

Andrzej PRAŁAT, Grzegorz BEZIUK, Rafał ZDUNEK
Politechnika Wrocławska

BADANIE OBSZARÓW ZE SZKODAMI GÓRNICZYMI Z WYKORZYSTANIEM PÓL ELEKTROMAGNETYCZNYCH

Streszczenie. Przedstawiono metodę elektromagnetyczną badania obszaru zawartego pomiędzy dwoma odwiertami. Podano jej zasadę działania, przykładowe rezultaty pomiarów oraz ich sposób interpretacji z wykorzystaniem metod tomografii. Podano przykład jej zastosowania na obszarze ze stratami górniczymi.

THE INVESTIGATION OF THE REGION WITH MINING DAMAGE BY MEANS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS

Summary. The electromagnetic method of investigating the area between two bore-holes is presented. Its principle of operation, the exemplary results of measurements and the way of its interpretation by means of tomography methods are presented. The example of its using in the mining damage area is shown.

1. Wstęp

Zapadanie się gruntu wywołane uszkodzeniami górniczymi występuje w wielu miejscowościach Górnego Śląska. Szkody te są wynikiem zarówno robót górniczych prowadzonych w ostatnich dziesięcioleciach, jak też rezultatem dawnego (często nawet w ubiegłym wieku) płytkiego wydobywania. W tym ostatnim przypadku najczęściej nie ma map górniczych, a jeśli nawet są, to nie uwzględniono na nich dokładnie wszystkich wyrobisk.

W celu wykonania podszadzenia odwierca się otwory, które nie zawsze trafiają w pustkę, czy w podziemne wyrobisko. W rezultacie staje się konieczne odwiercenie większej liczby otworów, co w istotnym stopniu zwiększa koszty całego przedsięwzięcia.

Przy braku możliwości lokalizacji pustek, a tym samym wyznaczenia otworów na podstawie map górniczych, pozostaje zbadanie obszaru w sposób pośredni – stosując metody geofizyczne. Metody te w zależności od miejsca prowadzenia badań można podzielić na: powierzchniowe, powierzchnia-otwór czy wreszcie międzyotworowe. W tym ostatnim

przypadku dla zbadania obszaru zawartego pomiędzy dwoma odwiertami mogą być zastosowane metody sejsmiczne, elektrooporowe lub elektromagnetyczne.

Poniżej zostanie przedstawiona metoda elektromagnetyczna badania obszaru zawartego pomiędzy dwoma odwiertami, dla której system pomiarowy został opracowany i wykonany w Instytucie Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej. Podana zostanie zasada działania, następnie przykładowe rezultaty pomiarów oraz ich sposób interpretacji z wykorzystaniem metod tomografii, stąd też cała metoda nosi nazwę geotomografii elektromagnetycznej. W ostatnich latach metodą tą wykonano pomiary w kilku miejscowościach Górnego Śląska: Świętochłowicach, Siemianowicach, Sosnowcu, Łędzinach Szopienicach, Mysłowicach czy na Zamku w Będzinie [1].

2. Zasada działania metody

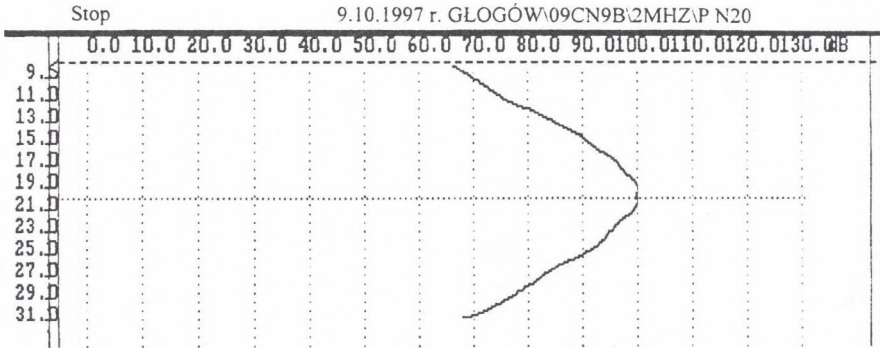
Zasada metody polega na wzbudzeniu fali elektromagnetycznej przez źródło umieszczone w jednym otworze i pomiarze natężenia pola elektromagnetycznego, wywołanego tą falą, wzdłuż drugiego z otworów. Fala elektromagnetyczna rozchodząca się w ośrodku półprzewodzącym (jakim jest skała) ulega tłumieniu, z kolei wartość tego tłumienia zależy od szeregu czynników, a głównie od oporności elektrycznej ośrodka [2].

