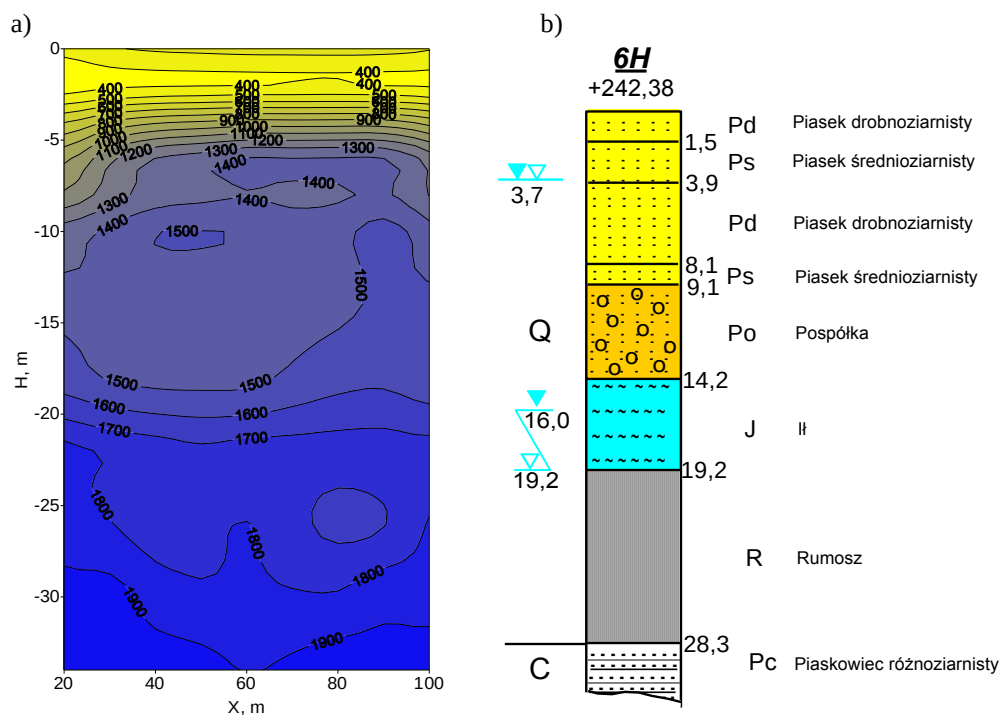
- Jaworzno, przy zalewie Łęg,
- OG KWK Halemba, przy szybie Grunwald,
- KD Barbara, przy szybie Barbara.

Metoda ta umożliwia uzyskiwanie hodografów zbieżnych.

4.2. Interpretacja

Do interpretacji materiału pomiarowego wykorzystano – w czasie badań hodografy zbieżne. Na ich podstawie określono prędkości i miąższości poszczególnych warstw metodą średnich arytmetycznych. Metoda ta ma szerokie zastosowanie w interpretacji hodografów związanych z granicami refrakcyjnymi, których promień krzywizny jest znacznie większy od głębokości występowania granicy sejsmicznej. Stosując tę metodę pomija się jednak zjawisko przenikania fal i nie może być ona stosowana w przypadkach gwałtownych zmian prędkości granicznych wzdłuż profilu sejsmicznego.

Tak wyznaczony rozkład prędkości posłużył jako model startowy do tomograficznego odwzorowania pola prędkości na podstawie czasów pierwszych wejść fali sejsmicznej. Wyniki przedstawiono w postaci dwuwymiarowych map prędkości (rys. 1a, 2a, 3a).



Rys. 1. Badanie sejsmiczne w rejonie otworu 6H w kopalni „Jaworzno”: a – rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej; b – profil litologiczny otworu; Pd – piasek drobnoziarnisty, Ps – piasek średnioziarnisty, Po – pospółka, R – rumosz, Pc – piaskowiec różnoziarnisty

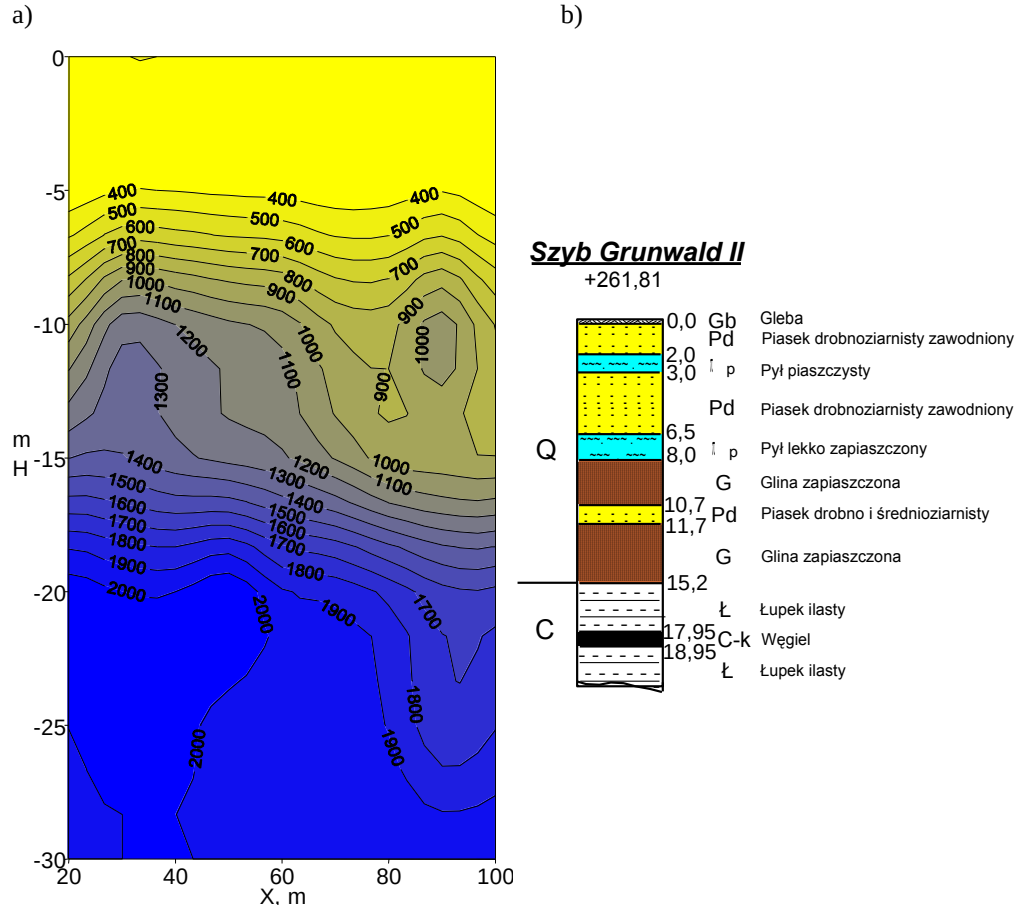
Fig. 1. Seismic test in the area of 6H borehole, “Jaworzno” Colliery: a – distribution of longitudinal seismic wave velocity, b – borehole lithological profile, Pd – fine-grained sand, Ps – moderately grained sand, Po – sand-gravel aggregate, R – rubble; Pc – sandstone of different granularity

4.3. Wyniki płytkich badań refrakcyjnych

Profil sejsmiczny w rejonie miasta Jaworzna

W rejonie Jaworzna wybrany do badań profil sejsmiczny znajdował się w pradolinie Przemszy, gdzie miąższość utworów czwartorzędu wynosi około 30 m.

Prędkości podłużnej fali sejsmicznej zarejestrowane wzdłuż profilu zmieniały się od 400 do 1900 m/s. Do głębokości około 5 m wartości prędkości były niższe od 1000 m/s. Później następował dalszy przyrost wartości do około 1800–1900 m/s na głębokości 30 m, gdzie występuje strop utworów karbońskich. Należy zauważyć, że niskie wartości prędkości w warstwie przypowierzchniowej związane były z luźnymi piaskami. Wzrost prędkości wraz z głębokością związany był natomiast z zagęszczeniem utworów i ich zawodnieniem. Dla przedziału głębokości, gdzie występuje rumosz, prędkości zmieniają się w przedziale 1700÷1800 m/s. Strop karbonu, wykształcony w postaci piaskowca, zaznaczał się jako granica refrakcyjna o prędkości 1900 m/s.

Profil sejsmiczny w OG Halemba (przy szybie Grunwald)

Rys. 2. Badanie sejsmiczne w rejonie szybu Grunwald w kopalni „Halemba”: a – rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej; b – profil litologiczny szybu Grunwald; Gb – gleba, Pd – piasek drobnoziarnisty zawodniony, π – pył lekko zapiaszczony G – glina zapiaszczona, Ł – łupek ilasty, C-k – węgiel

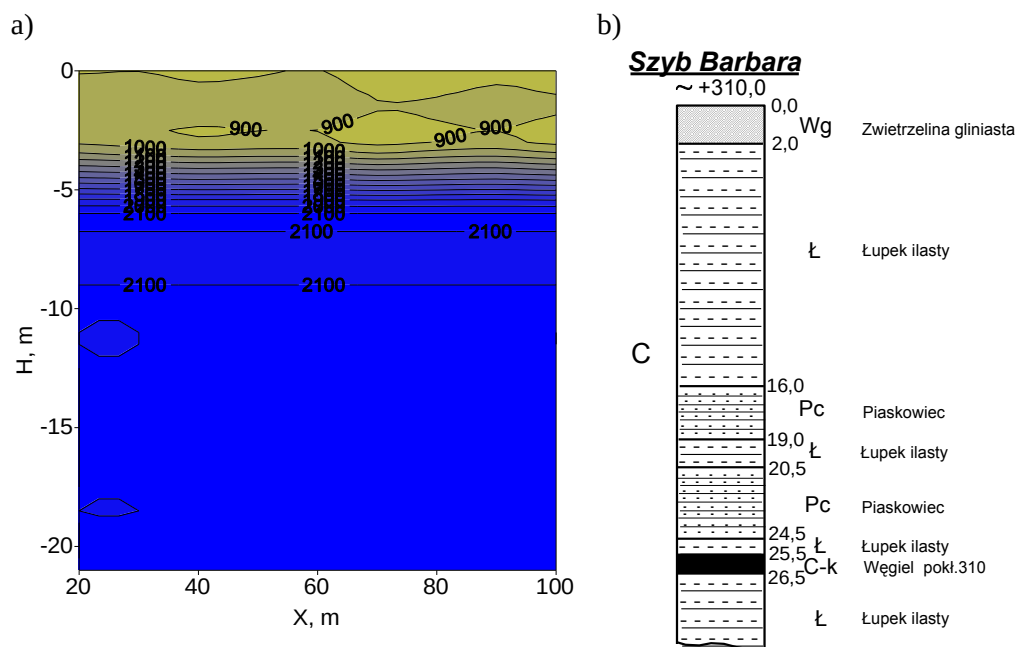
Fig. 2. Seismic test in the area of “Grunwald” shaft, “Halemba” Colliery: a – lithological profile of “Grunwald” shaft; b – distribution of longitudinal seismic wave velocity, Gb – soil; Pd – watered fine-grained sand, π – faintly sandy dust, G – sandy clay, Ł – mudstone; C-k – coal

Zarejestrowane podczas badań wartości prędkości zmieniały się w przedziale od 300 do 2000 m/s. Prędkości w zakresie 300÷900 m/s należy korelować z piaskami i pyłami piaszczystymi, które w profilu szybu Grunwald II występują do głębokości 8 m. Następnie w profilu występują gliny zapiaszczone, którym należy przypisać prędkości w przedziale 900÷1500 m/s. Od głębokości około 15 do 20 m prędkości stopniowo wzrastały do 2000 m/s. W przekroju geologicznym temu przedziałowi

odpowiada rumosz zwietrzelinowy. Na głębokości około 20 m występują już karbońskie łupki ilaste, którym przypisać należy prędkość fali sejsmicznej 2000 m/s.

Profil sejsmiczny w rejonie KD Barbara

Profil sejsmiczny usytuowany był w sąsiedztwie szybu Barbara Kopalni Doświadczalnej Barbara (około 100 m na południe). W rejonie tym utwory karbońskie występują bezpośrednio na powierzchni, wykształcone są w postaci łupków i piaskowców.



Rys. 3. Badanie sejsmiczne w rejonie szybu Barbara Kopalni Doświadczalnej Barbara: a – rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej; b – profil litologiczny szybu Barbara; Wg – zwietrzelina gliniasta, Ł – łupek ilasty, Pc – piaskowiec, C-k – węgiel pokład 510

Fig. 3. Seismic test in the area of “Barbara” shaft of Experimental Mine “Barbara”: a – distribution of longitudinal seismic wave velocity, b – lithological profile of “Barbara” shaft, Wg – argillaceous eluvium, Ł – mudstone, Pc – sadsone, C-k – coal, seam 510

Zarejestrowane podczas badań wartości prędkości zmieniały się w przedziale 900÷2100 m/s. Granica refrakcyjna o prędkości 2000 m/s znajdowała się na głębokości około 5 m i była związana z skałami karbońskimi wykształconymi w postaci łupków. Wyżej występowała warstwa zwietrzliny (2 m według profilu z szybu Barbara) i prawdopodobnie mocno spękane łupki.

5. PODSUMOWANIE

W miejscach wykonywania pomiarów sejsmicznych stwierdzono dużą zmienność prędkości propagacji podłużnej fali sejsmicznej, w zakresie od 300 m/s do 1800 m/s, w utworach zaliczanych do nadkładu czwartorzędowego. Najniższe wartości wystąpiły w strefie przypowierzchniowej. Stwierdzono także, że zmian prędkości nie można w prosty sposób korelować z wykształceniem geologicznym utworów. Jest to spowodowane faktem, że utwory czwartorzędu wykształcone są głównie w postaci piasków, żwirów, pyłów, glin oraz rumoszu, w przypadku których prędkości fal sprężystych związane są głównie ze stopniem zagęszczenia (gęstością) i zawodnieniem. Z tych względów płytkie granice sejsmiczne nie pokrywają się z granicami litologicznymi, a zakres zmienności prędkości fal dla podobnych utworów jest bardzo duży. Można stwierdzić, że dla piasków prędkości zmieniają się od około 300 m/s (suche i zalegające bezpośrednio na powierzchni) do około 1500 m/s dla utworów zawodnionych. Utwory identyfikowane ze stropem karbonu zaznaczają się w postaci granicy refrakcyjnej o prędkości w przedziale 1800÷2200 m/s. Wyniki pomiarów wskazują jednak na ich dużą przydatność dla budownictwa. Pozwalają bowiem na określenie miąższości warstwy utworów luźnych i słabo skonsolidowanych oraz na określenie granicy zalegania twardego podłoża. Pomiar sejsmiczny umożliwia również określenie stref zawodnionych i występowania wód gruntowych, co ma duże znaczenie w przypadku przygotowania podłoża do posadowienia fundamentów.

Literatura

1. Aki K, Richards P.G.: *Quantitative seismology*. San Francisco, W.H. Freeman and Company 1980 Vol. I, II.
2. Bieniawski Z.T.: *Engineering rock mass classification*, New York, Wiley 1989.
3. Barton N.: *General report Concerning Some 20th Century Lessons and 21st Century Challenges in Applied Rock Mechanics, Safety and Control of the Environment*. Paris 1999.
4. Dubiński J.: *Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górniczymi w kopalniach węgla kamiennego*. Prace Naukowe GIG. Seria dodatkowa 1989.
5. Fajkiewicz Z. (red.): *Zarys geofizyki stosowanej*. Warszawa, Wydawnictwo Geologiczne 1972.
6. Gustkiewicz J. (red.): *Własności fizyczne wybranych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. Kraków, IGSMiE PAN 1999.
7. K. Stec (red.): *Geologiczne przyczyny wzmacniania drgań w nadkładzie serii węglowej na obszarze GZW*. Katowice, Wydaw. GIG 2001.

Recenzent: dr inż. Grzegorz Mutke

Jan Hankus

ZINTEGROWANE METODY BADAŃ I OCENY STANU BEZPIECZEŃSTWA LIN STALOWYCH

Streszczenie

Liny stalowe są istotnymi elementami nośnymi urządzeń wyciągowych, kolei linowych, wyciągów narciarskich i urządzeń dźwigowych. Pracują najczęściej w trudnych warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych, w środowisku korozyjnym itp. Z tego też powodu ulegają znacznie szybciej zużyciu od innych elementów maszyn i urządzeń. Ich stan techniczny ma decydujący wpływ na ciągłą bezawaryjną pracę, a przede wszystkim na bezpieczeństwo ludzi korzystających z urządzeń lub obsługujących urządzenia. Dlatego też bardzo ważnym zagadnieniem są metody badań i oceny stanu bezpieczeństwa pracujących liny stalowych. Biorąc pod uwagę teorię niezawodności, pracujące liny są elementami nieodnawialnymi i w miarę upływu czasu eksploatacji wystąpić mogą różne zagrożenia.

W artykule podano charakterystykę możliwych zagrożeń i metody ich identyfikacji. Przedstawiono wizualną i magnetyczną metodę badań lin wyciągowych w warunkach ruchowych. Pomiar i badania na tej samej linie i w różnych miejscach są powtarzane w określonych odstępach czasu (na przykład co tydzień, miesiąc, kwartał), przez co gromadzone są powiększające się zbiory wyników wymagające obiektywnej analizy i wiarygodnej oceny. W pracy przedstawiono opracowane w GIG probabilistyczne metody analizy wyników wizualnych badań lin, w których wykorzystano typowe programy komputerowe. Metody pozwalają po każdym przeprowadzonym badaniu w kopalni, porównywać kolejne serie wyników badań, określać zmiany w funkcji czasu pojedynczych parametrów, a także oceniać osłabienie pracującej liny wywołane zmianami właściwości kilku parametrów.

Prowadzone są również badania magnetyczne, których celem jest wykazanie miejscowych zewnętrznych i wewnętrznych pęknięć drutów, a także ubytków przekroju liny wywołanego korozją lub starciem drutów. Wyniki badań magnetycznych rejestrowane są analogowo na taśmie termicznej i cyfrowo na karcie PCMCIA, co pozwala na komputerowe ich opracowanie. Metody badań wizualnych i magnetycznych uzupełniają się wzajemnie, dając pełny obraz stanu zużycia liny. Wdrożenie bardziej obiektywnych analitycznych metod analizy osłabienia lin, z wykorzystaniem techniki komputerowej, przyczyni się do lepszego wykorzystania lin, przy zachowaniu wymaganego poziomu bezpieczeństwa.

Integrated testing and assessment methods of the safety state of steel ropes

Abstract

Steel ropes constitute essential bearing elements of winding plants, cable railways, ski lifts and hoisting cranes. They work most often in difficult conditions of serially changeable loadings, in corrosive environment, etc. Therefore they are considerably more promptly subject to wear than other elements of machines and devices. Their technical state has decisive impact on continuous failure-free work, and first of all on the safety of people taking advantage of devices, or operating those devices. Therefore a very important problem constitute testing and assessment methods relating to the safety state of steel ropes being in operation. Taking into consideration the reliability theory, the ropes in operation are non-renewable elements, and after the lapse of several years of exploitation different hazards may occur.

The article presents the characterization of possible hazards and methods of their identification. The visual and magnetic methods of testing of hoisting ropes in operational conditions were shown. The measurements and tests regarding the same rope and different sites are repeated at determined time intervals, for example every day, month, quarter, causing the collection of increasing sets of results, which require objective analysis and reliable assessment. The article presents the developed at the Central Mining Institute probabilistic methods of analysis of visual test results of ropes, where typical computer programs were used. These methods allow to compare subsequent series of test results after each test carried out in the mine, to determine changes in the function of time of individual parameters, as well as to assess the weakening of ropes being in operation, caused by changes of properties of several parameters.

There are also conducted magnetic tests, which aim at the indication of external and internal cracks of wires, as well as losses of rope cross-cut caused by wire corrosion or abrasion. The results of magnetic tests are recorded analogously on a thermal tape and digitally on a PCMCIA card, what allows their computer-based elaboration. The methods of visual and magnetic tests complement one another, giving a full picture of the rope wear state. The implementation of more objective analytical analysis methods of rope weakening, with the use of computer technique, will contribute to better rope exploitation, maintaining the required safety level.

