

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adriana Gołdy

1. Przedmiot recenzji

Opinia niniejsza powstała w odpowiedzi na prośbę Naczelnego Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa prof. dr hab. inż. Stanisława Pruska, wyrażonej w piśmie NSR/299/2017 z dnia 09-08-2017 r.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. „Sposób realizacji krótkookresowej oceny zagrożenia sejsmicznego w KWK Ziemowit z wykorzystaniem krzywoliniowej tomografii pasywnej”. Autorem rozprawy jest mgr inż. Adrian Gołda, który ubiega się o nadanie mu stopnia naukowego doktora nauk technicznych przez Radę Naukową Głównego Instytutu Górnictwa w Katowicach. Promotorem przedstawionej pracy jest dr hab. inż. Adam Lurka, prof. GIG.

2. Wstęp

Coraz większa ilość energii potrzebnej dla rozwoju społeczeństw uprzemysłowionych na świecie wymaga nie tylko dynamicznego sięgania do nowych, najkorzystniej odnawialnych, źródeł jej pozyskiwania ale także równoległego wykorzystywania klasycznych paliw kopalnych, wśród których wymienić można także węgiel kamienny. W Polsce, surowiec ten, wobec bogactwa jego występowania, jeszcze wiele lat będzie głównym nośnikiem energii. Ponieważ jednak sytuacja na światowych rynkach energetycznych nie zachęca do budowy nowych kopalń, polskie górnictwo węgla kamiennego prowadzi i będzie prowadzić eksploatację w coraz trudniejszych warunkach geologiczno-górnicznych na obszarach istniejących zakładów górniczych. Tak więc, coraz większa głębokość eksploatacji a także zaszłości eksploatacyjne często spotykane w kopalniach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, stawia przed decydentami, projektantami i bezpośrednim nadzorem, szczególnie istotny problem oceny bieżącego zagrożenia sejsmologicznego związanego z potencjałem do wystąpienia podczas eksploatacji złoża, indukowanych zjawisk dynamicznych, szczególnie tych o większych energiach, niosących ze sobą wyjątkowo niepożądane zjawiska, takie m.in. jak tąpnięcia.

Podstawowe metody analityczne wykorzystywane w tym zakresie w górnictwie podziemnym bazują w uproszczeniu na trzech różnych podejściach odnoszących się do, zmieniającej się wraz z postępowaniem eksploatacji, sytuacji górniczej:

(a) probabilistycznych prognozach zagrożenia sejsmicznego;

- (b) analizie wartości parametrów wstrząsów sejsmicznych i ich korelacji, zwłaszcza tej reprezentowanej przez zależność Gutenberga-Richtera, oraz
- (c) metodach tomografii pasywnej stosowanych przede wszystkim dla celów średnio- i krótkookresowej oceny zagrożenia sejsmicznego.

Metody typu (a), wychodzące z klasycznych form funkcji ryzyka i opierające się na statystyce matematycznej i teorii prawdopodobieństwa, oferują rygorystycznie sformułowane zależności pozwalające ocenić prawdopodobieństwo wystąpienia silnych wstrząsów sejsmicznych, a przez to i stopień zagrożenia sejsmicznego. Metody te w sposób naturalny nadają się szczególnie dobrze do prognoz adresowanych zarówno do większych obszarów, szczególnie powierzchni, jak i dłuższych horyzontów czasowych. Sposoby grupy (b) należą w zasadzie do metod wykorzystujących fundamentalne zależności empiryczne, których właściwie ustawiona analiza pozwala ocenić zagrożenie sejsmiczne, tym razem również dla poszczególnych rejonów (pól) eksploatacyjnych lub nawet ich elementów takich jak front eksploatacyjny czy też pojedyncza ściana. Tego rodzaju „mikro” skala analizy jest szczególnie uzasadniona w przypadku potrzeby powiązania trendu w zmianach wartości parametrów wspomnianych fundamentalnych zależności empirycznych ze zjawiskami typu geomechanicznego zachodzących w naruszonej eksploatacją górnictwem górotworze. Np. niskie wartości współczynnika kierunkowego prostej reprezentującej zależność Gutenberga-Richtera mogą wskazywać na przygotowywanie sobie przez górotwór warunków sprzyjających emisji silnych wstrząsów w obszarze badań, a tym samym świadczyć o dużym zagrożeniu sejsmicznym. Informacja tego rodzaju może zatem stanowić przesłankę dla podjęcia decyzji o zastosowaniu określonych środków profilaktyki tapaniowej. Metody grupy (c) wykorzystują natomiast obrazy pól prędkości podłużnej fali sejsmicznej otrzymane na podstawie nowoczesnych algorytmów obliczeniowych (także krzywoliniowej) tomografii pasywnej. Są one relatywnie niedrogie i mogą funkcjonować także w ramach rejonowych (nie kopalnianych) systemów obserwacji sejsmologicznych o zwiększonej rozdzielczości, adresowanych do analizy wstrząsów górniczych o niedużych energiach, rzędu $10^2 \div 20^3$ J.