Na obszarze szkód górniczych skały są najczęściej odwodnione i mogą być zwięzłe, w różnym stopniu spękane, wreszcie mogą powstawać pustki. W rezultacie zmienia się w różnych miejscach tłumienie fali elektromagnetycznej, przechodzącej przez tę część obszaru. Fale elektromagnetyczne będą najmniej tłumione na kierunku, na którym przechodzą przez pustkę, najwięcej przy przechodzeniu przez skały zwięzłe¹. Jednakże zwykle pustkę otacza strefa skał spękanych, dlatego też zmiana tłumienia fal elektromagnetycznych od skał zwięzłych do pustki odbywać się będzie w sposób ciągły, co w zasadniczy sposób utrudnia wykrycie pustki. Dlatego też wyniki pomiarów muszą być wykorzystane dla przeprowadzenia interpretacji.

3. Rezultaty pomiarów

Na rys. 1 przedstawiono rezultaty pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego w jednym z otworów, odwierconych na obszarze bez szkód górniczych. Zmierzony kształt krzywej jest charakterystyczny dla obszaru jednorodnego: natężenie pola elektromagnetycznego jest największe na głębokości, na której znajduje się źródło (20 m), a spadek wartości tego pola dla innych głębokości wynika ze zwiększania się odległości od źródła.

¹ Występuje tu sytuacja odwrotna niż w przypadku fal sejsmicznych, których prędkość rozchodzenia się w ośrodku gęstszym jest większa niż w powietrzu.

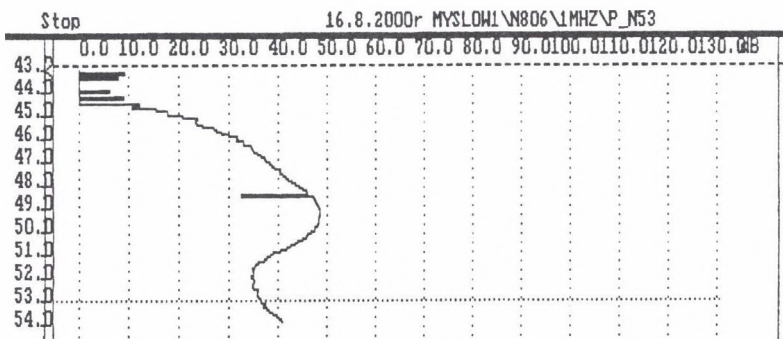


Rys. 1. Rozkład natężenia pola elektromagnetycznego w otworze zmierzony w obszarze bez szkód górniczych
Fig.1. Distribution of electromagnetic field intensity in the bore-hole, measured in the region without mining damage

Przykład wyników pomiarów wykonanych w Siemianowicach w obszarze, na którym występują szkody górnicze, przedstawiono na rys. 2. Natężenie pola elektromagnetycznego na głębokości 53 m, tj. na głębokości, na której umieszczono źródła pola, nie jest największe, co świadczy, że na innym kierunku i to na większej odległości od źródła tłumienie jest mniejsze. Taki rezultat pomiarów jednoznacznie świadczy o pustce na głębokości ok. 50 m. Aby badany obszar lepiej rozpoznać, tj. zlokalizować położenie pustki i jej wymiary, wykonuje się pomiary po umieszczeniu źródła na różnych głębokościach, a uzyskane wyniki wykorzystuje się w obliczeniach, których zasadę przedstawiono poniżej.