1. WSTĘP

Liny stalowe są istotnymi elementami nośnymi urządzeń wyciągowych, kolei linowych, wyciągów narciarskich, leśnych urządzeń transportowych i urządzeń dźwigowych. Pracują najczęściej w trudnych warunkach obciążeń cyklicznie zmiennych, w środowisku korozyjnym itp. Z tego też powodu ulegają znacznie szybciej zużyciu od innych elementów maszyn i urządzeń. Ich stan techniczny ma decydujący wpływ na ciągłą bezawaryjną pracę, a przede wszystkim na bezpieczeństwo ludzi biorących udział w procesach produkcyjnych lub obsługujących urządzenia. Z uwagi na teorię niezawodności, pracujące liny są elementami nieodnawialnymi i w miarę upływu czasu eksploatacji wystąpić mogą różne zagrożenia. Dlatego też bardzo ważnym zagadnieniem są badania stanu bezpieczeństwa liny przy wykorzystaniu bardziej obiektywnych analitycznych metod oceny ich wyników. Jest to szczególnie istotne w przypadku wdrażania nowych lub udoskonalonych konstrukcji lin, dla których nie ma jeszcze ściśle określonych kryteriów dopuszczalnego zużycia w warunkach ruchowych.

2. CHARAKTERYSTYKA ZAGROŻEŃ I METODY ICH IDENTYFIKACJI

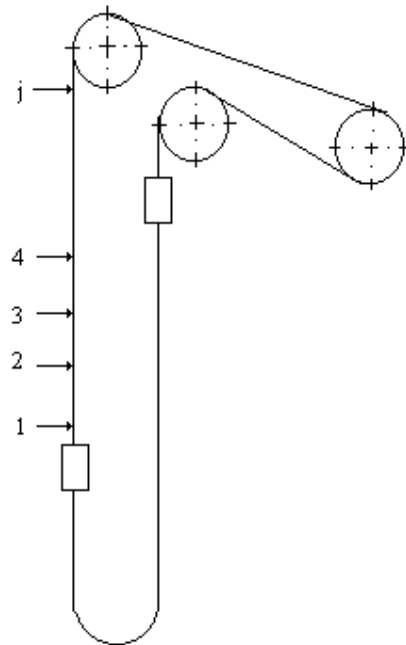
Zagrożeniem jest każdy czynnik mogący spowodować straty materialne, utratę zdrowia lub życia. W określonych sytuacjach może występować jedno lub więcej zagrożeń. Wyłączając przypadki katastroficzne, które zdarzają się bardzo rzadko, zmniejszenie lub wyeliminowanie zagrożenia bezpieczeństwa lin stalowych, pracujących w różnych warunkach, wywołane mogą być przez różne czynniki postępującego zużycia (osłabienia). Ich identyfikacja i wartościowanie wymaga użycia różnych metod badań i różnych metod ilościowej oceny. Ogólną charakterystykę zagrożeń i metody ich identyfikacji podano w tablicy 1.

Tablica 1. Charakterystyka zagrożeń bezpieczeństwa pracy lin stalowych i metody ich identyfikacji

Określenie zagrożenia	Metody identyfikacji i badań
pękanie zmęczeniowe drutów zewnętrznych w części liny przeginanej na tarczy pędnej, bębnie i kołach linowych	badania wizualne i magnetyczne w czasie ruchu liny z góry w dół i zatrzymaniu liny
skupienia pęknięć na krótkim odcinku liny	badania wizualne przy zatrzymanej linie
pęknięcia wewnętrznych drutów	badania magnetyczne i wizualne, częściowe rozkręcanie liny
pękanie drutów w zawiesiach	przesuwanie liny w zawiesiu
starcie drutów zewnętrznych	badania wizualne, wycinanie drutów zewnętrznych, badania magnetyczne
korozja drutów	badania wizualne, wycinanie drutów zewnętrznych, rozkręcanie liny, badania magnetyczne
rozluźnienie drutów zewnętrznych	badania wizualne
zmiany parametrów geometrycznych – średnica i skok liny	pomiary w czasie badań wizualnych
zmiany własności sprężystych – wydłużenie i statyczny moduł sprężystości	pomiary wydłużenia liny podczas napełniania naczyń
deformacje śrubowe (tzw. korkociągi) i pętlowe (tzw. kobyły)	badania wizualne
zmiany własności dynamicznych – dynamiczny moduł sprężystości, współczynnik tłumienia	pomiary wzdłużnych drgań, badania magnetyczne
zmiany własności mechanicznych drutów odcinków pobranych z liny pracującej	badania w warunkach laboratoryjnych
zmiana przekroju i siły zrywającej	badania magnetyczne, badania laboratoryjne

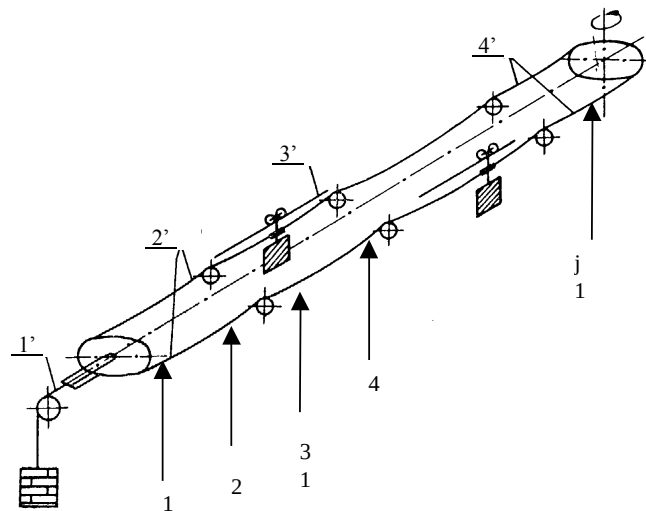
3. BADANIA WIZUALNE LIN PRACUJĄCYCH

Badania wizualne stanu bezpieczeństwa lin pracujących w różnych urządzeniach transportowych prowadzone są podczas ich ruchu z małą prędkością ($v \leq 1$ m/s). W badaniach tych zwraca się szczególną uwagę czy lina nie ma deformacji, przewężenia, zmiany w układzie drutów w splotkach, rozluźnień i pęknięć drutów, oznak korozji oraz innych uszkodzeń, stosując metody identyfikacji podane w tablicy 1. Pomiary parametrów geometrycznych, jak średnica i długość skoku liny, prowadzone są po zatrzymaniu urządzenia w określonych miejscach 1, 2 j (rys. 1 i 2). Wyniki pomiarów zapisuje się w tablicy 2, po wcześniejszym jej przygotowaniu dla konkretnego urządzenia i lin z uwzględnieniem specyfiki badań (górnictwe wyciągi szybkie, koleje linowe różnych typów, wyciągi narciarskie itp.) i liczbą mierzonych parametrów. Pomiary i badania tej samej liny, wykonywane w różnych miejscach (rys. 1 i 2) są powtarzane w określonych odstępach czasu (np. co miesiąc, kwartał), przez co gromadzone są powiększające się zbiory wyników (tabl. 2), wymagające obiektywnej analizy i wiarygodnej oceny.



Rys. 1. Schemat górniczego wyciągu szybowego: 1 ... j – miejsca pomiarów

Fig. 1. Scheme of mine shaft hoist: 1 ... j – measurement points



Rys. 2. Schemat kolei dwulinowej o ruchu wahadłowym: 1' – lina napinająca, 2' – lina odciążona, 3' – lina nośna, 4' – lina ciągnąca, 1, 2, 3, 4 ... j – miejsca pomiarów

Fig. 2. Scheme of bicable ropeway with backward and forward motion: 1' – tightening rope, 2' – lightened rope, 3' – carrying rope, 4' – draw rope, 1, 2, 3, 4 ... j – measurement points

Tablica 2. Sposób zapisywania wyników badań analizowanych parametrów lin

Numer i data badania	Nazwa urządzenia				
	Nazwa parametru				
	Miejsce pomiaru				
	1	2	3		j
1	x_{11}	x_{21}	x_{31}		x_{j1}
2	x_{12}	x_{22}	x_{32}		x_{j2}
3	x_{13}	x_{23}	x_{33}		x_{j3}
4	x_{14}	x_{24}	x_{34}		x_{j4}
.	.	.	.		.
I	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}		x_{ij}

4. METODY ANALIZY WYNIKÓW WIZUALNYCH BADAŃ LIN PRACUJĄCYCH

Po każdym badaniu w warunkach laboratoryjnych i ruchowych nasuwa się pytanie, czy stwierdzone różnice wartości analizowanych parametrów są istotne i wywołane zostały zmianami właściwości liny [2] (np. z powodu postępującego zużycia i zmęczenia), czy też są nieznaczne i wywołane przez czynniki przypadkowe (losowe), towarzyszące badaniom.

Dlatego też uzyskane zbiory wyników badań analizować należy metodami statystyki matematycznej i rachunku prawdopodobieństwa (metody probabilistyczne) [1, 3, 4, 5]. Oprócz metod statystycznych elementarnych (wyliczanie ręczne średniej i odchylenia standardowego za pomocą kalkulatora) wprowadzać należy bardziej zaawansowane metody statystycznej analizy danych, wykorzystując programy komputerowe Statistica PL, Mathcad PL itp.

4.1. Metoda porównania kolejnych serii wyników badań

Ocenę wyników dwóch serii badań tych samych parametrów liny (próby powiązane) prowadzi się w podanej niżej kolejności:

1. Wyznaczanie wartości średniej arytmetycznej $\bar{X}_i$ i szacunkowego odchylenia standardowego S_i oraz wariancji S_i^2 ,
2. Wykorzystując kryterium Fishera sprawdza się, czy analizowane kolejne serie wyników badań uważać można za jednakowo dokładne. W tym celu wyznaczamy wartość statystyki

$$F' = \frac{S_1^2}{S_2^2} (S_1 > S_2) \quad (1)$$

i porównuje z wartością tablicową F odczytaną przy liczbach stopni swobody $f_1 = n_1 - 1$ i $f_2 = n_2 - 1$ i poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Jeżeli F' jest mniejsza od

wartości tablicowej F , to obydwie serie badań uważać można za jednakowo dokładne.

3. Za pomocą kryterium Studenta sprawdza się, czy różnica między wartościami średnimi kolejnych zbiorów pomiarów $|\bar{X}_1 - \bar{X}_{i2}|$ jest istotna, przy liczbie stopni swobody $n_1 + n_2 - 2$ i poziomie istotności $\alpha = 0,05$, co zapisuje się w formie

$$|\bar{X}_1 - \bar{X}_2| < t_\alpha S_D \quad (2)$$

gdzie S_D jest odchyleniem kwadratowym obliczanym ze wzoru

$$S_D = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n}} \quad (\text{dla } n_1 = n_2 = n) \quad (3)$$

Jeżeli zależność (2) nie jest spełniona, to różnica między średnimi jest istotna. Wymaga to dalszej szczegółowej analizy i ustalenia przyczyny.

W probabilistycznej metodzie analizy wyników badań wykorzystać można programy komputerowe, na przykład Statistical lub Mathcad, w których wyniki te zestawia się w formie macierzowej. Pozwala to w sposób łatwy łączyć narastające liczby wyników pomiarów i powtarzać analizy na liczniejszych zbiorach. Ze wzrostem liczebności zbiorów wyników badań, maleją graniczne wartości statystyk t i F (kryteria oceny są coraz ostrzejsze), co jeszcze bardziej zwiększa wiarygodność oceny zmian analizowanych parametrów.

4.1.1. Ocena własności mechanicznych drutów lin pracujących

Własności mechaniczne drutów, takie jak siła zrywająca, liczba przegięć i liczba skręceń określają również w pewnym stopniu stan postępującego osłabienia pracującej liny wyciągowej. Dlatego przepisy bezpieczeństwa [7] wymagają okresowego odcinania z nad zawiesia odcinka pracującej liny nośnej, wyciągu bębnowego i przeprowadzenia badań własności mechanicznych wszystkich drutów. Własności drutów są zmiennymi losowymi o rozkładzie normalnym [3], dlatego też uzyskane zbiory wyników badań analizuje się metodami probabilistycznymi w sposób przedstawiony w punkcie 2.

Poniżej dla przykładu przedstawiono analizę wyników badań liczby przegięć drutów o średnicy 1,21 mm liny nośnej wyciągu bębnowego przeprowadzonych w odstępach 12 miesięcy. Zbiory uzyskanych wyników o liczebnościach $n_1 = n_2 = 36$ prezentują macierze A i B.

$$A := \begin{bmatrix} 13 & 12 & 12 & 13 & 13 & 13 \\ 11 & 15 & 13 & 11 & 16 & 12 \\ 11 & 15 & 12 & 13 & 14 & 13 \\ 10 & 13 & 14 & 10 & 14 & 12 \\ 12 & 10 & 13 & 17 & 15 & 14 \\ 14 & 12 & 13 & 12 & 14 & 12 \end{bmatrix} \quad B := \begin{bmatrix} 12 & 9 & 9 & 12 & 12 & 9 \\ 12 & 11 & 8 & 13 & 8 & 8 \\ 10 & 10 & 10 & 9 & 13 & 10 \\ 10 & 11 & 8 & 12 & 9 & 11 \\ 9 & 8 & 10 & 9 & 10 & 10 \\ 6 & 11 & 8 & 8 & 9 & 8 \end{bmatrix}$$

Graniczne wartości statystyk t – Studenta $t_\alpha = 2,00$ i Fishera $F = 1,74$.

W wyniku obliczeń otrzymuje się: $\bar{X}1 = 12,861$; $\bar{X}2 = 9,778$; $S_1^2 = 2,673$; $S_2^2 = 2,508$; $S_D = 0,379$ oraz zgodnie z zależnościami (1) i (2)

$$F' = 1,066 < 1,74 ; |\bar{X}1 - \bar{X}2| = 3,083 > 0,759.$$

Oznacza to, że kolejne serie badań wykonane zostały z jednakową dokładnością, natomiast istotna różnica występuje pomiędzy wartościami średnimi liczby przegięć. Lina uległa zmęczeniowemu zużyciu, po 12 miesiącach eksploatacji, co zmniejszyło odporność drutów na przeginięcie.

4.1.2. Ocena pomiarów zmian jednego parametru pracującej liny

Poniżej dla przykładu przedstawiono analizę zbiorów wyników pomiarów ruchomych jednomiesięcznych, dwumiesięcznych i kwartalnych średnicy liny wciągowej nośnej o średnicy nominalnej $\varnothing 46$ mm typu WS 6x36+NF i powierzchniowym styku drutów.

Przyjęto oznaczenia:

A, B, C – zbiory wyników miesięcznych,

AB, BC – zbiory wyników dwumiesięcznych,

ABC – zbiór wyników kwartalnych.

W celu sprawdzenia czułości metody do analizy wybrano zbiory pomiarów średnicy liny podsiębiernej wykonanych w III kwartale 1994 roku i IV kwartale 2000 roku (tabl. 3). Z danych tablicy 3 wynika, że w przypadku badań miesięcznych wykonanych w analizowanym kwartale nie występuje istotna różnica wartości średnich arytmetycznych średnic lin. Istotne różnice średnich wartości średnic występują natomiast przy porównaniu zbiorów wyników badań dwumiesięcznych i kwartalnych (tabl. 3, wartości pogrubione), przy równoczesnym spełnieniu kryterium F (jednako-wej dokładności pomiarów).

Tablica 3. Wyniki analizy badań ruchomych średnicy podsiębiernej liny wciągowej WS 6x36+NF o powierzchniowym styku drutów (III kw. 1994 i IV kw. 2000)

Zbiory wyników badań	Parametry statystyczne	Badania comiesięczne						t_0S_D	$ \bar{d}_1 - \bar{d}_2 $		F	
		VII	VIII	IX	X	XI	XII					
		Zbiory wyników										
		A	B	C	D	E	F					

miesięczne	$\bar{d}$, mm	45,527	45,817	45,190	44,413	44,487	44,823	0,899	0,517	0,29< 0,899	0,074 <0,517	2,275 <19	4,167 <19
	S_l^2	0,091	0,04	0,0083	0,035	0,0084	0,026						
dwumiesięczne	$\bar{d}$, mm	45,672			44,45			AB-DE		AB-DE		AB-DE	
	S_l^2	0,086			0,023			0,301		1,222 > 0,301		3,739 < 5,05	
kwartalne	$\bar{d}$, mm	45,511			44,574			(ABC)-(DEF)		(ABC)-(DEF)		(ABC)-(DEF)	
	S_l^2	0,112			0,055			0,289		0,937 > 0,289		2,036 < 3,44	

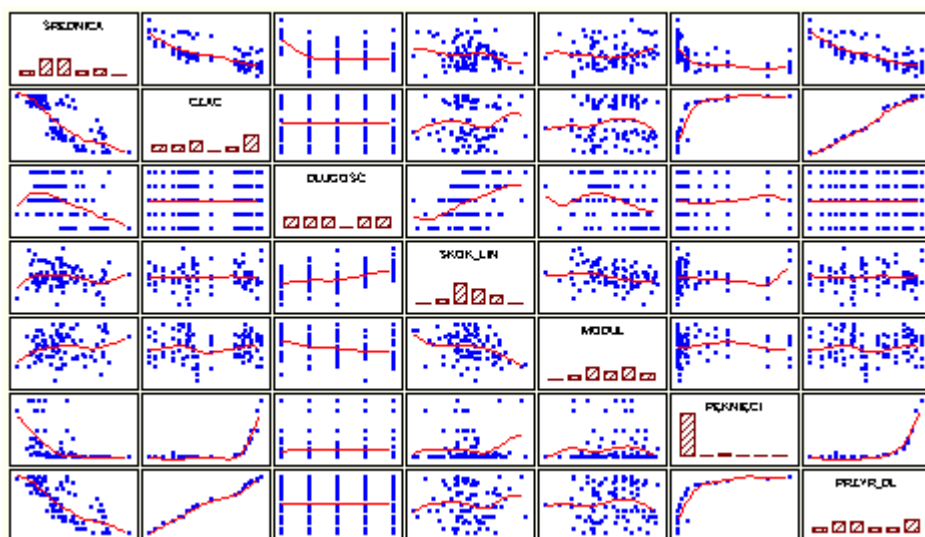
Świadczy to o możliwości wykorzystania przedstawionej metody analitycznej w praktyce do określania zmian własności mechanicznych drutów i lin przy ocenie stanu bezpieczeństwa lin w warunkach ruchowych.

4.2. Ocena osłabienia wywołanego zmianami właściwości kilku parametrów pracującej liny

Stan bezpieczeństwa pracującej liny zależy może od zmiany w czasie kilku parametrów równocześnie i w różnych miejscach liny. Należy bowiem pamiętać, że długość liny wynosić może kilkaset lub więcej metrów, ale o zagrożeniu decyduje maksymalne osłabienie w jednym miejscu (przekroju) liny. Dlatego trzeba być zorientowanym, które z czynników postępującego osłabienia są najważniejsze, a także jakie jest sumaryczne osłabienie. Odpowiednia metoda, która pomoże rozwiązać to zagadnienie nazywa się regresją i korelacją wielokrotną. Zawsze, gdy w modelu regresji ma się do czynienia z co najmniej dwoma zmiennymi niezależnymi (objaśniającymi), mówi się o regresji wielokrotnej. Powiększające się z upływem czasu eksploatacji liny zbiory wyników pomiarów wielu parametrów oceniać należy z zastosowaniem bardziej zaawansowanych metod statystycznej analizy danych, z wykorzystaniem programów komputerowych [8, 10].