Wpisując się w wyżej zasygnalizowane zapotrzebowanie podziemnego górnictwa węglowego Doktorant zajął się w systematyczny sposób analizą lokalnego zagrożenia sejsmicznego na podstawie analizy obrazów pola prędkości podłużnej fali sejsmicznej, szukając korelacji pomiędzy zmianami w czasie wartości wspomnianej prędkości wyznaczonej w kolejnych oknach czasowych z obserwowaną aktywnością sejsmiczną i aktualnymi warunkami geologiczno-górnictwem prowadzonej lokalnie eksploatacji. Tym samym podjął próbę wykazania, że obserwowane zmiany w czasie mają informatywny charakter dla celów oceny stanu zagrożenia sejsmicznego podczas prowadzenia podziemnej eksploatacji pokładów węgla.

W omawianej rozprawie doktorskiej Doktorant postanowił zatem udowodnić słuszność postawionej przez siebie tezy, że krótkookresowa, zmienna w czasie analiza tomograficznych obrazów pola prędkości pozwala na wskazanie obszarów zagrożonych sejsmicznie, czyli, że jest możliwe wykorzystanie tomografii pasywnej 4D w ocenie zagrożenia sejsmicznego.

Doktorant swoje teoretyczne wywody wsparł szerokimi badaniami dołowymi wykorzystującymi rejestracje sejsmologiczne prowadzone w sposób ciągły, głównie w obszarze górniczym KWK „Ziemowit”.

3. Układ rozprawy doktorskiej

Rozprawa została podzielona na 10 rozdziałów z licznymi podrozdziałami i rysunkami (268), a także została zaopatrzona w obszerne streszczenie, oraz na koniec w spis literatury obejmujący 90 pozycji. Zawartość poszczególnych rozdziałów przedstawia się następująco:

Rozdział 1 (Wprowadzenie) zwięźle przedstawia podstawowe wyzwania jakie stoją współcześnie przed podziemnymi kopalniami surowców energetycznych, zwłaszcza w zakresie zagrożenia sejsmicznego ze strony deformującego się górotworu. Autor skupia się tutaj szczególnie na monitoringu zagrożenia tąpnięciami wykorzystującym wszystkie istniejące już obecnie możliwości techniczne rejestracji aktywności sejsmicznej, postulując jej rozszerzenie także na słabe zjawiska o energiach rzędu 10^2 J. W związku z tym Doktorant występuje z ideą utworzenia w kopalniach rejonowych systemów obserwacji sejsmologicznych wykorzystujących metodę krzywoliniowej tomografii pasywnej dla celów krótkookresowej prognozy zagrożenia sejsmicznego.

Rozdział 2 (Cel, teza i zakres pracy) przedstawiając cele, tezy oraz zakres rozprawy, stanowi swego rodzaju streszczenie wykonanych prac badawczych, przedstawiając zwięźle ich wyniki i zamieszczając zapowiedź ich weryfikacji na obiektach rzeczywistych – głównie na przykładach ścianowej eksploatacji w KWK „Ziemowit”, gdzie zabudowano dwa poligony badawcze.