4. Zasada interpretacji wyników pomiarów

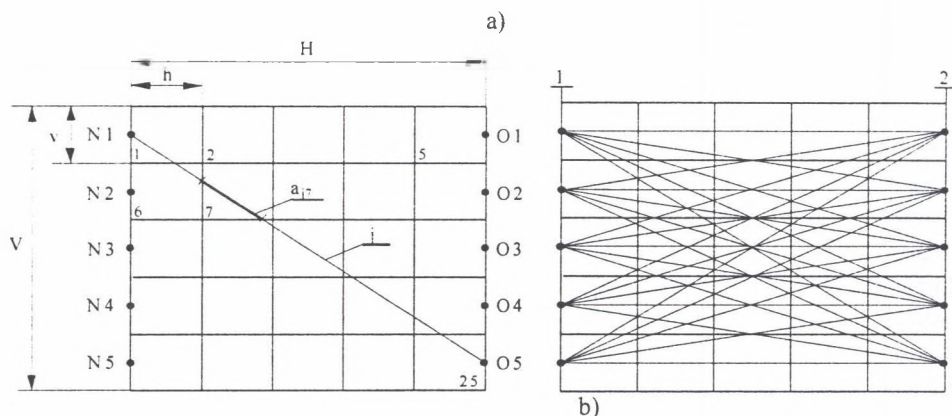
W celu interpretacji rezultatów pomiarów wykorzystano metodę tomografii. W odróżnieniu jednak od tomografii medycznej, w której badany obszar jest „oświetlany” dookoła, w tym przypadku badanie to jest tylko z jednej strony. To ograniczenie sprawia, że algorytmy opracowane dla tomografii medycznej nie mogą być tutaj wykorzystane.



Rys. 2. Rozkład natężenia pola elektromagnetycznego w otworze zmierzony w obszarze, na którym występują szkody górnicze

Fig. 2. Distribution of electromagnetic field intensity in the bore-hole, measured in the region with mining damage

W celu wyjaśnienia przyjętej zasady interpretacji rozważony zostanie przekrój badanego obszaru w postaci prostokąta, którego dwa boki tworzą odwierty [3]. Następnie ten, reprezentujący badany obszar, prostokąt zostanie podzielony na pewną ilość jednakowych co do wymiarów i jednorodnych co do właściwości podobszarów (na rys. 3a obszar podzielono przykładowo na 25 podobszarów). Dla każdego z położen źródła i miernika (np. odpowiednio N1 i O5) można wyznaczyć promień łączący te położenia (tu: promień $j - ty$). Promień ten, przechodząc przez poszczególne podobszary, jest tłumiony w zależności od jego współczynnika tłumienia i długości drogi tego promienia w tym podobszarze. Na całej drodze promienia jego tłumienie będzie sumą tłumień w poszczególnych podobszarach, przez które przechodzi:



Rys.3. Przekrój badanego obszaru: a) podział na 25 podobszarów oraz przebieg $j - ty$ promienia, b) pokrycie promieniami badanego obszaru

Fig.3. Section of the investigated region: a) the division into 25 subregions and the course of the $j - ty$ ray b) the covering of rays of the investigated region

$$x_j \cdot a_j = x_1 \cdot a_{j,1} + x_2 \cdot a_{j,2} + \dots + x_i \cdot a_{j,i} + \dots + x_l \cdot a_{j,l}, \quad (1)$$

gdzie:

x_i [dB/m] - tłumienie $i - ty$ podobszaru,

$a_{j,i}$ [m] - długość $j - ty$ promienia w $i - tym$ podobszarze.

Zależność (1) może być zapisana w postaci:

$$\sum_{i=1}^l a_{j,i} \cdot x_i = y_j, \quad (2)$$

gdzie y_j [dB] jest równe różnicy natężeń pola elektromagnetycznego przy źródle i w punkcie pomiaru.

Dotychczas rozważany był umowny promień, to jest przy ustalonym źródle, jeden pomiar natężenia pola elektromagnetycznego. Jeżeli dla danego położenia źródła (np. N1 na rys. 3a) pomiary natężenia pola elektromagnetycznego zostaną wykonane w każdym punkcie (O1 do O5), a następnie będą wykonane także dla innych położen źródła (N2 - N5), to cały

badany obszar zostanie pokryty promieniami (rys. 3b). Jeśli każdy promień opisać zależnością (2), to powstanie układ równań liniowych, który w notacji macierzowej ma postać:

$$A \cdot X = Y, \quad (3)$$

gdzie:

Y - jest wektorem projekcji (pomiarów),

X - jest wektorem obrazu,

$A = (a_{ij})$ jest macierzą dróg, zwaną również macierzą współczynników.

Na podstawie znanej macierzy A i znanego wektora Y można wyznaczyć wektor X, a więc znaleźć wartości tłumienia poszczególnych podobszarów x_i , co z kolei umożliwia wykonanie rekonstrukcji obrazu rozkładu współczynnika tłumienia badanego obszaru.