Proponuje się następującą kolejność postępowania:

- Sporządzenie macierzowych wykresów rozrzutu, które służą do zbiorczego przedstawienia współzależności pomiędzy wieloma zmiennymi w postaci macierzy zwykłych X-Y. Przykład macierzowego wykresu rozrzutu dla wybranych siedmiu zmiennych (analizowanych parametrów liny) przedstawia rysunek 3. Dla każdej pary zmiennych pokazane są wykresy rozrzutu, podobnie na wykresie rozrzutu pokazany jest wykres regresji liniowej lub nieliniowej. Gdy ma się do czynienia z macierzą kwadratową, wówczas na głównej przekątnej macierzy wykresów rozrzutu przedstawiony jest rodzaj rozkładu zmiennych w postaci histogramu.
- Przeprowadzenie wzrokowej oceny wykresów rozrzutu, która umożliwia wstępne określenie siły i rodzaju zależności i ułatwia prowadzenie dalszej analizy.



Rys. 3. Macierzowy wykres rozrzutu zmian siedmiu parametrów pracującej liny

Fig. 3. Matrix scatter diagram of changes of seven parameters of working rope

4.2.1. Analiza korelacyjna

Siłę współzależności liniowej między dwoma zmiennymi X i Y określa współczynnik korelacji liniowej r_{xy} Pearsona, przyjmujący wartości z przedziału $[-1, 1]$. Znak współczynnika informuje o kierunku korelacji (dodatniej lub ujemnej), natomiast bezwzględna wartość – o sile związku. W tabelicy 4 zestawiono przykładowo wartości r_{xy} dla siedmiu zmiennych badanych parametrów pracującej liny wyciągowej nośnej. Wartości pogrubione oznaczają, że współczynniki korelacji są istotne przy poziomie istotności $\alpha \leq 0,05$. Uwzględniając przyjmowaną w analizie statystycznej [1, 8] skalę korelacji, podać można wstępnie następujące wnioski:

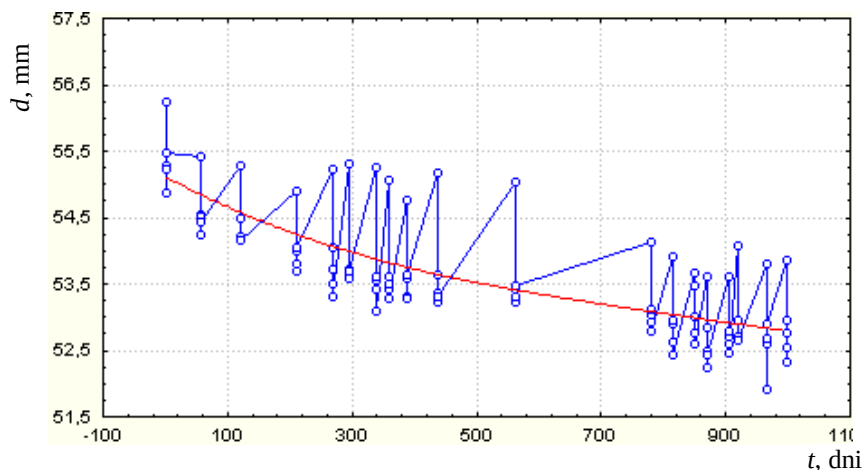
Tablica 4. Korelacja pomiędzy parametrami pracującej liny

Parametr liny	Średnica liny	Czas pracy	Długość liny	Skok liny	Moduł sprężystości	Pęknięcia drutów	Wydłużenie liny
średnica liny	1	-0,74	-0,42	-0,15	0,12	-0,47	-0,75
czas pracy	-0,74	1	-0,00	0,03	0,04	0,68	0,99
długość liny	-0,42	-0,00	1	0,42	-0,25	0,03	0,00
skok liny	-0,15	0,03	0,42	1	-0,28	0,10	0,03
moduł sprężystości	0,12	0,04	-0,25	-0,28	1	0,00	0,02
pęknięcia drutów	-0,47	0,68	0,03	0,10	0,00	1	0,72
wydłużenie liny	-0,75	0,99	0,00	0,03	0,02	0,72	1

- istnieje wysoka współzależność między czasem pracy liny a zmianami średnicy, narastaniem pęknięć drutów i wydłużaniem, natomiast słaba korelacja zachodzi w odniesieniu do zmian statycznego modułu sprężystości,

- między długością liny (miejscami pomiarów) a zmianami średnicy istnieje przeciętna korelacja ujemna ($r_{xy} = -0,42$) oraz podobna korelacja dodatnia ($r_{xy} = 0,42$) między zmianami skoku.

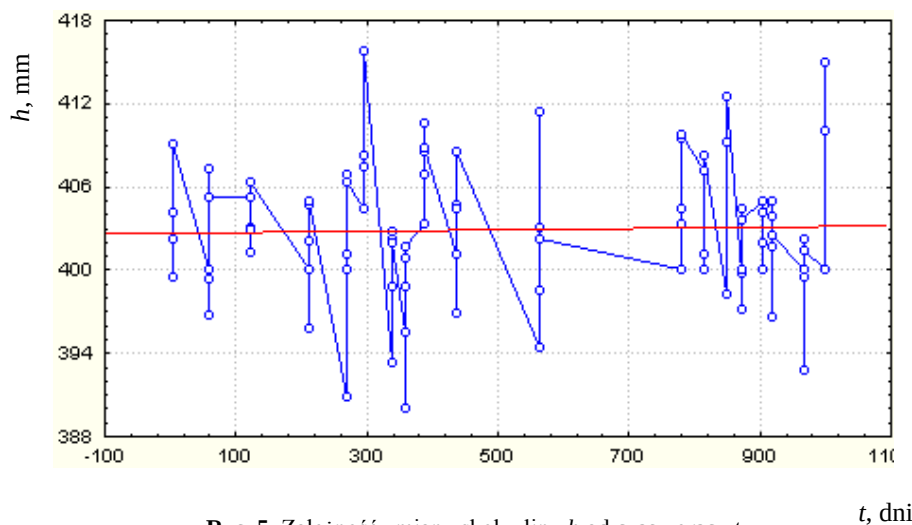
Prowadząc dalszą szczegółową analizę, sporządza się wykresy rozrzutu wraz z linią regresji dla wybranych par zmiennych zależnych. Rysunki 4 i 5 przedstawiają wykresy zmiany średnicy i skoku liny w funkcji czasu pracy.



Rys. 4. Zależność zmiany średnicy liny d od czasu pracy t

Fig. 4. Dependence of change of rope diameter d on worktime t

Z rysunku 4 wynika, że z upływem czasu eksploatacji zmniejsza się średnica liny, co ma merytoryczne uzasadnienie i potwierdza wnioski podane w punkcie 4.1.2.



Rys. 5. Zależność zmiany skoku liny h od czasu pracy t

Fig. 5. Dependence of change of rope slip h on worktime t

4.2.2. Analiza regresyjna

Analiza regresji pojedynczej lub wielorakiej jest metodą umożliwiającą określenie analitycznego związku między zmienną zależną, będącą wynikiem badanego zjawiska a innymi zmiennymi, które mają istotne znaczenie dla przebiegu tego zjawiska. Związek taki zwany jest funkcją (modelem) regresji. Wyboru analitycznej postaci funkcji regresji (liniowa, nieliniowa) dokonuje się na podstawie analizy korelacyjnej, wykresów rozrzutu oraz posiadanej wiedzy z zakresu badania lin.

Wyniki badań mogą być analizowane w układzie płaskim X-Y, co umożliwia ocenę zmiany parametrów tylko wzdłuż długości lin lub funkcji czasu pracy (rys. 4 i 5) albo w układzie trójwymiarowym X-Y-Z, co pozwala na ocenę zmian własności trzech parametrów.

Przebieg zmiany skoku z upływem czasu eksploatacji zbliżony był do linii prostej równoległej do osi x. Oznacza to, że po ustaleniu się rozkładu długości h wzdłuż długości liny, długość skoku w okresie pracy zmieniała się nieznacznie.

Opracowane modele regresyjne są pomocne przy prognozowaniu dopuszczalnego czasu pracy lin.

Sporządzać można również różne trójwymiarowe wykresy rozrzutu wraz z wykresem powierzchniowym dla wybranych trójek zmiennych. Rysunki 6 i 7 przedstawiają geometryczny obraz zmian średnicy d i skoku h liny od długości i czasu eksploatacji.

Przyjmując oznaczenia:

z – zmienna zależna (badany parametr jak średnica d , długość skoku liny h , moduł sprężystości itp.);

$x = t$ – czas pracy liny, dni;

$y = l$ – długość liny (miejsce pomiaru), m,

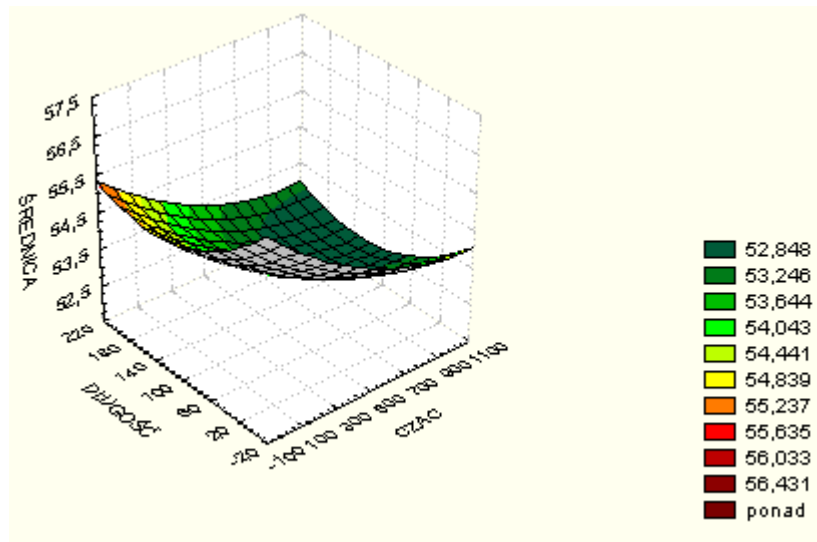
otrzymujemy przykładowo funkcje regresji $z = f(x, y)$ określające zmianę:

– średnicy liny

$$z = 55,973 - 0,004x - 0,002y + 1,87 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 1,267 \cdot 10^{-6} \cdot xy + 6,84 \cdot 10^{-5} \cdot y^2 \quad (4)$$

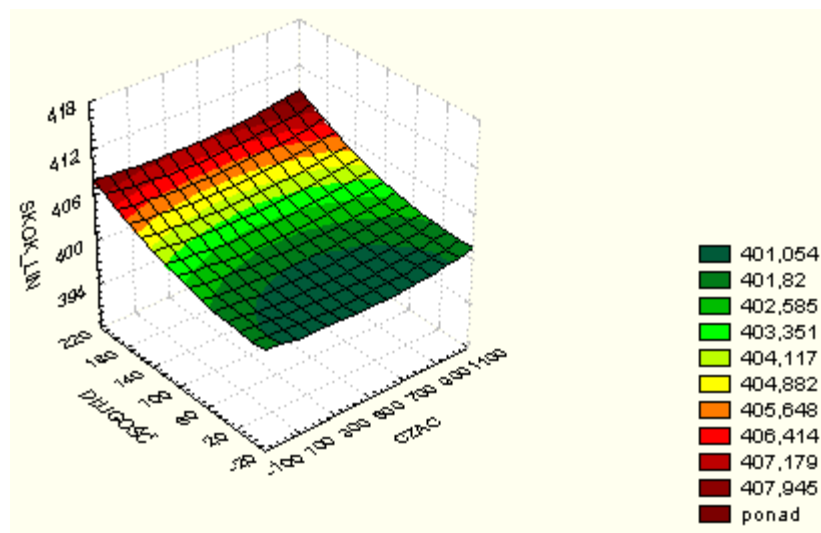
– skoku liny

$$z = 401,00 - 0,003x + 0,002y + 3,145 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 + 1,313 \cdot 10^{-6} \cdot xy + 1,31 \cdot 10^{-4} \cdot y^2 \quad (5)$$



Rys. 6. Zależność średnicy liny d od długości l i czasu pracy liny t

Fig. 6. Dependence of rope diameter d on rope length l and worktime t



Rys. 7. Zależność skoku liny h od długości l i czasu pracy liny t

Fig. 7. Dependence of rope slip h on rope length l and worktime t

Jeżeli bryły na rysunkach 6 i 7 przecinane będą płaszczyzną pionową i równoległą do osi x w odstępach wybranej długości liny ($l = \text{const}$), to otrzyma się zbiory punktów układających się według krzywych regresji (6) i (7). Przykładowo dla $l = 100$ m i po wprowadzeniu właściwych oznaczeń, funkcje regresji przyjmują prostą postać

$$d = 54,657 - 3,873 \cdot 10^{-3}t + 1,869 \cdot 10^{-6}t^2 \quad (6)$$

$$h = 402,51 - 2,869 \cdot 10^{-3}t + 3,145 \cdot 10^{-6}t^2 \quad (7)$$

Jeśli natomiast bryły przecinane będą płaszczyzną pionową równoległą osi y w ustalonych odstępach czasu ($t = \text{const}$), to określać się będzie zmiany parametrów wzdłuż długości liny. Funkcje regresji dla $t = 400$ dni i uwzględnieniu właściwych oznaczeń przyjmują postać:

$$d = 54,672 - 0,0195 \cdot l + 6,839 \cdot 10^{-5} \cdot l^2 \quad (8)$$

$$h = 400,30 + 5,252 \cdot 10^{-4}l + 1,31 \cdot 10^{-4}l^2 \quad (9)$$

Z zależności (9) wynika, że wraz z długością opuszczanej do szybu gałęzi liny wydłuża się skok wskutek cyklicznego rozkręcania i dokręcania się liny. Jest to zjawisko typowe w przypadku górniczych lin wyciągowych.

Podobnie analizuje się zmiany pozostałych parametrów badań wizualnych, takich jak moduł sprężystości, narastanie pęknięć drutów i wydłużanie się liny, a uzyskane funkcje regresji wykorzystuje się do oceny aktualnego stanu bezpieczeństwa lin pracujących.

Przedstawiona metoda analizy regresyjnej pozwala na odtwarzanie i porównywanie wyników badań wykonanych w interesujących nas odstępach czasu.

5. BADANIA MAGNETYCZNE LIN WYCIĄGOWYCH W WARUNKACH RUCHOWYCH

W roku 1999 rozpoczęto w GIG badania magnetyczne, których celem było wykazanie miejscowych zewnętrznych i wewnętrznych pęknięć drutów oraz ubytków korozyjnych metalicznego przekroju liny [6, 9]. Metody badań wizualnych i magnetycznych uzupełniają się wzajemnie dając pełny obraz stanu zużycia lin. Metoda magnetyczna opracowana została przez pracowników Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie [6, 9].

Pomiar z zastosowaniem tej metody przeprowadza się w następujący sposób: Badany odcinek liny za pomocą głowicy pomiarowej jest wprowadzany w stan bliski nasyceniu magnetycznemu. Sygnały o zmianach rozkładu pola magnetycznego są dostarczane do rejestratora (rys. 8). Głowica wyposażona jest w czujnik indukcyjny wewnętrzny, służący do wykrywania miejscowych ubytków na przykład spowodowanych pękniętymi drutami i wżerami korozyjnymi, czujnik indukcyjny zewnętrzny do szacowania głębokości, na której znajduje się uszkodzenie, czujnik hallotronowy do wykrywania dłuższych, rozłożonych ubytków metalicznego pola przekroju poprzecznego spowodowanych korozją i starciami.

W celu pomiaru bieżącej długości liny, prędkości względnego ruchu oraz synchronizacji wysuwu taśmy wykresowej z przemieszczeniem liny głowice, wyposażone są w specjalny czujnik ruchu. Defektograf wraz z głowicą pokazano na zdjęciu 1.



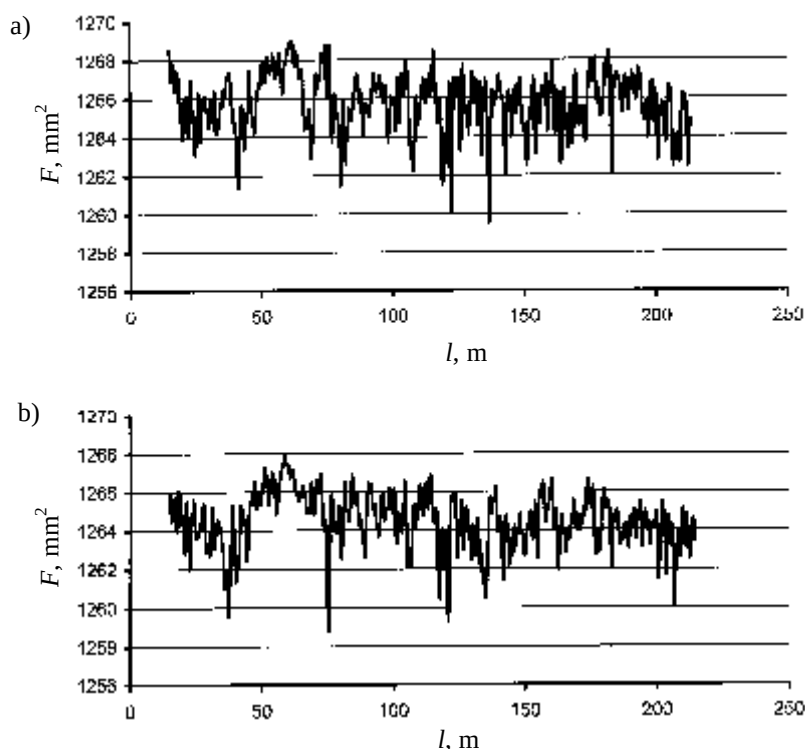
Fot. 1. Rejestrator i głowica magnetyczna do nieniszczących badań lin

Photo 1. Recorder and magnetic head for non-destructive rope testing

Badania prowadzone są ze zřębu szybu na opuszczonych klapach, odpowiednio zabezpieczonych. Głowica zamocowana na linie powinna być dodatkowo zabezpieczona przed ewentualnym nieprawidłowym kierunkiem przemieszczania się liny. Po zainstalowaniu aparatury za pomocą pręta kalibracyjnego o przekroju poprzecznym 20 mm^2 dokonuje się kalibracji urządzenia. Kalibracja polega na ustawieniu rejestracji w funkcji czasu, po czym, pomiędzy głowicę magnetyczną i linę wsuwa się i wysuwa pręt kalibracyjny. Na wykresach defektoskopowych widać wielkość zmian, jakie wywołał pręt o przekroju 20 mm^2 .

Badania magnetyczne stanu liny rejestruje się analogowo na taśmie termicznej i cyfrowo w karcie PCMCIA. Podczas każdego badania uzyskuje się typowy wykres defektoskopowy, na którym można zaobserwować miejsca z pękniętymi drutami, starciem, wżery korozyjne itp.

Zarejestrowane dane w karcie PCMCIA przeniesiono do stacjonarnego komputera klasy PC, gdzie za pomocą oprogramowania JW_CARD i BROWSER_102 dokonano konwersji plików binarnych na postać decymalną. Stworzono dodatkowe oprogramowanie, które automatycznie dokonywało porównania wyników badań z kalibracją, określając tym samym ubytki przekroju metalicznego. Wyniki takiej analizy przedstawiono na rysunkach 8a i 8b.



Rys. 8. Zmiany przekroju poprzecznego liny WS 6x52+NF podsiębiernej: a – badania po 815 dniach pracy, b – badania po 1084 dniach pracy, l – długość liny, F – przekrój nośny liny

6. WNIOSKI I UWAGI KOŃCOWE

1. W miarę upływu czasu pracy zmieniają się własności mechaniczne drutów z odcinków pobranych z lin pracujących, a także parametry geometryczne takie jak średnica i długości skoku liny oraz procesy narastania pęknięć drutów i wydłużania się liny.
2. Analizę i opracowywanie gromadzonych zbiorów wyników badań zaleca się prowadzić z wykorzystaniem metod probabilistycznych, co pozwoli na bieżące (po każdym badaniu) dokonywanie obiektywnej i wiarygodnej oceny zmian parametrów wpływających na stan bezpieczeństwa liny.
3. Stwierdzono, że metody badań wizualnych i magnetycznych uzupełniają się wzajemnie dając pełny obraz stanu zużycia lin. Najlepsze rezultaty osiąga się, gdy zintegrowane metody badań (badania magnetyczne i wizualne) prowadzone są przez ten sam zespół ludzi.
4. Wdrożenie bardziej obiektywnych, analitycznych zintegrowanych metod analizy osłabienia lin stalowych z wykorzystaniem bardzo rozpowszechnionej już techniki

komputerowej, przyczyni się do lepszego wykorzystania lin, przy zachowaniu wymaganego poziomu bezpieczeństwa.

