

Kraków, 17.05.2016

Prof. dr hab. inż. Andrzej Leśniak

Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr inż. Roberta Siaty**

wykonanej w Głównym Instytucie Górnictwa w Katowicach pod kierunkiem dra hab. inż. Adama Lurki, prof. GIG

pt. „Dobór parametrów w algorytmach sejsmicznej tomografii amplitudowej wykorzystujących regularyzację w badaniach pokładów węgla”

### Zawartość dysertacji

Przedstawiona do recenzji dysertacja jest zwięzłym opracowaniem tematu. Zawiera 101 stron tekstu ujętego w dziewięć rozdziałów i 50 pozycji literaturowych oraz dodatkowo streszczenia w języku polskim i angielskim. Brak w doktoracie spisu ilustracji oraz zestawienia używanych symboli, co w wypadku prowadzenia analiz teoretycznych jest pewnym minusem tego opracowania. Doktorant we wstępie dysertacji stawia tezę o zwiększeniu dokładności obliczania współczynnika transmisji w sejsmicznej tomografii amplitudowej przez odpowiedni dobór parametrów regularyzacyjnych i tym samym możliwości poprawy efektywności badań pokładów węgla kamiennego. Sformułowanie jednej tylko tezy sugeruje jednoosiową konstrukcję dysertacji i koncentrację opisu na tylko jednej grupie zagadnień.

Konstrukcja dysertacji jest poprawna i logiczna. Po wstępie, w drugim rozdziale pracy autor omawia cel i zawartość (a nie jak głosi tytuł rozdziału **założenia**) pracy oraz powtarza główną tezę dysertacji. Kolejne dwa rozdziały prezentują zagadnienie sejsmicznej tomografii amplitudowej oraz zagadnienia związane z tłumieniem fal sejsmicznych w górotworze, które są fizyczną podstawą tej metody geofizycznej. Autor przedstawia w pierwszym z rozdziałów abstrakcyjne sformułowanie zagadnienia tomografii w języku analizy funkcjonalnej. Zakres prezentowanego materiału w pełni wystarcza do zrozumienia dalszych części dysertacji i nie epatuje czytelnika niepotrzebną w tym wypadku ilością sformułowań teoretycznych. Jedyne uwagi jakie można wnieść do tego rozdziału to:

- na stronie 8 autor stwierdza, że zadanie odwrotne jest poprawnie sformułowane jeśli operatory  $A$  i  $A^{-1}$  są ciągłe i jednoznaczne. Według niego, jak pisze zaraz, oznacza to, że małym zmianom elementu  $x$  z przestrzeni  $X$  odpowiadają małe zmiany elementu  $y$  w

przestrzeni  $Y$ . Jest to definicja stabilności operatora  $A$  i jest tylko koniecznym (a nie wystarczającym) warunkiem poprawności sformułowania zagadnienia odwrotnego.

- w podrozdziale 3.1 autor podaje podstawowe wzory używane w tomografii tłumieniowej (wzory 3.15 3.16) lecz nie odnosi się w żaden sposób (ani w tym miejscu ani potem) do faktu, że współczynnik  $\beta$  charakteryzującego rozpraszanie geometryczne w wypadku fal kanałowych pokładowych Love'a i Rayleigha jest inny niż dla pozostałych fal powierzchniowych i objętościowych

- ponownie w podrozdziale 3.1 autor ze wzoru (3.8) konkluduje wzór (3.9). To przejście jest prawdziwe gdy założy się przemienność mnożenia macierzy, co jak wiadomo jest bardzo szczególnym przypadkiem (mnożone macierze muszą być tych samych rozmiarów i kwadratowe).