Układ równań (3), pozornie prosty do rozwiązania, ma jednak wiele niekorzystnych właściwości: jest bardzo źle uwarunkowany, nie ma jednoznacznego rozwiązania, a macierz współczynników A jest bardzo rzadka i o bardzo dużych wymiarach. Z tego powodu wiele prostych metod rozwiązywania układów równań liniowych, jak metoda eliminacji Gaussa lub metoda Cramera, nie może być tutaj zastosowanych.

Intensywny rozwój tomografii komputerowej zaowocował powstaniem wielu metod rozwiązywania układu równań o powyższych właściwościach. Do najczęściej stosowanych należą metody iteracyjne. Nie jest jednakże zadaniem łatwym wybranie wśród tak licznego zbioru najlepszej metody do określonego celu, zwłaszcza że w tym specyficznym zastosowaniu tomografii, jak to było zaznaczone powyżej, badany obszar nie może być „oświetlony” ze wszystkich stron. Właściwy wybór wymagał więc gruntownego zbadania wielu metod.

Autorzy zbadali przydatność do rekonstrukcji obrazu w geotomografii elektromagnetycznej kilku wybranych metod rekonstrukcji obrazów, a mianowicie [4]:

- ART (*Algebraic Reconstruction Technique*)
- MART (*Multiplicative Algebraic Reconstruction Technique*)
- SART (*Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique*)
- SIRT (*Simultaneous Iterative Reconstruction Technique*)
- EM (*Expectation Maximization*)
- SVD (*Singular Values Decomposition*).

Efektywność rekonstrukcji obrazu geotomograficznego powyższymi algorytmami została oceniana na podstawie symulacji. Dla założonej geometrii obszaru o zadanym *a priori* rozkładzie współczynnika tłumienia wygenerowano wektor projekcji Y oraz wyznaczono macierz A. Następnie dla zadanej macierzy A i wektora Y zrekonstruowano obraz X, który porównywano z rozkładem oryginalnym, czyli zadanym *a priori*.

Na podstawie takiej symulacji przeprowadzono wstępną selekcję wśród powyższych metod. Oceniono dokładność oraz szybkość rekonstrukcji.

Dla algorytmów iteracyjnych dokładność rekonstrukcji obrazu z danych wolnych od zakłóceń, np. szumów, jest zależna i od danego algorytmu, i od liczby kroków iteracyjnych.

W przypadku danych pomiarowych zawierających zakłócenia dokładność rekonstrukcji jest zależna od wielu czynników. Zakłócenia danych pomiarowych powodują, że układ równań (3) jest sprzeczny, a zatem nie można jednoznacznie określić rozwiązania dokładnego, z którym powinna być zbieżna każda z metod rekonstrukcji [4].

Aby właściwie określić optymalne warunki pracy dla poszczególnych algorytmów zbadano skuteczność rekonstrukcji z danych zaszumionych. Do wygenerowanego wektora projekcji Y dodano odpowiednio przeskalowany wektor zakłócający, zawierający liczby losowe o rozkładzie normalnym, multiplikatywnie zmieniające się z wartością danych Y .

Stwierdzono, że do powyższego celu najodpowiedniejsze są algorytmy SIRT, SART i EM. Stosując te algorytmy można uzyskać z danych zaszumionych obraz zrekonstruowany o możliwie najlepszej jakości, a ponadto czas rekonstrukcji powyższymi algorytmami jest znacznie krótszy niż w przypadku rekonstrukcji algorytmami algebraicznymi, tj. ART lub MART.

Na podstawie wyników symulacji możliwe było dobranie odpowiedniej liczby kroków iteracyjnych dla poszczególnych algorytmów.

5. Rezultaty rekonstrukcji

Jak już to podano, prezentowaną metodą prowadzono badania w kilku, wymienionych we wstępie, miejscowościach Górnego Śląska. Również wybrane algorytmy zastosowano do rekonstrukcji obrazu rozkładu współczynnika tłumienia zbadanego na tych terenach. Przykładowo, na rys.4 przedstawiono rozkład współczynnika tłumienia przy częstotliwości 4 MHz, uzyskany z wykorzystaniem algorytmu SIRT pomiędzy dwoma otworami na terenie Świętochłowic.