Literatura

1. Bobrowski D.: *Probabilistyka w zastosowaniach technicznych*. Warszawa, WNT 1980.
2. Hankus J.: *O doborze konstrukcji i badaniu stanu bezpieczeństwa górniczych lin wyciągowych*. Bezpieczeństwo Pracy w Górnictwie 1974 nr 3.
3. Hankus J.: *Budowa i własności mechaniczne lin stalowych*. Katowice, Główny Instytut Górnictwa 2000.
4. Hankus J.: *Probabilistyczne metody analizy zmęczenia lin stalowych*. Maszyny Górnicze 2002 nr 1.
5. Hankus J. i inni: *Opracowanie zintegrowanej metody wizualnych i magnetycznych badań udoskonalonych lin wyciągowych*. Dokumentacja GIG nr 131 1000 1-181. Katowice 2001 (nieopublikowana).
6. Hansel J., Kwaśniewski J., Lankosz L., Tytko A.: *Badania magnetyczne lin stalowych*. Skrypty Uczelniane nr 1188. Kraków, Wydaw. AGH 1990.
7. *Przepisy dla podziemnych zakładów górniczych*. Załączniki nr 1-21. Katowice, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa 1998.
8. Stanisław A.: *Przystępny kurs statystyki w oparciu o program STATISTICA PL na przykładach medycznych*. Kraków, Stat Soft Polska Sp. z o.o. T. I i II 1998 i Tom II 2000
9. Tytko A.: *Modelowanie zużycia zmęczeniowego i diagnostyka lin stalowych*. Rozprawy Monograficzne 65. Kraków, Wydaw. AGH 1998.
10. Żero A.: *Mathcad 7.0*. Warszawa, Wydaw. EXIT.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Kazimierz Rułka

Mariusz Ćwiężek

WPŁYW PROCESU ZGAZOWANIA ODPADÓW GUMOWYCH NA EMISJĘ ZANIECZYSZCZEŃ DO ŚRODOWISKA

Streszczenie

W krajach Unii Europejskiej, w dziedzinie gospodarki odpadami gumowymi, wdrażane są zalecenia Komisji Europejskiej, pozwalające na osiągnięcie następujących celów:

- blisko 100% zbiórkę zużytych opon, stanowiących około 70% odpadów gumowych,
- bieżnikowanie co najmniej 25% i recykling 65% tonażu zużytych opon,
- rezygnację ze składowania na powierzchni lub deponowania opon w ziemi i spalania bez odzysku energii cieplnej.

W Polsce, w związku z narastającym problemem z odpadami gumowymi, a w szczególności z oponami samochodowymi oraz zgodnie ze światowymi tendencjami, w Zakładzie Oszczędności Energii Głównego Instytutu Górnicztwa prowadzone są prace badawcze nad technologią termicznej utylizacji odpadów gumowych, polegającą na ich zgazowaniu i wykorzystaniu powstałego gazu procesowego do celów grzewczych.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki pomiarów emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych, hałasu oraz czynników szkodliwych na stanowiskach pracy związanych z działaniem instalacji do termicznej utylizacji odpadów gumowych. Badania przeprowadzono w 2001 roku na instalacji badawczej. Uzyskane wyniki potwierdziły, że analizowany proces termicznej utylizacji odpadów gumowych zapewnia dotrzymanie norm emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych oraz spełnia wymagania określone w Rozporządzeniu MOŚNiL z dnia 28.04.1998 r. „w sprawie dopuszczalnych wartości stężeń substancji zanieczyszczających powietrze” w zakresie rozprzestrzeniania się w powietrzu zanieczyszczeń normowanych i pozostałych oznaczonych w gazach odlotowych. W celu dopuszczenia badanej instalacji do przemysłowego stosowania wymagane jest wykonanie pomiarów emisji dioksyn i furanów, niebędących przedmiotem niniejszych badań i porównania z wartościami normatywnymi. Przeprowadzone badania warunków pracy przy instalacji zgazowania odpadów gumowych w zakresie stężeń pyłu całkowitego, pyłu respirabilnego, tlenku węgla i dwutlenku siarki, wykazały dotrzymanie wartości NDS określonych w Rozporządzeniu MPiPS z dnia 17.06.1998 r. i 2.01.2001 r. Ponadto stwierdzono, że działalność instalacji nie spowoduje wystąpienia uciążliwości akustycznych w środowisku zewnętrznym. Poziom równoważny dźwięku A emitowany przez instalację, dla ośmiu najbardziej niekorzystnych godzin dnia, na analizowanym terenie wynosi około 41 dB(A) i nie przekracza wartości dopuszczalnej 50 dB(A), w porze dziennej.

Impact of the rubber waste gasification process on pollution emissions to the environment

Abstract

In European Union member states, in the field of rubber waste management, are implemented recommendations of the European Commission, enabling to achieve the following objectives:

- almost 100%-collection of used tyres, constituting about 70% of rubber wastes,
- retreading of at least 25%, and recycling of 65% of the tonnage of used tyres,
- resignation of storage of tyres on the surface, or their disposal underground and combustion without thermal energy recovery.

In Poland in connection with the increasing problem of rubber wastes, and especially regarding car tyres, and in conformity with world tendencies, in the Department of Energy Saving of the Central Mining Institute are conducted investigations relating to the thermal utilization technology of rubber wastes, consisting in their gasification, and utilization of the produced process gas for heating purposes.

The article presents the results of measurements of dust-and-gas pollution emissions, noise and harmful factors at workstations connected with the operation of installation for waste thermal utilization. The tests were conducted in 2001, using a testing installation. The obtained results have proved that the analysed process of rubber waste thermal utilization ensures the meeting of standards of dust-and-gas pollution emissions and fulfilment of the requirements determined in the Order of the Minister of Environmental Protection, Natural Resources and Forestry of 28 April 1998 on "admissible concentration values of substances polluting the air" with respect to standardized pollutions, spreading in the air, and remaining contaminations determined in waste gases. In order to accept the tested installation for industrial use, it is required to perform emission measurements of dioxins and furanes, which are not the subject of present investigations, and to compare them with normative values. The tests concerning work conditions carried out at the installation of rubber waste gasification with respect to concentrations of total dust, respirable dust, carbon monoxide, and sulfur dioxide indicated that the maximum permissible concentration values, determined in the Orders of the Minister of Labour and Social Policy of 17 June 1998 and 2 January 2001, were kept. Moreover, it was ascertained that the operational activity of the installation does not cause the occurrence of acoustic nuisances in the external environment. The equivalent level of sound A emitted by the installation for eight most unfavourable hours during the day in the analysed area amounts to about 41 dB(A) and does not exceed the permissible value of 50dB(A) at daytime.

1. WSTĘP

W Polsce w ostatnich latach składowanie odpadów gumowych, a w szczególności opon samochodowych stało się znacznym problemem. W związku z powyższym, jak również z uwagi na zalecenia Komisji Europejskiej, w Głównym Instytucie Górnictwa prowadzone są prace badawcze nad technologią technicznej utylizacji odpadów gumowych [11]. Utylizacja odpadów polega na ich zgazowaniu i wykorzystaniu powstałego gazu procesowego do celów grzewczych. Zakres prac obejmuje także określenie emisji zanieczyszczeń:

- produktów gazowych (spaliny ze spalania gazu procesowego w kotle energetycznym),
- produktów stałych (popiół, złom stalowy)

procesu termicznej utylizacji odpadów gumowych oraz określenie czynników szkodliwych na stanowisku pracy i emisji hałasu z instalacji.

2. SYSTEMY UTYLIZACJI ODPADÓW GUMOWYCH

Odpady gumowe jako trwałe, nieulegające biodegradacji stanowią poważny problem ekologiczny [9]. Rozwój przemysłu motoryzacyjnego powoduje, że opony samochodowe, ze względu na ich ilość, w grupie odpadów gumowych stanowią znaczny udział. W roku 1995 w Polsce generowano około 100 tys. ton zużytych opon, co stanowiło 74% odpadów gumowych, natomiast prognoza dla roku 2005 wykazuje 30% wzrost ilości zużytych opon (około 131 tys. ton rocznie – 72% odpadów gumowych). W Dyrektywie 75/442/EEC Unii Europejskiej, dotyczącej odpadów, zużyte opony zostały zaliczone do odpadów o istotnym znaczeniu.

Powszechnie praktykowanym sposobem zagospodarowywania odpadów gumowych jest ich składowanie. Do podstawowych wad tego sposobu zaliczyć należy:

- wymagane duże objętości składowisk,
- brak możliwości wykonania ziemnego pokrycia na składowisku.

Zgodnie z dyrektywami UE kraje zachodnioeuropejskie stopniowo rezygnują ze składowania odpadów gumowych. W Holandii w 1996 roku wprowadzono zakaz składowania opon na wysypiskach, we Włoszech w 2000 roku, natomiast we Francji na początku 2002 roku [10]. Rozpowszechnia się natomiast recykling odpadów gumowych, polegający na ich rozdrabnianiu, mieleniu, następnie działaniu czynnikami chemicznymi w wysokiej temperaturze i określonym ciśnieniu. Produktami tego sposobu zagospodarowania są:

- wykładziny, maty, szczeliwa,
- materiały dźwiękochłonne i wibroizolacyjne,
- nawierzchnie obiektów sportowych,
- mieszaniny rozdrobnionej gumy i PCV w postaci m.in. węży, brezentów samochodowych.

Efektywnymi i stosunkowo często stosowanymi metodami utylizacji odpadów gumowych są także metody termiczne.

2.1. Termiczne metody utylizacji odpadów gumowych

Odpady gumowe ze względu na wysoką wartość energetyczną (ciepło spalania $Q \cong 30000$ kJ/kg), porównywalną z wartością energetyczną wysokogatunkowych węgla kamiennych, efektywnie utylizowane są w procesach spalania z odzyskiem ciepła w specjalnych paleniskach. W termicznych metodach utylizacji wykorzystuje się następujące zjawiska:

- spalanie,
- pirolizę,
- zgazowanie.

2.1.1. Spalanie

Spalanie odpadów gumowych może się odbywać w paleniskach zapewniających temperaturę rzędu $1000\div 1600$ °C, powodującą całkowitą utylizację i utlenianie elementów stalowych. W zależności od konstrukcji paleniska oraz sposobu spalania odpady gumowe mogą stanowić paliwo zasadnicze lub uzupełniające. Energia uzyskiwana podczas spalania odpadów gumowych jest wykorzystywana w następujących gałęziach przemysłu:

W przemyśle cementowym odpady gumowe (opony samochodowe) stanowią paliwo uzupełniające w procesie wypalania klinkieru w piecach obrotowych, przede wszystkim z powodu:

- wysokiej wartości opałowej,
- mniejszej zawartości azotu, siarki i popiołu w porównaniu z węglem,

- zawartości stali w zbrojeniu opon, eliminującej konieczność dodawania tlenków żelaza do procesu wypalania klinkieru.

Stosowanie opon jako paliwa w cementowniach rozpowszechnione jest w USA, Japonii, Wielkiej Brytanii, Niemczech oraz Belgii. Badania prowadzone w Europie zachodniej wykazały, że proces spalania opon w piecach obrotowych nie powoduje wzrostu emisji głównych zanieczyszczeń gazowych, tj.: SO_2 , NO_x oraz CO [3].

W przemyśle papierniczym, w instalacjach kotłowych celulozowni i zakładów papierniczych w USA spalane są odpady gumowe jako paliwo uzupełniające, pozbawione elementów stalowych (paliwo TDF *tire-derived-fuel* – rozdrobnione opony do rozmiarów kilkunastu centymetrów kwadratowych). W paleniskach opalanych odpadami drzewnymi z dodatkiem węgla, TDF zastępuje tradycyjne paliwo. Udział wykorzystania TDF w mieszaninie paliwa jest ograniczony wielkością emisji zanieczyszczeń.

W energetyce odpady gumowe nieprzetworzone, jak i paliwo TDF, stosowane są jako paliwo uzupełniające w kilku elektrowniach w Stanach Zjednoczonych. Powszechność stosowania technologii ograniczona jest koniecznością dotrzymywania norm emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych.

2.1.2. Piroliza

Proces pirolizy polega na rozkładzie organicznych związków chemicznych o większych masach cząsteczkowych na cząsteczki mniejsze pod wpływem temperatury i przy braku lub niedoborze tlenu. W zależności od technologii oraz rodzaju odpadów gumowych produktami pirolizy mogą być:

- węgiel aktywny, koks, sadza,
- olej, gaz,
- stal.

Najczęściej proces pirolizy prowadzony jest w złożu fluidalnym w zakresie temperatury 300÷800°C.

Ze względu na wysokie nakłady inwestycyjne oraz duży stopień niebezpieczeństwa procesu technologia nie jest rozpowszechniona.

2.1.3. Zgazowanie

Zgazowanie jest procesem termochemicznym przemiany związków organicznych zawartych w odpadach gumowych na paliwa gazowe za pomocą wolnego lub związanego tlenu. Zgazowanie przeprowadza się w kontrolowanych warunkach temperatury i zawartości tlenu. Optymalna temperatura procesu wynosi 200÷400 °C. Produktem zgazowania odpadów gumowych (opon samochodowych) jest:

- paliwo gazowe składające się ze składników palnych (CO , H_2) oraz balastu (CO_2 , N_2 , H_2O),
- pozostałość stała składająca się ze złomu stalowego (około 10% wag.) oraz popiołu (2% wag.).

Uzyskane paliwo gazowe może być paliwem podstawowym lub uzupełniającym dla celów grzewczych lub wytwarzania pary technologicznej, czy ciepłej wody użytkowej, przede wszystkim w zakładach generujących odpady gumowe, a także w szklarniach, suszarniach, odlewniach i w zakładach, w których w cenie finalnego produktu dużą wagę odgrywa koszt energii włożonej w proces produkcyjny.

Technologia zgazowania odpadów gumowych znajduje się w fazie eksperymentalnej. W ostatnich latach prace badawcze prowadzone są na instalacjach w Japonii i Stanach Zjednoczonych.

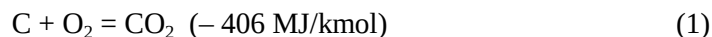
3. OPIS PROCESU ZGAZOWANIA ODPADÓW GUMOWYCH ZE SPALANIEM GAZU PROCESOWEGO

W Zakładzie Oszczędności Energii i Ochrony Powietrza GIG, opracowano technologię polegającą na zgazowaniu odpadów gumowych z wykorzystaniem powstałego gazu procesowego do celów energetycznych [1]. Przebieg procesu jest następujący: W warstwie odpadów gumowych, umieszczonych na ruszcie, pozwalającym na dopływ czynnika zgazowującego zawierającego tlen, a także na przepływ gazu przez tę warstwę powstają określone strefy w wyniku samomodelowania się procesu fizykochemicznego. Układ reagujący zawiera poza azotem tylko trzy główne składniki: węgiel, wodór i tlen. Siarka znajdująca się w odpadach nie odgrywa większej roli w ustalaniu się składu gazu. Proces zgazowania w odróżnieniu od procesu spalania przebiega z nadmiarem węgla. Można go opisać podstawowymi reakcjami chemicznymi zachodzącymi pomiędzy pierwiastkowym węglem i wodorem oraz nośnikiem tlenu lub powstającymi z nich gazami.

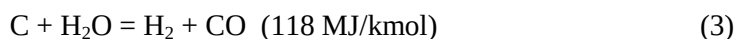
W procesie zgazowania można wyodrębnić dwie strefy reakcyjne:

- strefę spalania,
- strefę redukcji.

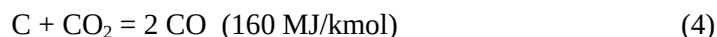
W strefie spalania zachodzą reakcje egzotermiczne:



Właściwe reakcje zgazowania (równania 3 i 4) są reakcjami endotermicznymi, zachodzącymi w strefie redukcyjnej. Palne gazowe produkty zgazowania pierwiastkowego węgla i wodoru z odpadów gumowych powstają głównie dzięki reakcjom redukcji z udziałem pary wodnej:



oraz dwutlenku węgla według reakcji redukcji Boudouarda:



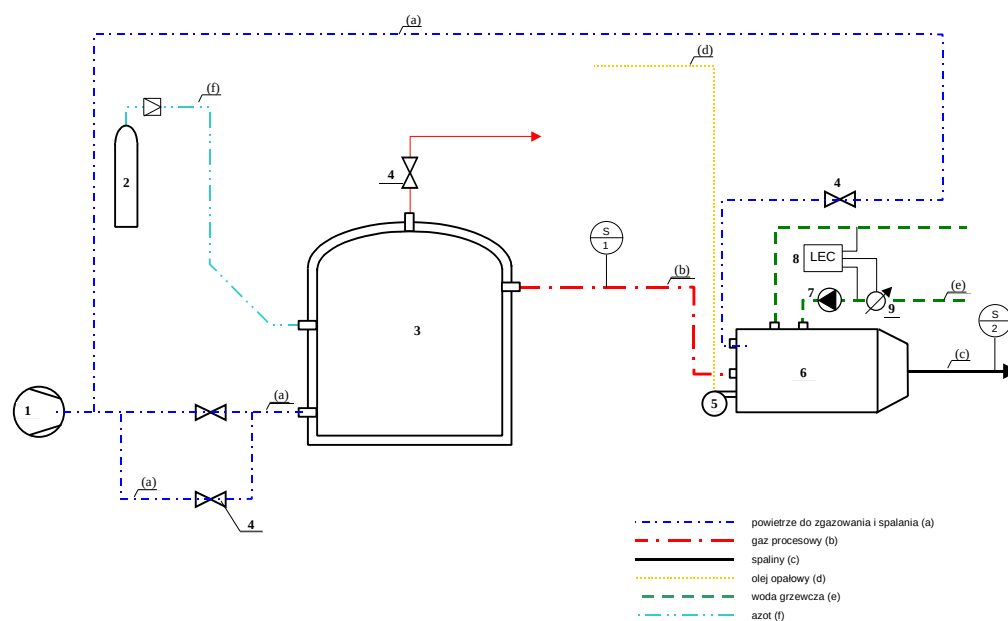
Uzyskany gaz procesowy spalany jest w kotle, a wytworzona energia cieplna, stanowiąca efekt termicznej utylizacji odpadów gumowych, wykorzystywana jest w celach grzewczych.

Spalanie produktów zgazowania przebiega według reakcji (5) i (6)



4. SCHEMAT TECHNOLOGICZNY INSTALACJI DO ZGAZOWANIA ODPADÓW GUMOWYCH I SPALANIA GAZU PROCESOWEGO

Badania przeprowadzono na instalacji w skali półtechnicznej, której schemat technologiczny przedstawiono na rysunku 1. Instalacja ma charakter prototypowo-pilotażowy i zastosowane rozwiązania konstrukcyjne wraz z aparaturą kontrolno-pomiarową podyktowane były minimalizacją nakładów inwestycyjnych.