Rozdział 4 dysertacji omawia zagadnienia z tłumieniem fal sprężystych. Autor przedstawia podstawowe definicje omawiając osobno przypadek tłumienia czasowego (nierozpatrywanego w dysertacji) oraz tłumienia przestrzennego, które jest zjawiskiem fizycznym stanowiącym podstawę dyskutowanej metody rozpoznania górotworu. Większość wywodu została powtórzona za monografią „Quantitative Seismology” Aki'ego i Richards'a. Nie wyczerpuje to, zdaniem recenzenta, zagadnień teoretycznych jakie powinny być omówione w tym rozdziale. Ponadto autor przedstawia metody pomiaru współczynnika tłumienia opisane w pracach (Buchanan, et al., 1983) , (Quan and Harris, 1997) oraz ( Gladwin i Stacey, 1974). Informacje są podane w sposób bardzo skrótowy, praktycznie sprowadzają się do zacytowania od jednego do trzech wzorów z każdej pracy, redukując do minimum kontekst i relacje do własnych badań. Recenzent odnosi wrażenie, że jedynym powodem przytoczenia tych prac była chęć zakomunikowania, że doktorant się z nimi zapoznał. Jak wspomniano, część zagadnień istotnych dla zjawiska tłumienia nie została w tym rozdziale i w całej pracy w ogóle poruszona. Chodzi o zjawisko dyspersji oraz zagadnień związanych ze wzajemnymi relacjami tłumienia i dyspersji fal sprężystych w ośrodkach niejednorodnych. Szczególnie zagadnienia teoretyczne dotyczące fal pokładowych Love'a i Rayleigha, bądź fal chodnikowych zdaniem recenzenta powinny znaleźć się w dysertacji w stosownym wymiarze.

W rozdziale 5 dysertacji znalazły swoje omówienie zagadnienia związane z metodami inwersji. Wśród metod liniowych zostały omówione metody najmniejszych kwadratów i jej wariant uwzględniający tłumienie, metoda ART i SIRT oraz metoda gradientów sprzężonych. Wśród metod nieliniowych wspomniano o metodzie największego spadku, metodzie Gaussa-Newtona oraz algorytmie Levenberga-Marquardta, używanym potem w dysertacji do przeprowadzenia obliczeń. Jak widać autor skoncentrował się wyłącznie na metodach lokalnych i pominął wszystkie metody globalne. Ostatnią grupą metod wspomnianą w doktoracie są metody probabilistyczne. W podrozdziale znajdują się tylko, przytoczone za (Tarantola, 1987), ogólne wzory określające warunkowe rozkłady gęstości prawdopodobieństwa wektorów danych i modelu oraz ich wartości oczekiwane. Brak

jakichkolwiek odniesień do konkretnych metod jak również do efektywnego sposobu wyznaczania tychże rozkładów jak choćby metody Monte Carlo Markow Chain. Stąd rozdział również należy traktować jako oderwany od części aplikacyjnej. Ostatnią część rozdziału stanowi omówienie zastosowanej metody inwersji. Autor minimalizuje odchyłkę danych pomiarowych i danych wymodelowanych na podstawie najprostszego modelu tłumienia prostoliniowej propagacji fali sejsmicznej, uwzględniającej rozpraszanie geometryczne i zróżnicowanie współczynników transmisji w ośrodku dyskretnym. Minimalizowana formuła zawiera stałe regularyzacyjne powiązane (wg recenzenta globalnie) z odchyleniami standardowymi danych i parametrami modelu. Jest to jedyna wzmianka w doktoracie na temat sposobu obliczania błędu tomografii tłumieniowej w całym doktoracie.