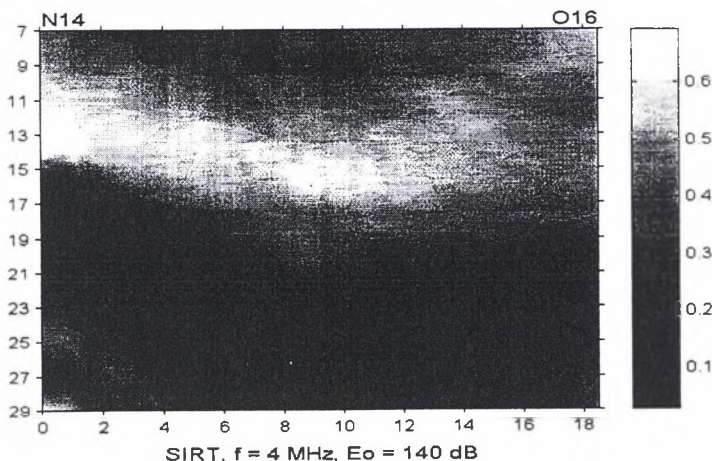
Badany obszar wykazywał dużą niejednorodność: wartość współczynnika tłumienia zmieniała się od 0,1 do 0,7 N/m. Z rys. 4 wynika, że na większych głębokościach skały wykazywały mniejsze tłumienie. Jeśli wziąć pod uwagę, że pomiary wykonano na obszarze szkód górniczych, to zmniejszone tłumienie było spowodowane spękaniem i tworzeniem się pustek, których obecność stwierdzono też podczas wiercenia otworów.

6. Podsumowanie

W rezultacie realizacji projektu badawczego powstał system pomiarowy umożliwiający wykonanie pomiarów natężenia pola elektromagnetycznego w ziemi, a oprogramowane algorytmy umożliwiają wykonanie rekonstrukcji obrazu współczynnika tłumienia fal elektromagnetycznych w badanym obszarze.

Opracowana metoda stwarza nowe możliwości badania obszarów o skomplikowanej strukturze, jakim są obszary szkód górniczych. Wykorzystując otwory odwiercane dla

podszadzania, umożliwia zbadanie obszarów znajdujących się pomiędzy tymi otworami. Może być szczególnie przydatna w przypadku, gdy trudno jest zlokalizować pustkę.



Rys.4. Rezultaty rekonstrukcji obrazu rozkładu współczynnika tłumienia fal elektromagnetycznych uzyskanej na terenie Świętochłowic

Fig.4. Image reconstruction of the distribution of the attenuation coefficient of electromagnetic waves obtained in Świętochłowice region

LITERATURA

1. Prałat A., Beziuk G., Zdunek R.: Rozchodzenie się fal elektromagnetycznych wielkiej częstotliwości w ziemi, sprawozdanie z projektu badawczego KBN Nr 8T11D01310. Raport Inst. Telekomunikacji i Akustyki PWr Nr I-28/S-008/00, Wrocław 1999
2. General methods of measuring the field strength and related parameters, Report 227-2, CCIR XVth Plenary Assembly, Geneva 1982
3. Prałat A.: Zastosowanie pól elektromagnetycznych wielkiej częstotliwości do badania niejednorodności ośrodka skalnego, Prace Naukowe Instytutu Telekomunikacji i Akustyki PWr, Seria Monografie Nr 38, Wrocław 1993
4. Prałat A., Zdunek R.: The use electromagnetic geotomography for the investigation of mining damage areas, Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. M-22 (31) pp. 301-311, 1999

Abstract

The electromagnetic method of investigating the area between two bore-holes is presented. For this method, the measurement system, a choice of interpretation algorithms and its software were worked out and carried out in the Institute of Telecommunication and Acoustic in Wroclaw University of Technology. The principle of operation and the exemplary results of measurements are shown. The way of measurement interpretation by means of tomography methods is discussed. Hence, this method is called electromagnetic geotomography. It is stated that among 6 algorithms estimated for the reconstruction of geotomographical image the most suitable are the SIRT, SART and EM algorithms.

The investigations were carried out in several places in Upper Silesia. In this paper, one example of the reconstructed image of the attenuation coefficient distribution of the electromagnetic waves is presented.

This method gives new possibilities of investigating the areas of a complex structure, like the mining damage areas.