Rys. 1. Schemat technologiczny instalacji do zgazowania odpadów gumowych z wykorzystaniem energii cieplnej do celów grzewczych wraz z rozmieszczeniem przekrojów pomiarowych: 1 – wentylator powietrza, 2 – butla z azotem i reduktorem, 3 – reaktor do zgazowania, 4 – zawór bezpieczeństwa, 5 – palnik olejowy pilotowy, 6 – komora spalania, 7 – pompa obiegowa, 8 – licznik energii cieplnej, przepływomierz, (a) – powietrze do zgazowania i spalania, (b) – gaz procesowy, (c) – spaliny, (d) – olej opałowy, (e) – woda grzewcza, (f) – azot

Fig. 1. Technological scheme of installation for rubber waste gasification with the use of thermal energy for heating purposes, along with the distribution of measuring cross-cuts: 1 – air fan, 2 – nitrogen cylinder and , 3 – gasification reactor, 4 – safety valve, 5 – pilot oil burner, 6 – combustion chamber, 7 – circulating pump, 8 – thermal energy meter, flow meter, (a) – air for gasification and combustion, (b) – process gas, (c) – flue gas, (d) – fuel oil, (e) – heating water, (f) – nitrogen

Instalacja zlokalizowana jest w Przedsiębiorstwie JUPOL znajdującym się na terenie przemysłowym dawnej Huty Bobrek w Bytomiu. Działalność przemysłowo-technologiczną przedsiębiorstwa stanowi:

- obróbka mechaniczna,
- wykonawstwo konstrukcji metalowych,
- złomowanie pojazdów samochodowych.

Instalacja do zgazowania odpadów zlokalizowana jest w pomieszczeniu technologicznym – kuźni znajdującej się w hali produkcyjnej na terenie przedsiębiorstwa (rys. 2)

Proces zgazowania jest periodyczny. Nominalna wydajność instalacji wynosi 400 kg odpadów gumowych na szarżę.

4.1. Opis urządzeń wchodzących w skład instalacji do zgazowania odpadów gumowych

Reaktor

Reaktor zaprojektowany został w formie pionowego walca z płaszczem wyłożonym wykładziną termiczną (fot. 1). Od góry zamknięty jest klapą bezpieczeństwa, z boku wyposażony jest w szczelne drzwi służące do wprowadzania odpadów gumowych. W dolnej części reaktora znajduje się rurociąg doprowadzający powietrze, powyżej którego zamocowany jest płaski ruszt z utylizowanym odpadem.



Fot. 1. Reaktor do zgazowania odpadów gumowych

Phot. 1. Reactor for rubber waste gasification

Kocioł odzysknicowy

W kotle następuje spalanie gazu z procesu zgazowania oraz przekazanie energii cieplnej mediom grzewczym. Zainstalowany jest w nim olejowy palnik pilotowy, inicjujący proces spalania i podtrzymujący płomień w komorze spalania oraz kolektory doprowadzające gaz procesowy i powietrze do spalania. Spaliny odprowadzane są kolektorem bezpośrednio do emitora stalowego (fot. 2).



Fot. 2. Kocioł do spalania gazu procesowego

Phot. 2. Boiler for process gas combustion

Wentylator nawiewu

Wentylator służy do doprowadzenia powietrza niezbędnego do procesu zgazowania odpadów gumowych oraz powietrza do spalania gazu procesowego (fot. 3). Regulacja wydatku powietrza odbywa się przy użyciu przepustnic ręcznych.

Palnik pilotowy

Palnik pilotowy jest typowym palnikiem stosowanym w kotłach grzewczych. W instalacji zastosowano palnik olejowy o regulowanej mocy 10÷25 kW opalany olejem opałowym lekkim.

Butle z azotem

Butle z ciekłym azotem są stosowane w sytuacjach awaryjnych, gdy jest wymagane ugaszenie procesu zgazowania.



Fot. 3. Wentylator promieniowy doprowadzający powietrze do zgazowania odpadów i spalania gazu procesowego

Phot. 3. Centrifugal fan supplying air for waste gasification and process gas combustion

5. METODYKA POMIARÓW

5.1. Pomiary emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych ze spalania gazu procesowego

Pomiary stężeń i emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych przeprowadzono na podstawie norm [4, 5] i normy PN-G-04571:1998 w zakresie oznaczania zawartości pierwiastka węgla w pyłe oraz Zarządzenia [6].

Analizę zawartości węglowodorów alifatycznych i aromatycznych wykonano chromatografem gazowym VARIAN GC 3600 z detektorem FID.

Lokalizacja przekrojów pomiarowych

Pomiaru ciśnienia, aspiracji pyłu i poboru próbek gazu dokonano w istniejących przekrojach pomiarowych. Rozmieszczenie przekrojów pomiarowych w obrębie instalacji przedstawiono na rysunku 1.

5.2. Analiza składu stałych produktów procesu zgazowania odpadów gumowych

Produktami stałymi procesu zgazowania odpadów gumowych jest popiół oraz złom stalowy (kord opon samochodowych). Analizy składu produktów stałych wykonano w Akredytowanych Laboratoriach Głównego Instytutu Górnictwa. Poniżej przedstawiono zastosowaną aparaturę oraz metody oznaczeń produktów stałych procesu zgazowania.

Analiza popiołu:

- zawartość wilgoci analitycznej oraz popiołu określono analizatorem firmy LECO MAC-500, zgodnie z normą PN-G-04560:1998,
- zawartość siarki całkowitej i popiołowej określono analizatorem firmy LECO SC-132, zgodnie z normą PN-93/G-04514.17,
- zawartość pierwiastków H, N określono analizatorem firmy LECO CHN-600, zgodnie z normą PN-G-04571:1998,
- zawartość siarki pirytowej oraz siarczanowej określono zgodnie z normą PN-G-04582:1997,
- zawartość chloru określono zgodnie z normą PN-G-04534:1999,
- zawartość pierwiastka węgla określono analizatorem wykonanym w Przemysłowym Instytucie Elektroniki, zgodnie z normą PN-G-04571:1998.

Analiza składu metali w złomie stalowym:

- metodą spektrometrii emisyjnej z plazmą wzbudzoną indukcyjnie (ICP).

5.3. Analiza składu gazu procesowego

Podczas procesu zgazowania gaz procesowy aspirowano w celu określenia składu chemicznego, pod kątem zawartości części palnych wpływających na jego wartość opałową. Aspiracji dokonano w przekroju pomiarowym S1 (rys. 1).

Oznaczeń dokonano w akredytowanym Laboratorium Analiz Związków Organicznych GIG metodą chromatografii gazowej przy użyciu chromatografu gazowego Varian GC 3600 (detektor TCD i FID połączone szeregowo).

5.4. Badania warunków pracy

W celu określenia zgodności warunków pracy na stanowisku obsługi instalacji zgazowania odpadów gumowych na hali na terenie Przedsiębiorstwa JUPOL, z wymaganiami zawartymi w normach, przeprowadzono badania stężeń i natężeń czynników szkodliwych w zakresie:

- zapylenia,
- stężenia tlenku węgla i dwutlenku siarki,
- parametrów mikroklimatu umiarkowanego.

Badania stężenia pyłu

Badania wykonano metodą dozymetrii indywidualnej według norm [7, 8]. Próbkę powietrza pobierano za pomocą pompki osobistych SKC mod. 224-52. W przypadku pyłu respirabilnego pompki wyposażone były w cyklon.

Pobieranie próbek i oznaczenie stężenia tlenku węgla i dwutlenku siarki

Próbki pobierano do worków tedlera i płuczek, zgodnie z wymaganiami zawartymi w procedurach i normach. Analizę próbek wykonano w akredytowanym Laboratorium Analiz Gazów GIG, gdzie oznaczono:

- tlenek węgla – metodą GC przy użyciu aparatu VARIAN GC-3600 z detektorem FID i kolumną kapilarną,
- dwutlenek siarki – metodą turbidymetryczną według PN-Z-04015-4.

Badania mikroklimatu umiarkowanego

Badania wykonano według normy PN-87/N-08016. Parametry mikroklimatu umiarkowanego na stanowiskach pracy określano za pomocą miernika środowiska cieplnego, produkcji OBR ZAP Łódź, w czasie zmiany roboczej.

5.5. Badania hałasu

Określano wpływ hałasu emitowanego z instalacji badawczej na klimat akustyczny w jej otoczeniu. Pomiary wykonano miernikami poziomu dźwięku typu 2236 i 2231 produkcji firmy Bruel&Kjaer.

6. PRZEBIEG BADAŃ

Procesowi utylizacji poddano opony samochodowe o masie 225 kg i składzie chemicznym przedstawionym w tablicy 1.

Tablica 1. Parametry odpadów gumowych poddanych procesowi termicznej utylizacji

Wyszczególnienie	Wartość
wilgoć, %	0,83
popiół, %	5,11
węgiel, %	82,41
wodór, %	6,80
azot, %	0,79
siarka całkowita, %	1,85
ciepło spalania, kJ/kg	36 860
wartość opałowa, kJ/kg	35 355

Badania nad zgazowaniem odpadów gumowych składały się z następujących etapów:

- Załadunek reaktora odpadami gumowymi – oponami samochodowymi o masie 225 kg.
- Uruchomienie palnika pilotowego w komorze spalania (kocioł odzysknicy) oraz otwarcie przepustnicy w celu doprowadzenia powietrza do spalania paliwa pomocniczego (olej opałowy).
- Inicjacja fazy spalania odpadów za pomocą materiałów rozpałkowych.
- Uruchomienie wentylatora, doprowadzającego powietrze do procesu zgazowania, przy pełnym otwarciu przepustnic powietrza:
 - w przekroju pomiarowym S2 dokonano pomiaru emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych (faza inicjacji procesu).

- Zmniejszenie ilości powietrza dostarczanego do reaktora (w momencie uzyskania temperatury w reaktorze 300 °C) poprzez ręczne przemykanie przepustnic, a następnie zwiększanie ilości powietrza doprowadzanego do kotła w celu spalania gazu procesowego (faza zgazowania). W fazie zgazowania:
 - wykonano pomiary emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych,
 - pobrano próbki gazu procesowego.
- Chłodzenie reaktora powietrzem do zgazowania po zakończeniu procesu utylizacji odpadów (temperatura w reaktorze poniżej 200 °C).
- Usunięcie stałej pozostałości po zgazowaniu z reaktora, przy czym:
 - złom stalowy o masie 35,4 kg poddano analizie pierwiastkowej,
 - popiół o masie 11,8 kg poddano analizie fizykochemicznej.

7. WYNIKI POMIARÓW

7.1. Emisja zanieczyszczeń pyłowo-gazowych ze spalania gazu procesowego

Wyniki analiz składu chemicznego gazu procesowego, stanowiącego gazowy produkt zgazowania odpadów gumowych przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Skład gazu procesowego

Wyszczególnienie	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
CO, %	21,24	20,91	16,8
H ₂ , %	1,96	1,81	0,95
CH ₄ , %	0,07	0,08	0,04
C _n H _n , %	0,01	0,02	0,01
O ₂ , %	2,2	2,4	6,4
CO ₂ , %	5,9	5,1	4,9
N ₂ , %	68,6	69,7	70,9
wartość opałowa, kJ/m ³	2930	2884	2249

Zgodnie z „Prawem o odpadach” z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz.U. Nr 62) instalacja do termicznej utylizacji odpadów gumowych musi spełniać wymagania stawiane spalarniom odpadów komunalnych, przez które rozumie się urządzenia techniczne używane do spalania odpadów komunalnych, odpadów podobnych do komunalnych innych niż niebezpieczne lub gazowych produktów pirolizy tych odpadów.

Zbiorcze zestawienie wyników pomiarów emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych zestawiono w tablicy 3.

W tablicy 4 zawarto porównanie ilości normowanych substancji zanieczyszczających z wartościami dopuszczalnymi określonymi w Rozporządzeniu Ministra

Środowiska z dnia 30 lipca 2001 r. „w sprawie wprowadzania do powietrza substancji zanieczyszczających z procesów technologicznych i operacji technicznych”.

Tablica 3. Stężenia i wielkość emisji zanieczyszczeń z emitora instalacji termicznej utylizacji odpadów gumowych

Wyszczególnienie	Faza spalania (rozruch)		Faza zgazowania					
	stężenie mg/m ³	emisja kg/h	pomiar 1		pomiar 2		pomiar 3	
			stężenie mg/m ³	emisja kg/h	stężenie mg/m ³	emisja kg/h	stężenie mg/m ³	emisja kg/h
pył całkowity	329,3	0,1681	120,3	0,0466	143,5	0,0573	130,2	0,0536
CO	85,6	0,044	61,9	0,024	63,8	0,025	66,3	0,027
NO _x ¹⁾	152,8	0,078	110,6	0,043	111,2	0,044	104,5	0,043
SO ₂	2133,6	1,089	1999,1	0,774	1952,0	0,779	1746,0	0,719
węglowodory aromatyczne	0,021	0,011 ²⁾	0,012	0,005 ²⁾	0,009	0,004 ²⁾	0,010	0,004 ²⁾
węglowodory alifatyczne	0,062	0,032 ²⁾	0,028	0,011 ²⁾	0,027	0,011 ²⁾	0,031	0,013 ²⁾
chlorki Cl ⁻			21,2	0,008	18,2	0,007	23,4	0,010
węgiel elementarny			9,6	0,004	11,5	0,005	14,1	0,006

¹⁾ NO_x – 100% NO

²⁾ g/m³

Tablica 4. Porównanie ilości substancji zanieczyszczających ze spalania odpadów w mg/m³ w suchych gazach odlotowych w warunkach normalnych, przy zawartości 11% tlenu w spalinach z wartościami dopuszczalnymi

Wyszczególnienie	Wartość uśredniona z trzech serii pomiarowych	Wartość dopuszczalna ¹⁾
pył całkowity	193	200
tlenek węgla	94	100
węgiel elementarny	15	20
chlorowodór	31	250
dioksyne i furany	nie oznaczono	0,1 ²⁾

¹⁾ wartość dopuszczalna dla zdolności przerobowej spalarni mniejszej niż 1 Mg odpadów w ciągu godziny,

²⁾ g/m³

Wszystkie normowane substancje, z wyjątkiem nieoznaczonych dioksyn i furanów, które będą przedmiotem odrębnych badań, nie przekraczają dopuszczalnych norm.

W celu określenia wpływu wszystkich emitowanych substancji na stan środowiska, zgodnie z Ustawą z dnia 27.04.2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. nr 62 z dnia 20 czerwca 2001 r., poz. 627) oraz Rozporządzeniem z dnia 3.09.1998 r. w sprawie metod obliczania zanieczyszczenia powietrza dla źródeł istniejących i projektowanych (Dz.U. nr 122, poz. 805) wykonano obliczenia rozprzestrzeniania się wszystkich zanieczyszczeń, tj. normowanych i pozostałych oznaczonych w gazach odlotowych oraz dokonano porównania emisji zanieczyszczeń z wartościami dopuszczalnymi określonymi w Rozporządzeniu MOŚZNiL z dnia 28.04.1998 r. w sprawie

dopuszczalnych wartości stężeń substancji zanieczyszczających powietrze (Dz.U. nr 55, poz. 355).

W tablicy 5 zestawiono wartości dopuszczalnych stężeń zanieczyszczeń w powietrzu dla substancji emitowanych przez emitory instalacji.

Tablica 5. Dopuszczalne wartości stężeń pyłu w powietrzu

Wyszczególnienie	Stężenie, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	30 min.	roczne
pył zawieszony PM10	280	50
SO ₂	500	40
NO ₂	500	40
CO	20000	2000
węgiel elementarny	150	8
węglowodory alifatyczne	3000	1000
węglowodory aromatyczne	1000	43
chlorowodór	200	25

Obliczenia rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń przeprowadzono za pomocą programu „KOMIN” atest IOS nr NP/144/86 z dnia 21.11.1986 r.

Wyniki obliczeń rozprzestrzeniania oraz porównanie wartości stężeń maksymalnych chwilowych i średniorocznych z odpowiednimi wartościami dopuszczalnymi przedstawiono na zestawieniu zbiorczym w tablicy 6.

Tablica 6. Wyniki obliczeń rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń pyłowo-gazowych

Zanieczyszczenie	0,8 D ₃₀ – R, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dop.	S _{mm} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	D ₃₀ – R, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dop.	S _{xm} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	S _{99,8} , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	D _a – R, $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dop.	S _a , $\mu\text{g}/\text{m}^3$
pył zawieszony PM 10	156	21,4	212	21,3	1,5	< 0	0,01
SO ₂	364	275,7	464	275,3	36,7	4	0,21
NO ₂	365	30,0	465	30,0	3,3	5	0,02
CO	14730	10,9	18730	10,9	1,3	730	0,01
węgiel elementarny	120	4,1	150	4,1	0,3	8	0,002
węglowodory alifatyczne	2400	0,8x10 ⁻⁵	3000	0,008	0,001	1000	<0,001
węglowodory aromatyczne	800	0,3x10 ⁻⁵	1000	0,003	<0,001	43	<0,001
chlorowodór	160	2,7	200	2,7	0,2	25	0,001

Instalacja zgazowania odpadów gumowych ze spalaniem powstałego gazu procesowego spełnia warunki i wymagania w zakresie emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych do powietrza.

7.2. Analiza składu produktów stałych procesu zgazowania odpadów gumowych

Po zakończeniu procesu zgazowania odpadów gumowych o łącznej masie 225 kg z reaktora usunięto pozostałości stałe, będące w myśl Prawa o odpadach z dnia 27

kwietnia 2001 r. (Dz.U. Nr 62 – poz. 628) „odpadami z termicznego przekształcania odpadów”, w postaci:

- złomu stalowego (kod 19 01 02) o masie 35,4 kg,
- popiołu paleniskowego (kod 19 01 12) o masie 11,8 kg.

Analiza składu pierwiastkowego złomu stalowego

Analiza składu chemicznego kordu stalowego, której wyniki przedstawiono w tablicy 7, potwierdza możliwość wykorzystania w procesach metalurgicznych.

Tablica 7. Skład metali w złomie stalowym, stanowiącym produkt zgazowania opon samochodowych

Wyszczególnienie	Zawartość
Fe, %	98,0000
Cr, %	0,0414
Cu, %	0,5285
Mn, %	1,2650
Mo, %	0,0035
Ni, %	0,0513
Pb, %	0,0038
Zn, %	0,3033

Analiza składu fizykochemicznego popiołu

Zgodnie z Prawem o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r. (Dz.U. Nr 62 – poz. 628) oraz Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 27 września 2001 r. w sprawie katalogu odpadów, popioły i żużle powstałe w wyniku termicznej utylizacji odpadów gumowych nie stanowią odpadu niebezpiecznego i deponowane mogą być na składowiskach odpadów komunalnych jako materiał inertny. Udział popiołu w masie opon poddanych termicznej utylizacji stanowi około 5%. Wyniki analizy składu fizykochemicznego przedstawiono w tablicy 8.

Tablica 8. Wyniki analizy składu fizykochemicznego popiołu paleniskowego powstałego ze zgazowania odpadów gumowych

Wyszczególnienie	Zawartość
wilgoć, %	0,25
popiół, %	90,20
siarka całkowita, %	3,16
siarka pirytowa, %	0,13
siarka siarczanowa, %	2,86
siarka popiołowa, %	2,56
siarka palna, %	0,60
siarka organiczna, %	0,17
chlor, %	0,88
węgiel, %	9,80
wodór, azot, tlen, %	0,0

7.3. Wyniki badań warunków pracy

Oznaczenia stężenia pyłu całkowitego i respirabilnego

Badania stężenia pyłu całkowitego i respirabilnego przeprowadzono na stanowiskach obsługi instalacji zgazowania odpadów gumowych. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 9.

Tablica 9. Wyniki pomiarów stężeń pyłu w środowisku pracy

Wydział-stanowisko okoliczności pomiaru	Stężenie pyłu mg/m ³	
	całkowity	respirabilny
instalacja zgazowania – <u>aparatomy 1</u> prace przygotowawcze, załadunek reaktora, ustalenie parametrów, nadzór nad przebiegiem próby, rozładunek reaktora, prace porządkowe	1,56	0,26
instalacja zgazowania – <u>aparatomy 2</u> prace przygotowawcze, załadunek reaktora, ustalenie parametrów, nadzór nad przebiegiem próby, rozładunek reaktora, prace porządkowe	0,67	0,31

Ocenę higieniczną stanowisk pracy przeprowadzono zgodnie z Rozporządzeniem MPiPS z dnia 17.06.1998 r. i 2.01.2001 r. oraz normą PN-89/Z-04008/07. Obliczone wyniki w formie wskaźników ekspozycji oraz obowiązujące wartości NDS zestawiono w tablicy 10.