By dobrać stałe regularyzacyjne doktorant dokonał inwersji danych tomograficznych dla sześciu znanych modeli numerycznych ośrodka niejednorodnego. Miały one odwzorowywać „niektóre formy zaburzeń geologicznych, występujących w rzeczywistości w pokładach węgla” (cite str. 30). Rzeczywiście, jak można się przekonać z przykładów praktycznych zamieszczonych w rozdziale 7 typowa dla eksploatowanych pokładów węgla jest sytuacja koncentracji stref naruszonych, posiadających niski współczynnik transmisji na obrzeżach ścian, w sąsiedztwie chodników. Modele 3, 4 i 5 wykazują takie cechy, stąd można uznać że metoda może nosić znamiona przydatnej w praktyce. W celu dobrania wartości stałych regularyzacyjnych autor dokonuje inwersji dla wybranego zestawu stałych oraz ocenia jakość inwersji porównując jej wynik z danymi modelowymi używając odchyłki średniokwadratowej i maksymalnej średniokwadratowej zdefiniowanej wzorami 6.1 i 6.2. Nie wiadomo dlaczego autor nazywa te wielkości wariancją średnią i wariancją maksymalną. Do inwersji używa metody SIRT i algorytmu Levenberga-Marquardta z dwoma (dla modelu 1) i pojedynczym sposobem (modele 2,3,4,5,6) regularyzacji. Brak jest obliczania błędu inwersji (prawdopodobnie z uwagi na oszczędność miejsca) choć brak w dysertacji wzmianki, by takie obliczenia były prowadzone. Na zakończenie rozdziału autor konkluduje, że najlepszy dla potrzeb inwersji jest algorytm Levenberga-Marquardta z regularyzacją wariancji współczynnika transmisji i sposób ten może być używany do obliczeń praktycznych. Jest to dość arbitralne stwierdzenie, choćby z uwagi na to, że nie została sprawdzona na przykład zależność jakości inwersji od parametrów obliczeniowych modelu (ilości oczek siatki). Ponadto nie zostało wyjaśnione dlaczego autor zmienia tylko jeden z parametrów regularyzacji ( $S_t$ ) drugi zaś ( $S_v$ ) pozostawia bez zmian. Konkludując – mimo pewnych braków, zaproponowana przez autora metoda może być potraktowana jako jego oryginalny wkład w rozwój dyscypliny.

W kolejnym, siódmym rozdziale dysertacji przedstawione zostały wyniki praktycznego zastosowania tomografii tłumieniowej dla zobrazowania zróżnicowania współczynnika transmisji w pokładach węgla. Obliczenia zostały przeprowadzone dla trzech kopalń. Dla każdej autor przedstawia schemat pokrycia promieniami sejsmicznymi oraz położenie prześwietlanych ścian. Nie przedstawia natomiast żadnych informacji o używanych parametrach obliczeniowych zagadnienia odwrotnego np. o wielkości oczka siatki

obliczeniowej. Brak również informacji o aparaturze rejestrującej sygnały sejsmiczne, próbkowaniu sygnału i charakterystyce czujników. Informacje te są dość istotne dla właściwego processingu sygnału, precyzji prowadzonych analiz i ewentualnych uproszczeniach i źródłach błędów.

Przedstawiono opisy lokalizacji badanych ścian wraz ze szczegółowym opisem sposobu eksploatacji i litologii dla tych ścian. Opisy te jakkolwiek cenne z uwagi na sposób prowadzenia robót górniczych nie są później wykorzystywane do interpretacji i mają charakter zacytowanych opracowań technicznych. Brakuje przedstawienia graficznego profilu litologicznych zaś sam ich opis jest niejednoznaczny, gdyż nie podano chociażby w którym kierunku odczytywać sekwencję warstw. Autor prowadzi interpretację dla dwóch, jak się wyraża, „grup falowych”. Recenzent intuicyjnie czuje co autor miał na myśli, ale prosi o wyjaśnienie w trakcie obrony. W rozdziale, zdaniem recenzenta, brakuje choćby jednego przykładu sygnałów zarejestrowanych w trakcie eksperymentów, z przeprowadzoną *ad hoc* analizą czasowo-częstotliwościową tych sygnałów. W sposób prosty pozwoliłoby to zilustrować trafność decyzji podjętych w trakcie badań. Autor nie ustrzegł się w związku z tym pewnych nieścisłości w opisie fal które interpretuje. Na stronie 82 ostatni akapit podaje zupełnie różne prędkości fal kanałowych wręcz zdanie po zdaniu, tak, że trudno się zorientować, jakie z tych parametrów były użyte do interpretacji.

Prócz fal pokładowych autor bada również rozkłady współczynnika transmisji fal podłużnych. Jako że są to fale o stosunkowo niewielkiej amplitudzie i silnie tłumione w węglu interesującym jest, czy autor nie miał kłopotów z wydzieleniem ich z sygnału o wysokim stopniu interferencji. I znów szkoda, że nie umieszczono w pracy choćby krótkiego opisu metod przetwarzania rejestrowanych sygnałów, prowadzących do wydzielenia składowych używanych potem do obliczeń.