Zgodnie z zamieszczonymi w rozdziale tezami rozprawy doktorskiej, celowe i jednocześnie możliwe jest wykorzystanie wiedzy o zmiennych w czasie polach prędkości, których charakterystyki uzyskano na podstawie 4-wymiarowych analiz tomograficznych, w krótkookresowych ocenach zagrożenia sejsmicznego w kopalniach podziemnych.

Rozdział 3 (Podstawy teoretyczne tomografii pasywnej) traktuje bliżej o tomografii pasywnej jako jednej z doraźnych metod geofizycznych stosowanych dla celów oceny

zagrożenia sejsmicznego w kopalniach podziemnych. W odróżnieniu od *klasycznych* metod geofizycznych wykorzystujących obserwacje prowadzone w sposób ciągły (metody seismologiczne, sejsmoakustyczne często łączone w zaawansowane technologicznie i aparaturowo systemy hybrydowe) oraz wykorzystujących głównie probabilistyczne metody oceny ryzyka, metoda tomografii pasywnej zbudowana jest na matematycznej teorii zagadnień odwrotnych z regularyzacją rozwiązań, służącej poszukiwaniu takiego modelu pola prędkości, który najlepiej opisuje pomierzone, a więc rzeczywiste wartości czasu przejścia fali sejsmicznej w obrębie modelowanej części górotworu. Trywializując zagadnienie można powiedzieć, że rozwiązania tomografii pasywnej w zasadzie nie obejmują jawnie zjawisk sejsmicznych zaistniałych w przeszłości, gdyż uwzględniają przede wszystkim stan teraźniejszy górotworu w aspekcie rozkładu przestrzennego prędkości fali sejsmicznej, co oczywiście pozwala także porównywać stany prędkościowe zaistniałe w przeszłości w sensie identyfikacji różnego rodzaju trendów.

Jak pisze Doktorant w swojej rozprawie, metoda tomografii pasywnej przy swoich niewątpliwych walorach może sprawiać czasem pewne trudności w uzyskaniu stabilnego rozwiązania, co może mieć związek z niepoprawnie sformułowanym zagadnieniem odwrotnym.

Rozdział 4 (Zastosowanie tomografii pasywnej w górnictwie podziemnym) omawia historyczne i praktyczne aspekty wykorzystywania tej metody we współczesnym górnictwie podziemnym. Jednocześnie Autor przedstawia różnice jakie można zauważyć pomiędzy rodzajami zjawisk sejsmicznych analizowanych za pomocą tomografii aktywnej – zjawiska sztucznie kreowane strzelaniami MW - i tomografii pasywnej – rzeczywiste zjawiska sejsmiczne zaistniałe w obrębie systemu obserwacji. Najkrócej rzecz ujmując, wg Doktoranta tomografia aktywna służy przede wszystkim do rozpoznania budowy litologicznej górotworu i występujących w nim stref spękań, jakościowej oceny stanu naprężenia a także do kontroli efektów stosowania techniki strzałowej w kopalniach. Tomografia pasywna jest natomiast wykorzystywana głównie do:

- oceny stopnia spękania ośrodka skalnego, w której wykorzystuje się korelację pomiędzy strefami niskiej prędkości sejsmicznej fali P i obszarami o dużym stopniu spękania skał i względnie niskim poziomie naprężeń;
- udokładnienia lokalizacji ognisk wstrząsów sejsmicznych w kopalniach na podstawie trójwymiarowego tomograficznego modelu prędkości ośrodka skalnego;
- oceny zagrożenia sejsmicznego i tąpniętami wykorzystującej obserwowany na dole silny związek pomiędzy lokalizacją ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów z obszarami występowania wysokich wartości prędkości propagacji fali P, w których jednocześnie zauważa się duże wartości gradientu zmian pola prędkości.