Tablica 10. Ocena higieniczna stanowiska pracy, dotycząca pyłu

Nazwa czynnika	Stanowisko	Zawartość wolnej krzemionki krystalicznej, %	NDS, mg/m ³		W ¹⁾ , mg/m ³		W/NDS
			Pył całkowity	Pył respirabilny	Pył całkowity	Pył respirabilny	
nietrujące pyły przemysłowe, w tym zawierające wolną krzemionkę krystaliczną poniżej 2%	Aparatomy 1	poniżej oznaczenia	10,0	–	1,56	0,26	0,15
	Aparatomy 2	poniżej oznaczenia	10,0	–	0,67	0,31	0,067

¹⁾ Wartości zmierzone.

W dniu pomiarów nie stwierdzono przekroczeń stężeń pyłu w stosunku do obowiązujących wartości NDS.

Oznaczenia stężenia tlenku węgla i dwutlenku siarki

Wyniki analiz próbek powietrza ze stanowiska obsługi instalacji do zgazowania odpadów gumowych pobrano w dniu 26.10.2001 r. Ocenę higieniczną stanowisk

pracy przeprowadzono zgodnie z rozporządzeniem MPiPS z dnia 17.06.1998 r. i 2.02.2000 r. oraz normą PN-89/Z-04008/07. Obliczone wyniki w formie wskaźników ekspozycji oraz wartości NDS zestawiono w tablicy 11.

Tablica 11. Ocena higieniczna stanowiska pracy, dotycząca CO i SO₂

Stanowisko	Substancja	Wartości dopuszczalne mg/m ³			W ¹⁾ , mg/m ³	$\frac{W^{1)}}{NDS}$
		NDS	NDSch	NDSP		
Aparatowy 1	Tlenek węgla	30,0	180,0	-	1,25	0,04
Aparatowy 2	Dwutlenek siarki	2,0	5,0	-	0,25	0,125

¹⁾ Wartości zmierzone.

$$\text{Wskaźnik łączny: } \Sigma \frac{W}{NDS} \text{ aparatowy 1 i 2} = 0,165$$

Z przedstawionych danych i obliczeń wynika, że w dniu pomiarów na stanowiskach pracy nie stwierdzono przekroczenia obowiązujących dopuszczalnych stężeń badanych substancji chemicznych.

Badania mikroklimatu umiarkowanego

Badania przeprowadzono na stanowiskach zlokalizowanych w pomieszczeniu w którym znajduje się instalacja badawcza. Wyniki badań przedstawiono w tablicy 12.

Tablica 12. Wyniki badań mikroklimatu umiarkowanego na stanowiskach pracy przy instalacji termicznej utylizacji odpadów gumowych

Wyszczególnienie	Wartości		
	1 góra	2 środek	3 dół
oddział/stanowisko	instalacja badawcza – aparatowy 1 i 2		
ciepłochronność odzieży, clo	–	120	–
metabolizm, W/m ²	–	0,7	–
przewidywana średnia ocena PMV	–	0,33	–
przewidywany procent niezadowolonych PPD	–	7	–

Ocenę higieniczną stanowisk pracy przeprowadzono zgodnie z normą PN-85/N-08013 „Środowiska termiczne umiarkowane. Określenie wskaźników PMV i PPD i wymagań dotyczących komfortu cieplnego”. Wyznaczane wskaźniki PMV (przewidywana średnia ocena) i PPD (przewidywany procent niezadowolonych) charakteryzują odczucia termiczne i określają w jakim stopniu zapewniony jest komfort termiczny na stanowisku pracy lub w pomieszczeniu. Zaleca się, aby wskaźnik PPD był niższy niż 10 %, co odpowiada kryterium dla PMV:

$$-0,5 < PMV < +0,5$$

Z danych zawartych w tablicy 12 wynika, że na stanowiskach na których przeprowadzono badania, w dniu pomiarów wskaźniki PPD i PMV mieściły się w zalecanych granicach.

7.4. Wyniki badań hałasu

W zakresie ochrony akustycznej podstawę oceny dopuszczalnego poziomu hałasu na terenie o określonym charakterze zagospodarowania stanowi Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 13 maja 1998 roku (Dz.U. Nr 66 poz. 436). Dotyczy ono wartości równoważnego poziomu dźwięku, który występuje w godzinach pomiędzy 6⁰⁰–22⁰⁰ oraz 22⁰⁰–6⁰⁰.

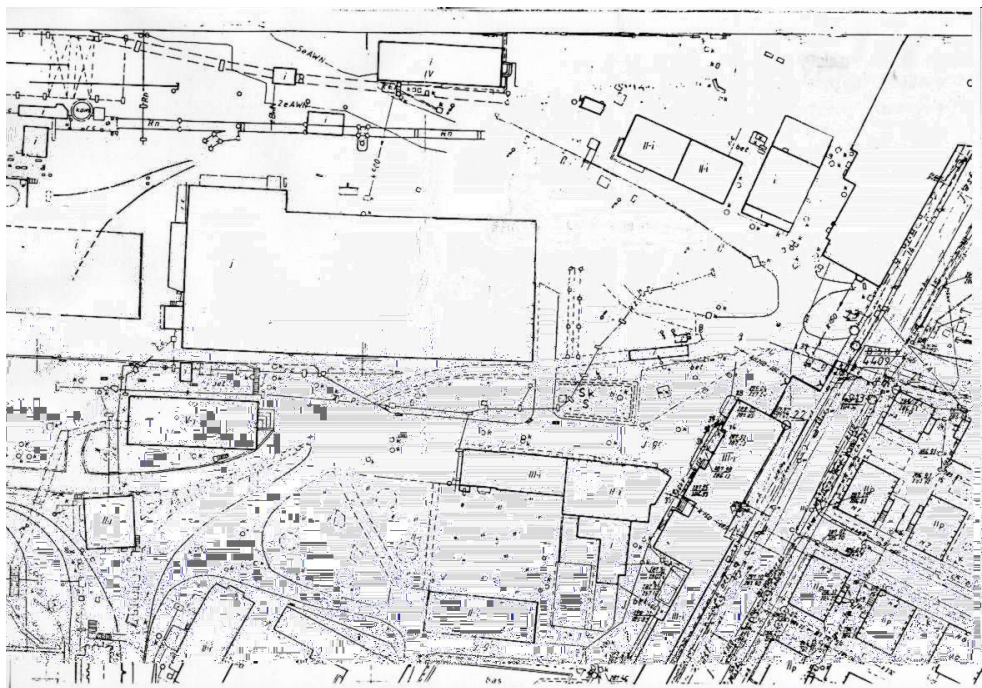
O klasyfikacji danego terenu decydują lokalne plany zagospodarowania przestrzennego oraz decyzje organów administracji państwowej. W rozpatrywanym przypadku przyjęto dla najbliższych terenów chronionych – punkt 3a tablicy 1 załącznika do Rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa – następujące dopuszczalne równoważne poziomy dźwięku:

- w porze dziennej 50 dB,
- w porze nocnej 40 dB.

Pomiary wykonano w porze dziennej i nocnej miernikami poziomu dźwięku typu 2236 i 2231 produkcji firmy Bruel & Kjaer umieszczonymi każdorazowo na statywie, na wysokości około 1,5 metra od powierzchni gruntu. Punkty pomiarowe, których lokalizację przedstawiono na rysunku 2 znajdowały się:

- na granicy terenu zajmowanego przez Zakład – punkt 1,
- na granicy terenów podlegających ochronie – budynek nr 5 przy ulicy Konstytucji, punkt pomiarowy 2.

W każdym punkcie dokonano kilku serii pomiaru wartości równoważnego poziomu dźwięku A. Czas pojedynczego pomiaru zależał od możliwości wyeliminowania wpływu zakłóceń zewnętrznych (tła pomiarowego) spowodowanych głównie ruchem samochodów po ulicy Konstytucji. Emisja hałasu do środowiska zewnętrznego odbywa się przez ścianę wschodnią, z pozostałych stron do pomieszczenia instalacji przylegają hale produkcyjne.



Rys. 2. Wyniki badań uciążliwości akustycznej: A – hala produkcyjna, B – lokalizacja instalacji, rejon źródła hałasu, C – tereny podlegające ochronie, D – granica Zakładu, 1, 2 – punkty pomiarowe

Fig. 2. Results of acoustic nuisance tests: H – production hall, B – localization of installation, noise source area, C – areas subject to protection, D – plant's boundary, 1, 2 – measuring points

Poziom dźwięku A w punktach emisji jest wypadkową wynikającą z propagacji fali akustycznej od źródeł rzeczywistych i pozornych. W obliczeniach uwzględniono poprawki na wpływ: odległości, ekranowania, pochłaniania przez powietrze, kierunkowości źródła.

Wyniki pomiarów:

- $L_{A,eq}$ – poziomu równoważnego dla określonego czasu pomiaru, (uśrednione dla kilkunastu pomiarów cząstkowych),
- $L_{A,max}$ – maksymalnego poziomu dźwięku w czasie działania hałasu, dla którego określono $L_{A,eq}$ przedstawiono w tablicy 13.

Tablica 13. Wyniki pomiarów poziomu dźwięku A emitowanego do środowiska zewnętrznego

Warunki prowadzenia pomiarów	Zmierzony poziom $L_{A,eq}$, dB(A)	Zmierzony poziom $L_{A,max}$, dB(A)
Granica Zakładu – punkt pomiarowy 1 – w czasie pracy wszystkich źródeł	49,6	55,2

Granica terenów chronionych – punkt pomiarowy 2 – w czasie pracy wszystkich źródeł	41,3	45,6
--	------	------

Wzajemną lokalizację przyjętych punktów obliczeniowych wraz z naniesioną izofoną 50 dB dla pory dziennej, przedstawiono na rysunku 2.

Na terenach podlegających ochronie akustycznej znajdują się budynki mieszkalne przy ulicy Konstytucji, odległe od rozpatrywanej hali o około 180 m w kierunku wschodnim.

Poziom równoważny dźwięku A emitowany przez instalację, dla ośmiu najbardziej niekorzystnych godzin dnia, na tym terenie (punkt nr 1) wynosi około 41 dB(A) i nie przekracza wartości dopuszczalnej 50 dB(A) w porze dziennej. Na poziom hałasu w rejonie najbliższej zabudowy mieszkaniowej, oprócz jego tłumienia związanego ze wzrostem odległości, ma także ekranujący wpływ istniejącego obiektu przylegającego do rozpatrywanej hali.

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że działalność instalacji nie powoduje występowania uciążliwości akustycznych w środowisku zewnętrznym.

Izolinia poziomu dopuszczalnego 50 dB(A) ogranicza obszar niestanowiący terenów podlegających ochronie.

8. WNIOSKI

1. Proces termicznej utylizacji 225 kg odpadów gumowych (opon samochodowych), przez ich zgazowanie ze spalaniem powstałego gazu procesowego w kotle grzewczym umożliwił redukcję masy odpadów o około 95%.
2. W wyniku zgazowania 225 kg opon samochodowych odzyskano 35,4 kg złomu stalowego, do wykorzystania w procesie metalurgicznym.
3. Analizowany proces termicznej utylizacji odpadów gumowych zapewnia dotrzymanie dopuszczalnych norm emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych, spełnia wymagania określone w Rozporządzeniu MOŚZNiL z dnia 28.04.1998 r. „w sprawie dopuszczalnych wartości stężeń substancji zanieczyszczających powietrze” w zakresie rozprzestrzeniania się w powietrzu zanieczyszczeń normowanych i pozostałych oznaczonych w gazach odlotowych. W celu dopuszczenia badanej instalacji do przemysłowego stosowania technologia wymaga wykonania pomiarów emisji dioksyn i furanów, i porównania z wartościami normatywnymi.
4. Przeprowadzone badania warunków pracy przy instalacji zgazowania odpadów gumowych:
 - w zakresie stężeń pyłu całkowitego, pyłu respirabilnego, tlenku węgla i dwutlenku siarki, wykazały dotrzymanie wartości NDS określonych w Rozporządzeniu MPiPS z dnia 17.06.1998 r i 2.01.2001 r.,

- w zakresie komfortu termicznego na stanowisku pracy mieszczą się w zalecanym zakresie – PMV = 0,33 (–0,5÷ +0,5), PPD = 7% (<10%)
- 5. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że działalność instalacji nie spowoduje wystąpienia uciążliwości akustycznych w środowisku zewnętrznym. Poziom równoważny dźwięku A emitowany przez instalację, dla ośmiu najbardziej niekorzystnych godzin dnia, na tym terenie (punkt nr 1) wynosi około 41 dB(A) i nie przekracza wartości dopuszczalnej 50 dB(A), w porze dziennej.

Literatura

1. Ćwięczek M.: *Bilans substancjalny i energetyczny procesu zgazowania odpadów gumowych*. Opracowanie układu kontrolno-pomiarowego do instalacji badawczej. Dokumentacja nr 15403000-321. Katowice, GIG 2000.
2. Ćwięczek M.: *Wpływ procesu zgazowania odpadów gumowych na emisję zanieczyszczeń do środowiska na instalacji badawczej*. Dokumentacja nr 15401001-321. Katowice, GIG 2001.
3. Devaux M.: *Energy Reclamation from Scrap Tyres*. Proceedings of the Tyre Recycling Conference. Bruksela 1996.
4. PN-94/04030/07 Pomiar stężenia i strumienia masy pyłów w gazach odlotowych metodą grawimetryczną.
5. PN-92/Z-04225.03 Badania zawartości chlorowodoru. Oznaczanie chlorowodoru metodą turbidymetryczną z pobieraniem próbek do płuczek.
6. Zarządzenie nr 69 GIOŚ z dnia 14.08.1992r. w sprawie wykonania pomiarów emisji zanieczyszczeń gazowych przenośnymi analizatorami spalin w zakresie emisji gazów odlotowych.
7. PN-91/Z-04030.05 Oznaczenie pyłu całkowitego na stanowiskach pracy metodą filtracyjno-wagową.
8. PN-91/Z-04030.06 Oznaczenie pyłu respirabilnego na stanowiskach pracy metodą filtracyjno-wagową.
9. Pyskło L., Parasiewicz W.: *Systemy utylizacji odpadów gumowych. Spalanie opon źródłem energii*. Piastów, IPG Stomil 1998.
10. Shaw D.: *Scrap Tyres: „Not a problem”*. European Rubber Journal 1998 nr 9, 24.

Recenzent: dr inż. Barbara Białecka

Joanna Pinińska

Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski

ZASTOSOWANIE BADAŃ NIENISZCZĄCYCH W WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ KLASYFIKACJI SKAŁ I MASYWÓW SKALNYCH

Streszczenie

W artykule przedstawiono poglądy na stosowanie i możliwości porównywania podstawowych klasyfikacji wytrzymałościowych skał oraz zaproponowano wykorzystanie wyników laboratoryjnych badań ultradźwiękowych jako głównego tła do ich kompleksowych porównań. Zamieszczono diagramy korelujące parametry badań *in situ* opisami makroskopowymi: odbojność, określoną młotkiem Schmidta i wskaźników GSI z gęstością objętościową, wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie próbek skalnych i prędkością propagacji falowej. Dane te charakteryzują główne odmiany litologiczne skał Polski i umożliwiają określenie tak cech masywu skalnego (*rock mass*), nienaruszonego elementu skalnego (*rock material*), jak i próbki laboratoryjnej (*rock*).

Przedstawione analizy bazują na zunifikowanych badaniach wytrzymałościowych, akustycznych i polowych, prowadzonych w Zakładzie Geomechaniki UW od ponad dwudziestu lat. Dane te są sukcesywnie gromadzone w Bazie Danych Geomechanicznych (BZG). Duże zbiory danych umożliwiły porównanie cech skał magmowych, osadowych i metamorficznych z różnych regionów Polski i wyznaczenie ogólnych tendencji zmian. W porównaniach zwrócono uwagę na szczególną rolę anizotropii i cech strukturalnych ośrodków skalnych, bez uwzględnienia których wyznaczanie szczegółowych tendencji korelacyjnych nie jest możliwe.

Application of non-destructive tests in rock and rock mass strength classification

Abstract

The article presents views on the application and comparison possibilities of basic rock strength classifications and proposes to use the results of ultrasonic laboratory tests as main background for their complex comparisons. Diagrams have been inserted, correlating the parameters of *in situ* tests with macroscopic descriptions: reboundability, measured by means of Schmidt's hammer and GSI indices with volumetric density, uniaxial compressive strength of rock samples and wave propagation velocity. These data characterize the main lithological forms of Poland's rocks and enable to determine both the features of rock mass, non-disturbed rock material, as well as rock laboratory sample.

The presented analyses are based on unified strength, acoustic and field tests, conducted in the Department of Geomechanics of UW from twenty years. The data are successively collected in the Geomechanical Data Base (BZG). Large data sets enabled to compare the features of magmatic, sedimentary, and metamorphic rocks from different regions of Poland and to determine general change tendencies. In comparisons attention was paid to the special role of anisotropy and structural features of rock media; without their regard the determination of detailed correlative tendencies is not possible.

1. WSTĘP

Skały, w odróżnieniu od gruntów, charakteryzują duże siły wiązań strukturalnych, których niszczenie następuje w sposób wyraźny. W szczególnie jednak sposób po

zniszczeniu nadal mogą przenosić znaczne obciążenia. W ich wytrzymałościowej klasyfikacji należy zatem uwzględniać nie tylko cechy skały nienaruszonej, lecz również cechy spękanego masywu skalnego. Geotechniczne klasyfikacje wytrzymałościowe skał są jednak bardzo różnorodne, ze względu na zróżnicowanie potrzeb inżynierskich. Stąd porównywanie wytrzymałości skał na podstawie zasad dostosowywanych do danej gałęzi budownictwa jest znacznie utrudnione. Pomimo bowiem, że w kompleksowych inżynierskich systemach klasyfikacyjnych skał wykorzystywana jest głównie charakterystyka wytrzymałościowa, z dominującym udziałem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, kryteria podziału na klasy wytrzymałościowe są niejednolite [16].

Podwaliny systemu klasyfikacji skał stworzył w roku 1908 Protodiakonow wydzielając 10 klas skał o różnej wytrzymałości, uzupełnionych opisem litologicznym. W latach sześćdziesiątych ubiegłego wieku do klasyfikacji wprowadzono również charakterystykę odkształcalności skały, opierając się na module sprężystości.

Podstawy klasyfikacji masywów skalnych stworzyli natomiast Deere i Miller [6], wprowadzając w latach siedemdziesiątych elementy wskaźnikowej oceny rozdrobnienia masywu skalnego, takie jak RQD lub rozstaw spękań. Pojawiły się wtedy także pierwsze klasyfikacje oparte na pomiarze prędkości propagacji fal w ośrodku skalnym [18, 22], lecz były one zbyt mało upowszechniane. Geotechniczne klasyfikacje skał i masywów skalnych bazujące na nowoczesnych nieniszczących pomiarach laboratoryjnych prędkości propagacji falowej w ośrodku skalnym z nawiązaniem do jego cech genetycznych i strukturalnych praktycznie są na świecie proponowane dopiero od przełomu ostatniego stulecia [19, 23].

Kamieniem milowym w ocenie cech masywów skalnych było wprowadzenie w latach siedemdziesiątych, przez E. Hoecka, „małych i dużych” nieciągłości kształtujących cechy ośrodków skalnych, czyli pojęć zaczerpniętych z geologii strukturalnej i odróżnienie cech skały (*rock*) od zespołu różnie skonfigurowanych jej bloków (*rock element*) [8].

W konsekwencji od tamtej pory narzucona została konieczność inżynierskiego klasyfikowania całych masywów skalnych, a nie tylko jego wybranych elementów. Powstały wtedy, klasyczne obecnie, kategoryzacje właściwości masywów skalnych według N. Bartona [1], których podstawę stanowią badania norweskie oraz Z. Bieniawskiego [2], wywodzące się z doświadczeń RPA. Opracowano także szereg klasyfikacji i norm branżowych oraz częściowych klasyfikacji regionalnych. Nie została jednak opracowana żadna formalna kompleksowa klasyfikacja wytrzymałościowa skał, a przedmiotem uzgodnień do dzisiaj pozostało znaczenie pojęć „skała” i „grunt” oraz granic ocen ich wytrzymałości.