Dla recenzenta zaskakujące są również fakt, że zakres częstotliwościowy fal podłużnych i poprzecznych w kopalni „Bogdanka” jest identyczny zaś współczynniki transmisji dla obu typów fal bardzo zbliżone. Czy autor mógłby to skomentować?

Podstawowym niedociągnięciem jest brak podania sposobu obliczania rozkładu błędów tak zaprojektowanego sposobu rozwiązania zagadnienia tomografii tłumieniowej. Ten brak nie pozwala recenzentowi w pełni odnieść się do sporej części rezultatów zaprezentowanych w pracy i będzie to skomentowane w kolejnym rozdziale.

Ostatni rozdział to podsumowanie rezultatów. W sposób bardzo zwięzły autor formułuje tam szereg dość ogólnych wniosków, do których recenzent odniesie się w kolejnym rozdziale recenzji.

### **Uwagi ogólne**

Praca omawia najprostszy model tomografii tłumieniowej i wyznaczania współczynnika transmisji w celu obrazowania niejednorodności w pokładach węgla i skałach nadkładu.

Autor używał prostoliniowego wariantu tomografii. Nie odnosi się niestety do błędu jakie niesie za sobą takie uproszczenie. Co prawda obliczenia przeprowadzone w rozdziale 6 i wykorzystujące syntetyczne modele ośrodka wykazały, że odwzorowanie rozkładu współczynnika transmisji jest dość dobre ale nie modelowano tam pełnego pola falowego a tylko zjawisko tłumienia wg wzorów 3.13 -3.15. Można tym samym oczekiwać, że modele te są adekwatne dla przypadków, gdy pole falowe spełnia warunki teorii promieniowej.

W przedstawionych przykładach praktycznych z trzech kopalń warunki te zachodzą. Nie zmienia to faktu, że autor posługuje się tymi samymi równaniami opisującymi tłumienie do bardzo różnych typów fal, od poprzecznych, poprzez podłużne aż po kanałowe w różnych modach. Brak dyskusji na ten temat w ocenianej rozprawie.

Kolejną wątpliwością jaka nasuwa się recenzentowi jest sposób liczenia rozkładów błędów określania wartości współczynnika transmisji. Autor nie podaje wzorów czy też sposobów obliczania tych błędów. Co również zastanawiające, nawet pobieżne porównanie rozkładu współczynnika transmisji i rozkładu błędu umożliwia stwierdzenie ich podobieństwa. Jak można zaobserwować na parze rysunków 7.2 i 7.3 (i na kolejnych na kolejnych parach) małe wartości współczynnika transmisji pokrywają się z małymi błędami określenia tych współczynników. Autor również to zauważa i dwukrotnie stwierdza iż jest to argument za poprawnością wyznaczenia stref o małym współczynniku transmisji. Mały błąd = wysoka wiarygodność lokalizacji ww. strefy. Zgoda, jeśli błąd wyznaczony jest poprawnie.

Można na tę sprawę patrzeć inaczej. Mały współczynnik transmisji to duże tłumienie czyli z reguły niska prędkość. Generalnie strefy o niskiej prędkości propagacji są znacznie mniej intensywnie penetrowane przez fale sejsmiczne. Otrzymujemy tym samym, że najmniejszy błąd występuje w strefach niepenetrowanych przez fale sejsmiczne. Jak wiadomo (np. cytowany przez autora Menke (1984) ) błąd tomografii jest odwrotnie proporcjonalny do rozdzielczości modelu dyskretnego (w praktyce do ilości promieni przecinających komórkę). Jest to niezgodne z przykładami zaprezentowanymi przez autora. Nawet dla tomografii prostoliniowej i schematu promieni sejsmicznych przedstawionych na rysunkach 7.1, 7.9 i 7.17 rozkłady błędów są dla recenzenta dość kontrowersyjne.