Rozdział 5 (Techniczno-ruchowe aspekty prowadzenia ciągłej obserwacji tomograficznej)

jest w zasadzie przeglądem warunków jakie muszą być spełnione aby zastosowanie metody ciągłej obserwacji tomograficznej umożliwiło właściwą analizę zmian pola prędkości w rejonach prowadzonej eksploatacji pozwalającą z kolei sformułować bieżącą ocenę stanu zagrożenia sejsmicznego. Wśród wielu czynników, które o tym decydują, Autor wymienia:

- odpowiedni układ przestrzenny i wyposażenie sieci sejsmologicznej w urządzenia pozwalające uzyskać wysokiej jakości cyfrowych sejsmogramów;
- co najmniej kilkadziesiąt zjawisk sejsmicznych uwzględnionych w analizie;
- niski poziom zakłóceń umożliwiający identyfikację wstrząsu na tle szumu sejsmicznego.

Jednocześnie Doktorant wskazuje na pewne ograniczenia w zasięgu możliwej detekcji wstrząsów niskoenergetycznych spowodowane tłumieniem ośrodka skalnego oraz błędami odczytu czasu pierwszego wystąpienia fali P.

Biorąc pod uwagę powyższe, Autor dokonał ocenę jakości rejestrowanych i analizowanych danych dla dwóch poligonów badawczych: POLIGON I: ściana 906, pokład 209, blok F oraz POLIGON II: ściana 913, pokład 209, blok D.

Rozdział 6 (Charakterystyka metodyki badań i poligonów badawczych) zawiera przede wszystkim:

- (a) opis prowadzonych badań dołowych oraz
- (b) charakterystyki geologiczno-górnictwa wykorzystanych poligonów badawczych.

Autor podaje, że w trakcie badań pod uwagę brano sejsmogramy, dla których możliwe było określenie co najmniej pięć czasów wejścia fali P rozprzestrzeniającej się z prędkością 3750 m/sek., co wykazały wykonane uprzednio kalibracje in-situ.

Pięcio- i pół-miesięczne obserwacje prowadzone w POLIGONIE I objęły 30 cykli obliczeniowych wykorzystujących 594 cyfrowe sejsmogramy wstrząsów rejestrowanych na 9 sejsmometrach, natomiast podczas prawie 13 miesięcznych pomiarów w POLIGONIE II na podstawie 3327 sejsmogramów zarejestrowanych na 12 sejsmometrach uzyskano 55 cykli obliczeniowych.

Charakterystyki poligonów badawczych zawierają ogólne informacje o warunkach geologicznych i parametrach geomechanicznych skał a także o aktywności sejsmicznej towarzyszącej eksploatacji w latach 1997 do 2011 w rozpatrywanych rejonach kopalni.

Rozdział 7 (Krótkookresowa ocena zagrożenia sejsmicznego z wykorzystaniem krzywoliniowej tomografii pasywnej zintegrowanej z rejonowym systemem obserwacji sejsmologicznej) przedstawia sytuacje geologiczno-górnictwa na 2 poligonach badawczych wymienionych wyżej w 30 cyklach 28-dniowych (POLIGON I) oraz 55 cyklach 14-dniowych.

Każdy z poszczególnych cykli (etapów oceny zagrożenia) ilustrowany jest 3 rysunkami przedstawiającymi:

- mapy prędkości sejsmicznej fali podłużnej P wyznaczone metodą krzywoliniowej tomografii pasywnej,
- mapy gęstości promieni sejsmicznych,
- mapy błędów odwzorowania pola prędkości,

z których to Autor wyciąga szereg poznawczych wniosków wykorzystanych w następnych rozdziałach pracy doktorskiej.

Rozdział 8 (Dyskusja wyników krótkookresowej oceny zagrożenia sejsmicznego) jest najważniejszym, z punktu widzenia weryfikacji proponowanego podejścia, rozdziałem omawianej rozprawy doktorskiej. Na początek Doktorant odnosi się do dotychczasowej praktyki w zakresie tomografii pasywnej, która wykorzystując sprzęt o ograniczonej czułości nie pozwalała przez to śledzić zmian pola prędkości w wystarczająco krótkich okresach tak by na podstawie prowadzonego monitoringu móc już wnioskować o bieżącym zagrożeniu sejsmicznym. Następnie Autor odnosi się do charakterystyk sprzętu używanego do obserwacji sejsmologicznych w aspekcie jego wysokiej rozdzielczości i związanych z tym większych możliwości efektywnego wykorzystania do sporządzania krótkookresowych prognoz zagrożenia. Jak wskazują uzyskane wyniki obserwacji, wykorzystanie niedostępnej dotychczas informacji o wstrząsach niskoenergetycznych pozwoliło otrzymać istotnie wyższą jakość tomograficznych obrazów pól prędkości, które są bardziej stabilne niż dotychczas i mając wyższe pokrycie promieniami sejsmicznymi generują błędy odwzorowania o znacząco niższej wartości.