Już w latach osiemdziesiątych R. Krajewski [13] proponował, aby grunt od skały rozróżniać na podstawie kryterium wytrzymałościowego i odporności na rozmakanie. Zgodnie z tym kryterium jako skałę należy traktować ośrodek geologiczny o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie $R_c > 1,0$ MPa i podatności na rozmakanie $> 0,5$. Zgodnie z normą PN-86/B- 02480 [21] za „grunt skalisty” uważa się natomiast grunt rodzimy lity, bądź spękany o nieprzesuniętych blokach (najmniejszy wymiar bloku > 10 cm), którego próbki nie wykazują zmian objętości ani nie rozmakają pod

działaniem wody destylowanej i mają wytrzymałość na ściskanie $R_c > 0,2 \text{ MPa}$ ”, a PN-84/B-01080 [20] „Kamień dla budownictwa i drogownictwa” wyróżnia klasy skał o różnej wytrzymałości – od bardzo małej < 15 do bardzo dużej $> 200 \text{ MPa}$. Tak więc pojęcia „grunt” i „skała” znajdują swe miejsce w mechanice gruntów i mechanice skał, ale nadal podział ten ma charakter zwyczajowy, a nie formalny i zakres podziału w zależności od normy waha się od $0,2$ do $1,5 \text{ MPa}$ [14].

Harmonizacja i unifikacja poglądów stała się zatem ważkim przedmiotem prac branżowych Komisji Europejskich. Prace te jednak posuwają się bardzo wolno, natrafiając na opór środowisk wykonawczych, które podchodzą do zagadnień unifikacji bardzo tradycyjnie.

Projekt CEN (Europejskiego Komitetu Normalizacji) w dokumencie ENV-1997-1 „Eurocode 7” pt. „Projektowanie geotechniczne cz. 1. Zasady ogólne” [5] zaleca stosowanie w klasyfikacji skał kompleksowego opisu geologicznego, bardzo rozbudowanego oznaczania parametrów fizyczno-mechanicznych, wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie, nie zajmuje się jednakże wyznaczaniem klas kategoryzacji. Pozytywnie jednak, jako novum zaleca laboratoryjną ocenę własności akustycznych ośrodka skalnego przez pomiar prędkości fal ultradźwiękowych.

Jednocześnie przez ISO (International Standard Organization) zostały przedstawione już dwie wersje projektu normy dla skał ISO/DIS 14689 pt. „Geotechnika w budownictwie – identyfikacja i opis skał”. W ostatniej z nich ISO/2000 [10] bardzo szeroko ujęty jest stan wiedzy i wyniki osiągnięć geotechnicznej praktyki międzynarodowej zawarte w pracach IAEG [9], ISRM [11], Bartona [1], Bieniawskiego [2], Browna [3] i wielu innych. Tak kompleksowy opis skał nie był dotychczas ujęty w żadnej normie międzynarodowej.

Według ISO granica między „skałą” a „gruntem” określana jest na podstawie kryterium wytrzymałościowego, zgodnie z którym grunt charakteryzuje wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie $R_c < 0,6 \text{ MPa}$. Pod terminem „skała” (rock) rozumiany jest naturalny zbiór minerałów, skonsolidowany i zcementowany lub związany ze sobą tak, że jego wytrzymałość jest większa niż wytrzymałość gruntu. Pod terminem „masyw skalny” (rock mass) rozumiana jest skała in situ wraz z nieciągłościami i profilem wietrzeniowym. Pod terminem „materiał skalny” (rock material) rozumiana jest skała nienaruszona wewnątrz powierzchni nieciągłości.

Na podstawie kryterium wytrzymałościowego w propozycji ISO, w stosunku do klasyfikacji Deere’a i Millera [6], zwiększono liczbę klas wytrzymałości z 5 do 7 i nawiązano do klasyfikacji Browna [3]. Według ISO wyróżnia się następujące klasy skał: wyjątkowo mocne, bardzo mocne, mocne, średnio mocne, średnio słabe, słabe i bardzo słabe. Terminy te nie znajdują jednak odzwierciedlenia w innych klasyfikacjach.

Krótki przegląd głównych geotechnicznych klasyfikacji skał i masywów skalnych wskazuje, że podstawę większości stosowanych w praktyce inżynierskiej klasyfikacji stanowią, co prawda podobne kryteria, takie jak wytrzymałość próbki skalnej, odkształcalność, ocena stopnia spękania masywu, szorstkość powierzchni spękań, warunki zawodnienia, lecz w większości z nich granice kategorii są różne i ostateczna kompleksowa ocena wytrzymałościowa jest mało porównywalna.

Równocześnie mimo, że wspomniane klasyfikacje są obecnie bardzo złożone i zawierają skomplikowane, rozbudowane opisy geologiczne, nie przewiduje się ich powszechnego stosowania, do kategoryzacji wytrzymałościowej, laboratoryjnych metod ultradźwiękowych, które łatwiej niż inne można transformować z warunków laboratoryjnych na ekwiwalentne parametry spękanego masywu skalnego o ile dysponuje się prawidłowo sporządzonym opisem makroskopowym.

Wydaje się zatem, że w istniejącej sytuacji rozproszenia i niejasności pojęć co do granic klasyfikacyjnych i metod badawczych, należy w większym zakresie stosować identyfikacyjne badania akustyczne i na ich podstawie dążyć do wskaźnikowych regionalnych ocen masywu skalnego [17].

2. UWAGI METODYCZNE

Badania cech ośrodków skalnych przy zastosowaniu technik ultradźwiękowych mają w Polsce blisko pięćdziesięcioletnią tradycję. Pomiary czasu przejścia fal sprężystych o dużej częstotliwości wprowadził Kołtoński [12], a szersze ich upowszechnienie w laboratoriach nastąpiło w końcu lat siedemdziesiątych [15].

Zaletą badań ultradźwiękowych jest nieniszczący charakter pomiarów. W próbie o znanej gęstości można oznaczyć stałe sprężystości materiału: moduł sprężystości dynamicznej E_d i dynamiczny współczynnik Poissona ν_d oraz skojarzone z nimi moduły sprężystości postaciowej G_d i objętościowej K_d na podstawie pomiaru prędkości fali podłużnej V_p oraz poprzecznej V_s lub powierzchniowej V_R [15].

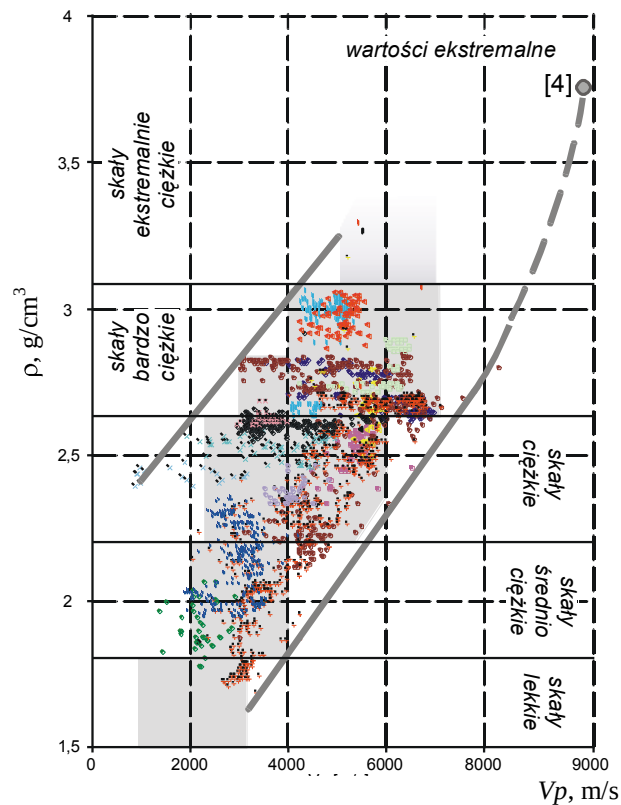
Określenie związku prędkości fali z wytrzymałością skały jest możliwe na drodze empirycznej. Utraty wytrzymałości w skałach, w wyniku procesów kruchego pękania i przejścia materiału próbki skalnej ze stanu quasi-ciągłego w nieciągły, nie można bowiem bezpośrednio ująć formułami teorii sprężystości. Równocześnie wiadomo, że prędkość fali w głębokich partiach litosfery lub w badaniach in situ jest często jedynym wskaźnikiem oceny gęstości i mineralnego składu magmy, ustalany również na drodze empirycznej.

Dzięki dużym zbiorom danych, uzyskanych z wieloletnich badań wytrzymałościowych, akustycznych i polowych, gromadzonych sukcesywnie w Bazie Danych Geomechanicznych (BDG) Zakładu Geomechaniki Uniwersytetu Warszawskiego, można było powiązać empirycznie i porównać prędkość fali podłużnej z gęstością i wytrzymałością skały oraz wskaźnikowymi parametrami polowymi strukturalnej i wytrzymałościowej zmienności masywu skalnego o dużej różnorodności litologicznej. Dane te były bowiem oznaczone na podstawie zunifikowanej laboratoryjnej metodyki badawczej.

Jak stwierdzono, prędkość podłużnych fal ultradźwiękowych w niezwiędniętych skałach litych Polski, badana w warunkach laboratoryjnych na znormalizowanych próbkach o średnicy 5 cm i smukłości 1, zmienia się w zakresie od 1400 do 7100 m/s, gęstość objętościowa w zakresie od 1,5 do ponad 3 g/cm³, a wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe od kilku MPa do blisko 400 MPa.

Generalny trend korelacyjny tych parametrów sporządzony dla dużych zbiorów wskazuje, że wzrost gęstości oraz związanej z jej zmianą wytrzymałości ośrodka

skalnego wraz ze wzrostem prędkości fali podłużnej charakteryzuje znaczny przedział zmienności (rys. 1).



Rys. 1. Zmienność prędkości fali podłużnej V_p w skałach Polski w zależności od klasy gęstości objętościowej skały ρ . Wydzielenia klas gęstości wg PN-84/B-01080 uzupełnieniem klasy skał ekstremalnie ciężkich $>3,2 \text{ g/cm}^3$

Fig. 1. Variability of longitudinal wave velocity V_p in Poland's rocks, depending on the class of rock volumetric density ρ . Density class separation according to PN-84/B-01080 standard with supplement of class of extremely heavy rocks $>3,2 \text{ g/cm}^3$

Tak wzrost prędkości rozchodzenia się fal sprężystych, jak i wytrzymałości i gęstości skał, podstawowych elementów ich geotechnicznej charakterystyki, jest ograniczony warunkami brzegowymi. Znane z literatury skrajnie wysokie prędkości fali podłużnej, oznaczone laboratoryjnie dochodzą w warunkach pokojowych do 8100 m/s w eklogitach i w dunitach. W warunkach nawodnienia, wysokiego ciśnienia lub temperatury prędkości mogą być nieco wyższe. W eklogicie i dunitach po nawodnieniu prędkość wzrasta do 8400 m/s, a w temperaturze 200°C i przy ciśnieniu 5 kBa nawet do 8900 m/s. Gęstość pozorna tych skał dochodzi w takich warunkach do 3,74 g/cm³, a ich skrajna wytrzymałość na ściskanie osiąga wartość 450 MPa [4].

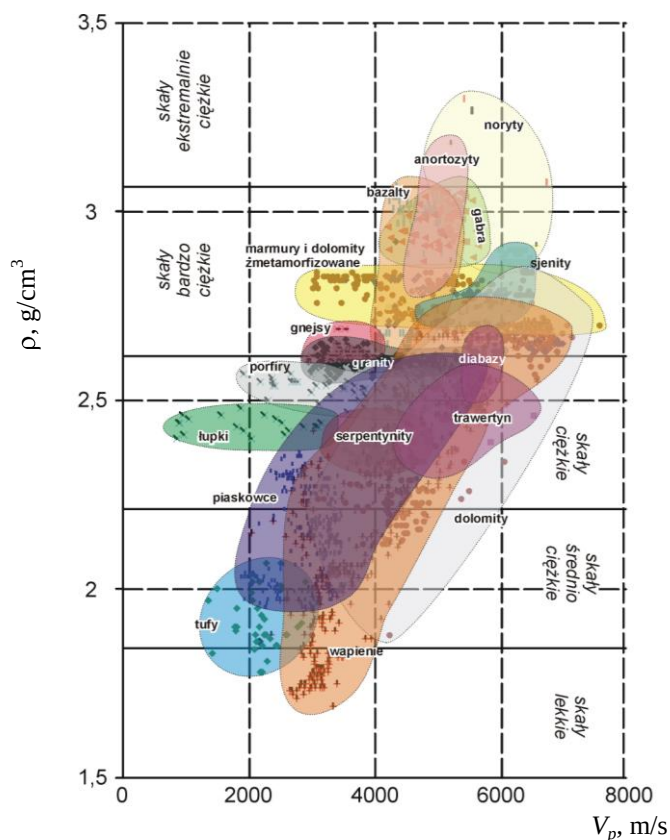
Na tym tle, ustalona na podstawie badań laboratoryjnych Zakładu Geomechaniki UW, zmienność parametrów geotechnicznych skał Polski jako całości odpowiada

ogólnemu założeniu, że im skała jest bardziej zwięzła i ma wyższą gęstość objętościową, tym szybciej rozchodzą się w niej sygnały ultradźwiękowe (rys. 1). Przy czym w skałach bardzo ciężkich zależność ta przybiera charakter wykładniczy i niewielki wzrost prędkości fali świadczy o znacznym wzroście gęstości ośrodka skalnego. Ograniczenie tego nieliniowego charakteru wzrostu wykazano dla warunków ekstremalnych, dla prędkości zbliżonych do 8000 m/s.

Przyjmując kategoryzację skał na klasy gęstości objętościowej ρ , zgodne z normą PN-84/B-01080 [20], można przyjąć dla skał lekkich przedział prędkości V_p od 1500 do 3000 m/s, średnio ciężkich od 2000 do 4000 m/s, ciężkich od 2300 do 6000 m/s, a bardzo ciężkich od 3000 do 7000 m/s.

Wydzielając dodatkowo klasę o gęstości ekstremalnej powyżej 3,2 g/cm³ należałoby charakteryzować ją prędkością zmieniającą się w zakresie od 5000 do > 8000 m/s.

Wydzielone klasy gęstości i przedziały prędkości są reprezentowane przez różne typy litologiczne skał, których obszary zmienności prędkości falowej są rozmyte i zachodzą na siebie nawzajem (rys. 2).



Rys. 2. Zmienność litologiczna zbadanych typów skał Polski na tle gęstości objętościowej ρ oraz prędkości fali podłużnej V_p

Fig. 2. Lithological variability of tested types of Poland's rocks against the background of their rock volumetric density ρ and longitudinal wave velocity V_p

Rozmyty charakter obszarów zmienności prędkości falowej i gęstości utrudnia zatem wyróżnienie odmian litologicznych znajdujących się na diagramie blisko siebie. W zakresie wysokich prędkości rzędu 6000 m/s trudne jest na przykład odróżnienie sjenitu od dolomitu, a w zakresie prędkości rzędu 4000 m/s granitu od wapienia.

Generalnie jednak, ocena prędkości fali podłużnej jest selektywnym kryterium klasyfikacji skał tak pod względem litologicznym, jak i pod względem ich gęstości i wytrzymałości, o ile spełnione są warunki pomiaru w ośrodku nieograniczonym oraz gdy przy interpretacji znane są lokalne defekty i inne wtórne czynniki geologiczne wpływające na zmianę pierwotnych właściwości skały. Szczególną uwagę należy zwracać na anizotropię, losowe przejawy mineralizacji oraz spękania, które zależnie od warunków należy wydzielić jako zbiór danych o nietypowo wysokich bądź niskich wartościach prędkości fali dla danej odmiany litologicznej. I tak na przykład w brekcjach wtórnie zmineralizowanych może zaznaczać się kierunkowe silne tłumienie fali, lecz wytrzymałości mogą być bardzo wysokie, a w łupkach kwarcytowych, mimo nieznacznych różnic gęstości, prędkość propagacji fali podłużnej V_p w zależności od kierunku badania w stosunku do uwarstwienia może się różnić nawet dwukrotnie. Podobny wpływ może mieć kierunkowy rozkład porów, kawern lub pęknięć w próbce skalnej. Zatem prędkości fal akustycznych powinny być interpretowane dla różnych kierunków pomiarów i na tle zmienności geologicznej. W badaniach laboratoryjnych dane takie są łatwe do uzyskania na podstawie analizy makroskopowej każdej próbki.

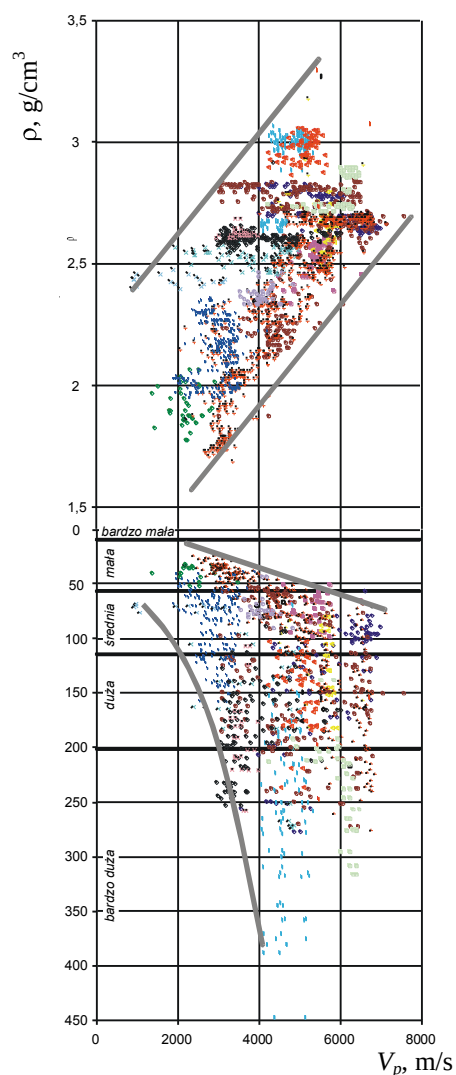
Gdy badania służą do oceny masywu skalnego, przy selekcji wyników konieczna jest identyfikacja kierunku ciosu i głównych struktur geologicznych w odniesieniu do osi próbki i kierunków pomiaru. Aby zatem poprawnie klasyfikować skały na podstawie identyfikacyjnych korelacji z wynikami badań ultradźwiękowych, należy badania prowadzić:

- na próbkach zorientowanych względem geometrii warstw, struktur tektonicznych i sedymentacyjnych oraz względem stron świata,
- w nie mniej niż dwóch wybranych, wzajemnie prostopadłych kierunkach, w odniesieniu do osi próbki laboratoryjnej,
- ze zwiększeniem liczby pomiarów przy każdej stwierdzonej makroskopowo zmienności litologicznej lub strukturalnej ośrodka,
- z zastosowaniem uzupełniających pomiarów tłumienia fali w wybranych kierunkach,
- przy uwzględnieniu ewentualnego wpływu dodatkowych czynników zewnętrznych, jak na przykład temperatury, nawodnienia, korozyjnego działania roztworów porowych, ciśnienia.

3. ASPEKTY KLASYFIKACYJNE

Gdy brak informacji o kierunku pomiarowym oraz o dodatkowych cechach zmienności strukturalnej ośrodka skalnego, przedziały zmienności prędkości falowej w obrębie klas wytrzymałościowych mogą być duże, aczkolwiek wyznaczają ogólną tendencję zmienności (rys. 3). Trudność i brak tradycji w interpretowaniu tego

rozrzutu na tle cech strukturalnych jest zapewne przyczyną małego zainteresowania zastosowaniem ultradźwiękowych technik badawczych do wytrzymałościowej klasyfikacji skał.