Autor wielokrotnie podkreśla że regularyzacja pozwoliła na **poprawę** dokładności obliczania rozkładów współczynnika transmisji. Zostało to zaprezentowane wyłącznie na danych modelowych, poprzez porównanie z metodą SIRT. Mimo to autor stwierdza, że wyniki te są bardziej wiarygodne. Takie stwierdzenie jest w pełni uzasadnione ale tylko dla modeli syntetycznych. Potwierdzeniem wiarygodności wyników tomografii dla prac przeprowadzonych w kopalniach była ich pozytywna weryfikacja przez służby kopalniane.

#### **Dostrzeżone usterki (sztuk):**

**W poniższym zestawieniu pomijam niezręczności stylistyczne uznając, że mają one znaczenie drugorzędne i nie wpływają na merytoryczną wartość pracy.**

Str. 5 i nast. Sposób cytowania literatury w tekście odbiega trochę od przyjętych standardów. Publikacje, których autorami jest więcej niż dwie osoby z reguły cytuje się wymieniając tylko pierwszego z autorów - np. (Dubiński, et al., 1998)

Str. 6 Zamiast „szybkobieżnego” powinno raczej być „szybko zbieżnego”

Str. 11 Chodzi raczej o równanie 3.8 a nie 3.9 ( 13 linijka z dołu)

Str. 16 Autor stwierdza w środkowym akapicie, że „....wyznaczono rozkłady współczynnika transmisji [...] w wybranych na podstawie analizy widmowej wąskich pasmach częstotliwości **zakładając stałą jego wartość**” – to sprzeczność – należałoby dodać „stałą jego wartość w tych pasmach”.

Str. 18 Wyjaśniając wzór 4.14 autor błędnie tłumaczy znaczenie symbolu  $\sigma_s^2$  - poprawnie jest to wariancja **widma** sygnału

Str. 19 Wyjaśniając wzór 4.16 autor podaje, że zmienna  $t$  to czas, niestety bez sprecyzowania o jaki czas chodzi.

Str. 20 Użycie we wzorach 5.4 i 5.5 tego samego indeksu „j” do oznaczenia numeru równania (5.4) i numeru iteracji (5.5) jest błędem

Str. 23 i 24 Symbol „H” we wzorach 5.16 i 5.17 nie został zdefiniowany

Str. 26 Autor w czwartej linijce od góry odwołuje się do wzoru 5.16 – powinno być tam odwołanie do wzoru 5.20 lub 5.21

Str. 81 Oznaczenia chodników i ścian używane w tekście powinny być wprowadzone do opisu rysunku 7.9.

W spisie literatury występują cztery pozycje niezasygnalizowane w pracy, mianowicie (Clayton, 1984), (Kak i Slaney, 1999), (Lurka *et al.*, 2004) i (Zhao *et al.*, 2004).

### **Wniosek końcowy**

Podsumowując, zaprezentowana przez mgra inż. Roberta Siatę dysertacja wnosi dużą wartość udoskonalenie metody inwersji dla przypadku prostoliniowej tomografii tłumieniowej, najczęściej stosowanej w przypadku badań prowadzonych w górnictwie i geologii inżynierskiej.

Praca doktorska udowadnia moim zdaniem, iż mgr inż. Robert Siata w sposób wnikliwy wykonał postawione zadanie i mimo, że nie ustrzegł się pewnych niedociągnięć udowodnił swoją biegłość w prezentowanej problematyce naukowej.

Recenzowana rozprawa doktorska jest samodzielny i oryginalnym opracowaniem autora. Tym samym stwierdzam, że rozprawa doktorska pana mgr inż. Roberta Siaty pt. „Dobór parametrów w algorytmach sejsmicznej tomografii amplitudowej wykorzystujących

regularyzację w badaniach pokładów węgla” spełnia wymogi określone w Ustawie Prawo o Szkolnictwie Wyższym, Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 r. i w Rozporządzeniu Ministra NiSW z dnia 10 listopada 2015 r. wnioskuję o dopuszczenie pana mgr inż. Roberta Siatę do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Lesiński.*