Rozdział 9 (Podsumowanie) stanowi zwięzłe *resume* wyników wykonanych badań z jednoczesnym uwypukleniem istotnych osiągnięć Doktoranta w zakresie prowadzenia rejestracji aktywności sejsmicznej nowoczesną wielokanałową aparaturą do badań sejsmicznych, która skonfigurowana w formie dedykowanych określonym rejonom kopalni oddziałowych sieci sejsmologicznych pozwala otrzymać znacząco wyższą niż dotychczas jakość obrazów tomograficznych. Tym samym zostało zrealizowane praktycznie zagadnienie prowadzenia skutecznego monitoringu ryzyka sejsmicznego, które angażując metody krzywoliniowej tomografii pasywnej są w stanie na podstawie krótkoterminowej prognozy zidentyfikować na bieżąco strefy o potencjalnie wysokim stopniu zagrożenia sejsmicznego. Doktorant udowodnił tym samym swoją tezę, że „krótko-okresowa, zmienna w czasie analiza tomograficznych obrazów pola prędkości pozwala na wskazanie obszarów zagrożonych sejsmicznie, czyli że jest możliwe wykorzystanie tomografii pasywnej 4D w ocenie zagrożenia sejsmicznego”.

4. Uwagi do pracy

Ogólne uwagi dotyczące rozprawy doktorskiej mgr inż. Adriana Gołdy, sprowadzają się do następujących stwierdzeń dokumentujących znaczące osiągnięcia badawcze Doktoranta:

1. W recenzowanej dysertacji przedstawiono pomysłną próbę wykazania istotnej korelacji pomiędzy zmianami w charakterystykach pól prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych typu P i zmieniającym się wraz z postępem frontu zagrożeniem sejsmicznym dokumentowanym rozwiązaniami oferowanymi przez metodę krzywoliniowej tomografii pasywnej.
2. Na podstawie wyjątkowo szerokiej analizy numerycznej wykazano, że w większości przypadków zwiększonemu zagrożeniu sejsmicznemu towarzyszą koncentracje naprężeń w miejscach gdzie występują również względnie wysokie wartości oraz znaczący gradient zmian wartości prędkości propagacji fali P.
3. Autor w swoich badaniach dołowych wykorzystał najnowocześniejszą i wyjątkowo czułą aparaturę pozwalającą uwzględnić w analizie także wstrząsy słabsze, co z kolei umożliwiło prowadzić monitoring zagrożenia sejsmicznego w sposób ciągły i na względnie krótkim horyzoncie czasowym.
4. Niewątpliwą nowością proponowanego podejścia jest syntetyczne zaprezentowanie wyników obliczeń, uzyskanych dla 85 cykli monitoringu na podstawie tomografii pasywnej, w formie zwięzłego sprawozdania pisemnego uzupełnionego mapami bieżących wartości trzech najważniejszych parametrów modelu: prędkości fali sejsmicznej P, gęstości pokrycia promieniami sejsmicznymi oraz błędów odwzorowania pola prędkości. Zebrany materiał stanowi szczególnie wartościowy wkład do wiedzy o procesach geofizycznych zachodzących w górotworze podczas eksploatacji górniczej.
5. Zaproponowana w rozprawie metoda może już teraz być wykorzystana do bieżącej oceny zagrożenia sejsmicznego w KWK „Ziemowit”. Po koniecznym skalibrowaniu do innych warunków geologiczno-górnicznych będzie stanowić cenne uzupełnienie kryterialne w ramach tzw. „metody kompleksowej” funkcjonującej w szeregu kopalniach węgla kamiennego.
6. Rozprawa doktorska pod względem edytorskim ma charakter wzorcowy, a drobne błędy literowe są nieliczne i nie wpływają na jej ogólną ocenę.

Niezależnie od generalnie wysokiej oceny pracy, Recenzent zgłasza kilka uwag ogólnego charakteru, mających na celu wzbogacenie w przyszłości obecnej formy recenzowanej rozprawy doktorskiej. Uwagi te są następujące:

7. Jak wspomniano wyżej, jednym z ważnych zastosowań metody tomografii pasywnej jest możliwość formułowania oceny zagrożenia sejsmicznego w kopalniach podziemnych a więc dokonywania prognoz w zakresie potencjału dla zaistnienia silnych/wysokoenergetycznych wstrząsów parasejsmicznych, zakładając, że istnieje istotna korelacja pomiędzy prędkością fali sejsmicznej przechodzącej przez górotwór a owym potencjałem. Przyjmuje się przy tym, że większą lokalną aktywność sejsmiczną zapowiadają wysokie wartości prędkości fali $v_s(x, y)$ i towarzyszącego jej gradientu $grad(v_s) = \frac{\partial v_s}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial v_s}{\partial y} \hat{j}$ w rozpatrywanej lokalizacji. Mając do dyspozycji tak obfity materiał jak wykazał to Doktorant w swojej rozprawie, można by się pokusić aby go wykorzystać do pogłębionej analizy wspomnianych wyżej zależności.
8. Innym obiecującym obszarem dalszej aktywności Doktoranta może być odniesienie wyników uzyskanych na podstawie tomografii pasywnej do prowadzonych równoległe na tych samych obszarach kopalni analiz numerycznych wykorzystujących np. metodę elementów skończonych sformułowaną w 4ch wymiarach na tle lokalizacji rzeczywistych zjawisk sejsmicznych. Wydaje się, że integracja metod geofizycznych i metod geomechanicznych pozwoli tą drogą lepiej sprecyzować warunki konieczne dla zaistnienia wstrząsów wysokoenergetycznych niż czyni to każda ze wspomnianych metod osobno.
9. Na koniec warto zachęcić Doktoranta do głębszych badań nad interpretacją geomechaniczną stref podwyższonych/obniżonych wartości prędkości sejsmicznej fali podłużnej i ich związku z charakterystyką składowych lokalnego tensora stanu naprężenia.

5. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Gołdy, poruszając ważny temat oceny stanu zagrożenia sejsmicznego dla prawidłowego funkcjonowania podziemnych wyrobisk górniczych stanowi oryginalny wkład w rozwój wiedzy górniczej. Wyjątkowo wartościowa i oryginalna jest uzyskana samodzielnie przez Doktoranta baza danych wynikowych z przeprowadzonych symulacji komputerowych i związane z nimi rezultaty potwierdzające postawioną tezę dysertacji. Opiniowana rozprawa ma zarówno walory poznawcze, gdyż formułuje nowe metody badania zachowania się górotworu w warunkach rzeczywistego obciążenia, jak i charakter użytkowy, ponieważ wyniki przedstawionych rozważań mogą być już teraz przydatne przy wyborze bardziej bezpiecznych sposobów prowadzenia eksploatacji w podziemnych kopalniach węgla kamiennego, a w przyszłości także w zakładach górniczych eksploatujących innego rodzaju kopaliny.

Należy stwierdzić, że Doktorant wykazał się podczas swojej pracy bardzo dobrą znajomością aparatu matematycznego, opanowaniem warsztatu badawczego oraz zdolnościami do samodzielnego rozwiązywania problemów naukowych. Stwierdzam zatem, że oceniana dysertacja odpowiada wymogom stawianym w Ustawie z dn. 14.03.2003 r., o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. Nr 65, poz. 595), co daje mi z kolei podstawę dla sformułowania wniosku do Rady Naukowej Głównego Instytutu Górnictwa o dopuszczenie mgr inż. Adriana Gołdy do jej publicznej obrony.



Wrocław, 06-10-2017 r.