Rys. 3. Ogólny przedział zmienności gęstości objętościowej ρ i wytrzymałości R_c na tle zmienności prędkości fali podłużnej V_p

Fig. 3. General variability interval of volumetric density ρ and strength R_c against the background of variability of longitudinal wave velocity V_p

Stosując, bez odpowiedniej selekcji, podział na klasy wytrzymałościowe według normy PN-54/B-02480 [21] w klasie skał o wytrzymałości R_c średniej, można znaleźć skały o prędkości fali podłużnej V_p od <2000 do >6000 m/s, zależnie od warunków badania. Zatem skała o wytrzymałości w granicach 100 MPa może lokalnie wykazywać prędkości wyższe niż spotykane w skałach o dużej i bardzo dużej wytrzymałości.

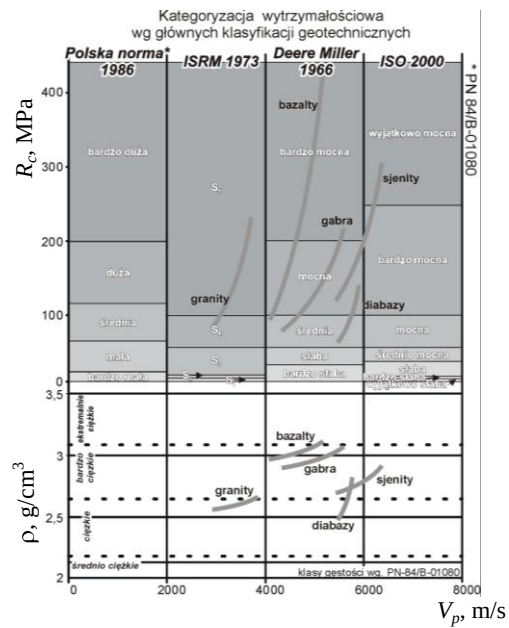
Z tej przyczyny w skałach anizotropowych o znanej litologii pomiary prędkości muszą być prowadzone w kilku kierunkach, a pojawianie się nietypowych prędkości musi być interpretowane na tle kierunku pomiarów wytrzymałości, powiązanego z charakterem anizotropii akustycznej skały.

W łupkach kwarcytowych, gnejsach oraz w zmetamorfizowanych i zdolomityzowanych skałach węglanowych obserwuje się na przykład wysokie prędkości fali wzdłuż powierzchni nieciągłości lub laminacji, czego nie odzwierciedla ocena wytrzymałości osłabionej spękaniami w tym kierunku. Kierunki pomiarów akustycznych muszą być zatem miarodajnie odniesione do kierunku badań wytrzymałościowych. Niezbędne jest również odróżnienie wytrzymałości pierwotnej od wtórnej.

Wyznaczanie związków korelacyjnych, łączących ultradźwiękowe pomiary laboratoryjne z wytrzymałością skał, wymaga więc dokładnego rozpoznania lokalnych czynników geologicznych wpływających tak na zmienność prędkości fal ultradźwiękowych, jak i wytrzymałości. Zmienność ta w naturalnych warunkach ośrodków skalnych jest efektem pierwotnych procesów litogenetycznych oraz lokalnych, bardzo zróżnicowanych procesów wtórnych, które tak w skali próbki, jak i w skali masywu można scharakteryzować wskaźnikiem GSI (Geological Strength Index) wprowadzonym przez Hoekka [7]. Na podstawie makroskopowych opisów geologicznych można wtedy ocenić na ile, w niejednorodnym, anizotropowym ośrodku skalnym, zmienny czas przejścia fali jest lokalnym wyrazem losowo zmiennej wytrzymałości ośrodka skalnego. O ile zatem pomiary czasu przejścia sygnałów ultradźwiękowych mają służyć do oceny wytrzymałości, muszą być odpowiednio selekcjonowane w nawiązaniu do charakteru niejednorodności ośrodka i celów badawczych.

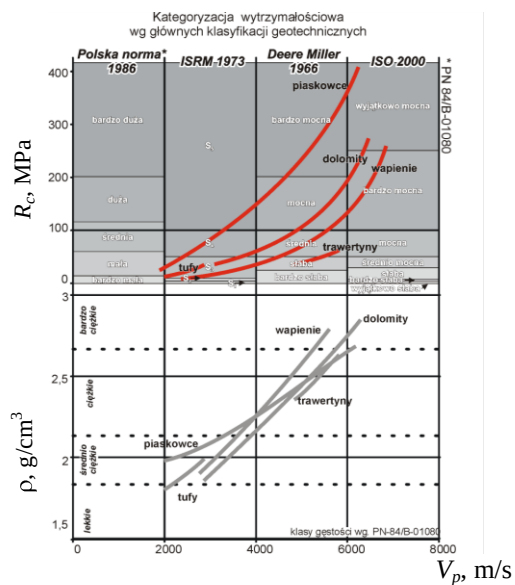
Szczegółowe zależności klasyfikacyjne należy tworzyć na tle tendencji ogólnych, charakteryzujących nie tylko zmienność prędkości falowej i wytrzymałości, lecz również gęstości ośrodka, w podziale litologicznym i genetycznym.

Poniżej przedstawiono generalne tendencje zmian prędkości fali podłużnej V_p w badanych skałach Polski na tle zmienności wytrzymałościowej R_c oraz gęstości objętościowej ρ . Na diagramach wyróżniono odrębne, swoiste zachowanie skał magmowych, osadowych i metamorficznych (rys. 4, 5 i 6). Ustalenia te przedstawiono porównawczo w odniesieniu do terminologii i przedziałów kategoryzacji stosowanych w głównych klasyfikacjach wytrzymałościowych Deere'a i Millera (1966), ISRM (1973), polskiej normy PN-86/B-02480 (86) oraz ISO (2000).



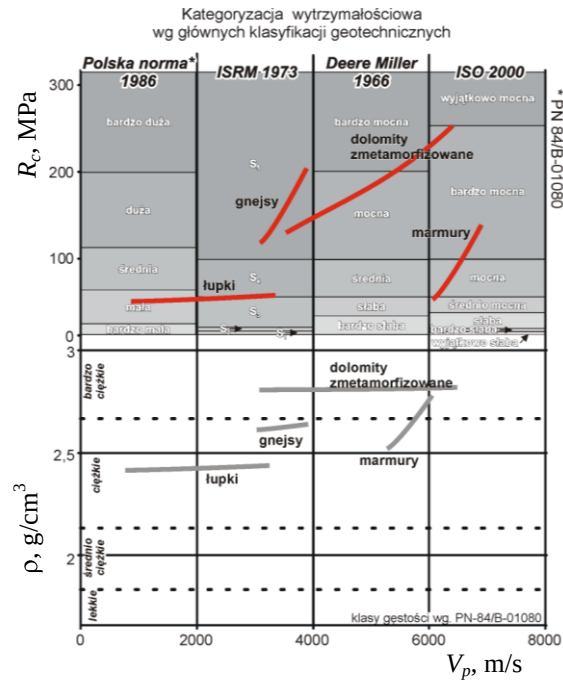
Rys. 4. Ogólny schemat zależności wytrzymałości na ściskanie R_c w skałach magmowych od prędkości fali podłużnej V_p oraz gęstości objętościowej ρ

Fig. 4. General scheme of dependence of compressive strength R_c in magmatic rocks on longitudinal wave velocity V_p and volumetric density ρ



Rys. 5. Ogólny schemat zależności wytrzymałości na ściskanie R_c w skałach osadowych od prędkości fali podłużnej V_p oraz gęstości objętościowej ρ

Fig. 5. General scheme of dependence of compressive strength in sedimentary rocks on longitudinal wave velocity V_p and volumetric density ρ



Rys. 6. Ogólny schemat zależności wytrzymałości na ściskanie R_c w skałach metamorficznych od prędkości fali podłużnej V_p oraz gęstości objętościowej ρ

Fig. 6. General scheme of dependence of compressive strength R_c in metamorphic rocks on longitudinal wave velocity V_p and volumetric density ρ

Charakterystyczną cechą **skał magmowych** jest wzrost prędkości fal sprężystych wraz ze wzrostem zasadowości ich składu magmowego. Zależność wytrzymałości na ściskanie R_c od prędkości fali V_p ma charakter wykładniczy, ale indywidualny dla poszczególnych odmian litologicznych. Istotną cechą tych zależności jest szybki wzrost wytrzymałości wraz ze wzrostem gęstości objętościowej i prędkości fali podłużnej (rys. 4).

Tak więc, szczególnie w klasach skał bardzo ciężkich, niewielkie różnice w ocenie prędkości i gęstości skał magmowych mogą skutkować zmianą kategoryzacji z klasy średniej wytrzymałości na klasę dużej, a nawet bardzo dużej wytrzymałości.

W **skałach osadowych** wzrost wytrzymałości sygnalizowany wzrostem prędkości zachodzi mniej gwałtownie niż w skałach magmowych. Jednakże wzrost obu tych parametrów świadczy o znacznym wzroście gęstości objętościowej ośrodka (rys. 5). Dolne zakresy prędkości i gęstości oraz wytrzymałości związane są ze skałami słabymi tak węglanowymi (margle, gezy, wapienie mszywiolowe), jak i okrucowymi (np. piaskowce o spoiwie żelazisto-ilastym). Zakresy górne dotyczą skał węglanowych ciężkich i bardzo ciężkich, głównie wapieni wtórnie zdolomityzowanych lub częściowo przeobrażonych oraz piaskowców kwarcytowych. Bardziej szczegółowa analiza tej zmienności wskazuje, że w piaskowcach wzrost wytrzymałości w klasie

bardzo dużej wytrzymałości jest sygnalizowany znacznie niższymi przyrostami prędkości niż w skałach węglanowych.

Cechą charakterystyczną skał **metamorficznych** jest zróżnicowanie prędkości fali zależnie od zawartości minerałów podstawowych. Skały o dużej zawartości krzemionów, jak na przykład łupki kwarcytowe czy gnejsy wskazują niższe parametry prędkości niż skały o składzie węglanowym, na ogół jednak wzrost parametrów wytrzymałościowych i falowych, z wyłączeniem marmurów, jest uwarunkowany niewielkimi zmianami gęstości objętościowej (rys. 6).

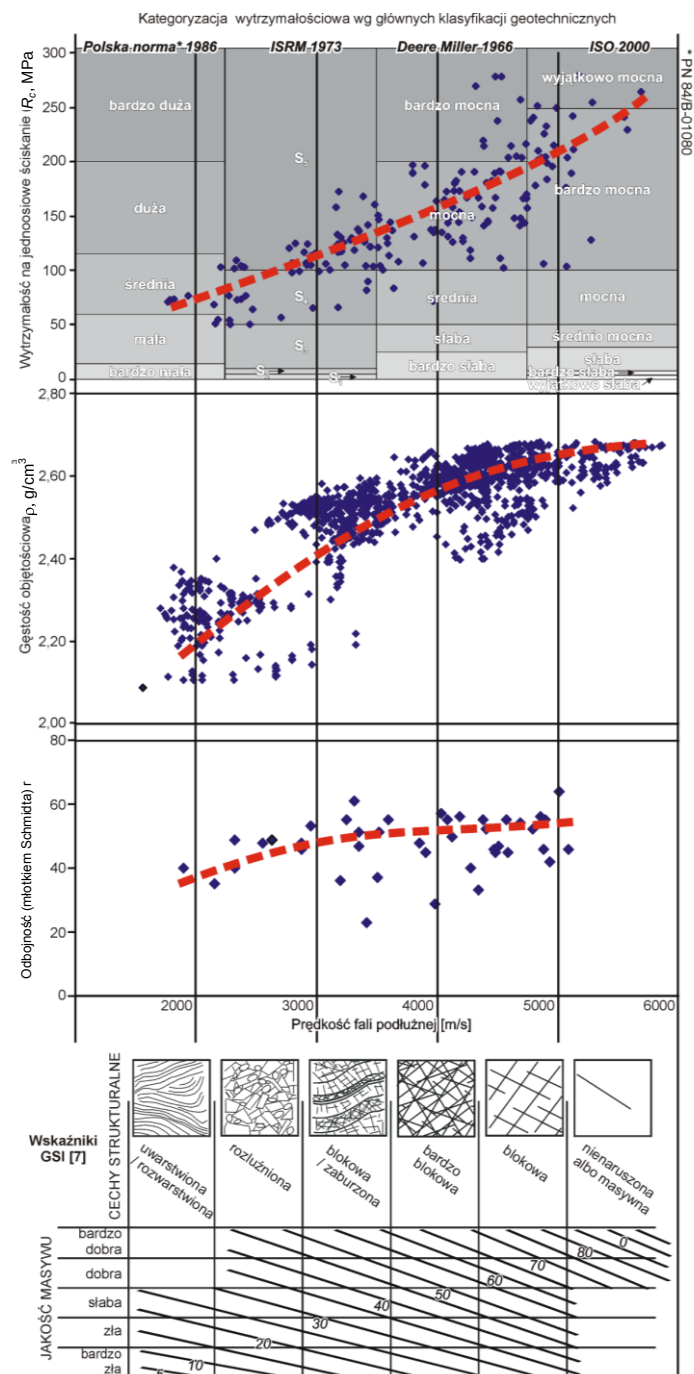
Przedstawione na diagramach tendencje zmian mogą być pomocne przy formułowaniu korelacji szczegółowych. Szczegółowe oceny powinny opierać się na korelacji kilku parametrów charakteryzujących cechy petrofizyczne skały oraz kilku parametrach charakteryzujących cechy akustyczne. Szczególnie pomocne stają się to, gdy kierunki pomiarowe nie są jednoznacznie zorientowane, a rozpoznanie zmienności litologicznej ośrodka skalnego nie jest dostateczne.

Posługiwanie się tylko jednym parametrem wiodącym, jakim jest prędkość fali podłużnej do oceny wytrzymałości, może być zatem w wielu przypadkach niewystarczające.

Skały o różnym wykształceniu litologicznym lecz podobnym stopniu spękania mogą się bowiem często charakteryzować zbliżoną prędkością.

Niezbędne stają się wtedy równoczesne posługiwanie się szczegółową analizą gęstości objętościowej i wytrzymałości oraz prędkością fali podłużnej lub innymi charakterystycznymi parametrami akustycznymi, jak na przykład prędkość fali poprzecznej lub współczynnik tłumienia.

Przykład kompleksowej oceny skał na podstawie pomiarów ultradźwiękowych obrazuje diagram (rys. 7). Przedstawiono na nim zróżnicowany strukturalnie i ziarnowo zespół piaskowców fliszowych z rejonu Polskich Karpat.



Rys. 7. Diagram korelacji cech wytrzymałościowych i petrofizycznych ze zmiennością strukturalną piaskowców fliszowych

Fig. 7. Diagram of correlation of strength and petrophysical features with structural variability of flysch sandstones

Na diagramie oceny szczegółowej, skorelowano prędkość fali podłużnej jako parametru wiodącego z gęstością objętościową, wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie oraz cechami strukturalnymi ośrodka.

Dane do analizy cech strukturalnych pochodzą z oceny makroskopowej próbek skalnych, badań polowych odbojności młotkiem Schmidta r oraz wskaźnika dezintegracji masywu skalnego GSI.

Zróżnicowanie terminologii klasyfikacji wytrzymałościowej przedstawione jest porównawczo dla ocen stosowanych w czterech ważniejszych zaleceniach klasyfikacyjnych (Deere'a i Millera/66, ISRM/73, polskiej normy PN-86/B-02480 oraz ISO/20000) podobnie jak tendencje ogólne dla skał magmowych, osadowych i metamorficznych.

Z przedstawionych rozważań wynika, że sporządzanie diagramów wskaźnikowych umożliwia szybkie, nieniszczące charakteryzowanie cech wytrzymałościowych i przydatności geotechnicznej skał i masywów skalnych niezależnie od stosowanej klasyfikacji. Ocena taka związana jest jednak z koniecznością indywidualnego opracowania i praktycznego zweryfikowania diagramów porównawczych dla poszczególnych regionów geologicznych.

Literatura

1. Barton N.: *General report Concerning Some 20th Century Lessons and 21st Century Challenges in Applied Rock Mechanics, Safety and Control of the Environment*. Paris, Proc. 9th Int. Congr. Rock Mech. ISRM. 1999.
2. Bieniawski Z. T.: *Engineering Rock Mass Classification*. Wiley. 1989.
3. Brown E.T. (ed.): *Rock characterisation, testing and monitoring – ISRM suggested methods*. Oxford: Pergamon. 1981.
4. Carmichael R. S.: *Practical handbook of physical properties of rock and minerals*. Boston, CRC. 1990.
5. CEN. ENV – 1. „Eurocode 7”: *Projektowanie geotechniczne* 1997.
6. Deere D.U., Miller R.P.: *Engineering classification and index properties for intact rock: Tech. Rep., AFWL-TR-65-116*, Univ. of Illinois, Urbana 1966.
7. Hoek E.: *Putting numbers to geology-an engineer's viewpoint*. „Felsbau” Rock and Soil Engineering. J. of Eng. Geol., Geomechanics and Tunnelling 3. Innsbruck 1999.
8. Hood M., Brown E.T.: *Mining rock mechanics, yesterday, today and tomorrow*. Paris, Proc. 9th Int. Congr. Rock Mech. ISRM. 1999 s. 26–51.
9. IAEG: *International Association of Engineering Geology Rock and Soil Description and Classification of Engineering Geological Mapping*. Bull. of IAEG 1981. Vol. 24, s. 235–274.
10. ISO – 1: *Geotechnical engineering – Identification and description of rock*. ISO 14689.CEN/TC 250/S.C. 7. N 324. 2000.
11. ISRM: *International Society of Rock Mechanics suggested methods for quantitative description of discontinuities in rock masses*. Inter. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1978 Vol. 15, s. 319–368.
12. Kołtoński W.: *O możliwościach zastosowania fal ultradźwiękowych w geologii i górnictwie*. Przegl. Geol. 1955 nr 7.
13. Krajewski R.: *Terminologia i klasyfikacja masywów skalnych*. Przegl. Geol. 1984 nr 12, s. 617–620.

14. Pinińska J.: *Od skały do gruntu – mechanizmy pękania w skałach*. Warszawa, PAN. Wyd. Polit. Warszawskiej, Inst. Dróg i Mostów. Zakład Geotech. i Budowli Podziemnych 2000.
15. Pinińska J.: *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał*. Warszawa, Z. Geom. IHiGI W. Geol. UW. 1994–2000 T. 1 do 6.
16. Pinińska J.: *Klasyfikacja gruntów skalistych*. Mat. Konf. Tech.: Harmonizacja Polskich norm geotechnicznych z systemem norm europejskich. Warszawa, Wyd. ITB. 2000, s. 117–133.
17. Pinińska J.: *Ku wskaźnikowym oceną geotechnicznej przydatności masywów skalnych*. Wrocław, Wyd. Pol. Wroc. XXIV Zim. Szk. Mech. Górntw. 2001 s. 395–404.
18. Pinińska J.: *Systemy geologiczno-inżynierskiej oceny skał i masywów skalnych*. Przeg. Geol. 2001 nr 9, s. 804–814.
19. Pinińska J. Płatek P.: *Badania ultradźwiękowe w ocenie wytrzymałościowej skał* Górnictwo odkrywkowe 2002 nr 2/3 s. 89–96.
20. Polska Norma PN-84/B-01080: *Kamień dla budownictwa i drogownictwa. Podział i zastosowanie wg własności fizyczno-mechanicznych*. Warszawa, PKN i M.
21. Polska Norma PN-86/B-02480: *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*. Warszawa, PKN i M.
22. Thiel K.: *Mechanika skał w inżynierii wodnej*. Warszawa, PWN 1980.
23. Thiel K.: *Wprowadzenie. Mat. Sem. Nauk. Budowle podziemne wykonywane w złożonych warunkach geologicznych*. Warszawa. Wyd. Inst. Meteorologii i Gosp. Wodnej 1993.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Józef Dubiński

Joanna Pinińska jest pracownikiem Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego