

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Aptekorza
p.t.: „Automatyczna detekcja pierwszego wstąpienia podłużnej fali sejsmicznej
z wykorzystaniem technologii CUDA dla cyfrowych zapisów wstrząsów
górnicznych”

Podstawa prawna wykonania recenzji: zamówienie Naczelnego Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa Pana prof. dr hab. inż. Stanisława Pruska, zawarte w piśmie z dnia 23 listopada 2018 r. o nr NSR/229/2018.

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa składa się z obszernego wstępu, stanowiącego rozdział 1, krótkiego, jednostronnicowego rozdziału 2, w którym podano cel, tezę i zakres pracy. Dalszą część rozprawy stanowią cztery rozdziały, w których zawarto opis materiałów, metod, uzyskanych wyników, a także ich dyskusję. Po części merytorycznej znajdują się: rozdział 7, w którym podano wnioski końcowe, spis literatury, zawarty w rozdziale 8, oraz wykazy i załączniki ujęte w rozdziale 9. Praca obejmuje łącznie 116 ponumerowanych stron oraz znajdujące się na jej początku 3 strony nieuwzględnione w numerowaniu. Rozważania zostały zilustrowane na 43 rysunkach. Wykaz tabel zawiera 22 pozycje. W rzeczywistości w pracy jest 21 tabel – brakuje tabeli 18. Spis literatury liczy 71 pozycji. Dwie pozycje w spisie literatury to artykuły, których Pan mgr inż. Marcin Aptekorz jest współautorem.

Promotorem rozprawy jest Pan dr hab. inż. Adam Lurka, prof. GIG.

Tematyka rozprawy dotyczy metody sejsmologii górniczej, która jest obligatoryjnie stosowana we wszystkich zakładach górniczych eksploatujących złoża w warunkach występowania zagrożenia tąpnięciami. Zwiększająca się głębokość eksploatacji oraz konieczność prowadzenia jej w skomplikowanych warunkach geologiczno-górnicych, wpływają na wzrost tego zagrożenia. W związku z tym, wiedza o kształtowaniu się stanu zagrożenia tąpnięciami prowadzonych robót, a także

o skuteczności wykonywanych zabiegów aktywnej profilaktyki tąpaniowej, staje się coraz bardziej istotna.

Informacji o stanie zagrożenia tąpniętami wyrobisk górniczych, a także o jego zmianach, dostarczają wyniki obserwacji poziomu sejsmiczności indukowanej. W ostatnich latach nastąpił znaczny postęp technologiczny w odniesieniu do konstrukcji aparatów sejsmologicznych stosowanych w górnictwie. Stale rozbudowywane są sieci obserwacyjne. Coraz częściej kopalniane stacje geofizyki górniczej wyposażone są w kilkadziesiąt stanowisk sejsmometrycznych. Zwiększająca się liczba stanowisk podziemnych sieci obserwacyjnych powoduje, przy ograniczonych powierzchniach obszarów górniczych, że część tych stanowisk lokalizowana jest w niedużej odległości od przodków prowadzonych wyrobisk górniczych. Wpływa to na wzrost liczby rejestrowanych wstrząsów górotworu, ponieważ zmniejsza się próg energetyczny zjawisk, które mogą być poprawnie zaobserwowane. O ile jeszcze kilkanaście lat temu rejestrowano wstrząsy górotworu o energiach nie mniejszych od 10^3 J, to obecnie z reguły rejestrowane są także zjawiska o energiach rzędu 10^2 J.

Pierwszy etap interpretacji rezultatów monitoringu sejsmologicznego obejmuje wyznaczenie lokalizacji i energii sejsmicznego zjawiska. Od poprawnego wykonania tych podstawowych czynności zależy skuteczność dalszych analiz, mających na celu ocenę stanu zagrożenia tąpniętami prowadzonych robót górniczych. Duża liczba stanowisk w sieci sejsmologicznej w połączeniu ze znaczną liczbą rejestrowanych wstrząsów górotworu oznacza konieczność poświęcania coraz więcej czasu na określanie pierwszych wstąpień fal sejsmicznych – parametru wykorzystywanego podczas lokalizacji ognisk wstrząsów.

W świetle powyższych uwag, podjęcie przez Autora rozprawy tematyki związanej ze zautomatyzowaniem detekcji pierwszego wstąpienia podłużnej fali sejsmicznej uważam za bardzo celowe, biorąc pod uwagę zarówno względy poznawcze jak i aplikacyjne.

2. Merytoryczna ocena rozprawy doktorskiej

We wstępie do pracy Autor omówił podstawowe zagadnienia związane z akceleracją obliczeń dzięki zastosowaniu technologii CUDA oraz sposobami automatycznego wyznaczania czasów wejścia fali P. Krótko scharakteryzował także wybrane metody lokalizacji ognisk wstrząsów górotworu. Zwrócił uwagę, że skuteczne

zastosowanie metod automatycznego wyznaczania czasu pierwszego wejścia fali P wymaga zaimplementowania metody automatycznego odrzucania silnie zaszumionych sejsmogramów.

Zwraca uwagę wielkość rozdziału zatytułowanego „Wstęp”. Zajmuje on 20 stron pracy. Jest to uzasadnione różnorodnością poruszanej tematyki, ale być może bardziej celowe byłoby potraktowanie podrozdziałów 1.1 ÷ 1.4 jako samodzielnych rozdziałów pracy. Podczas lektury tej części pracy nasunęły mi się następujące, drobne uwagi, głównie o charakterze redakcyjnym.

Na rys. 4 Autor zaprezentował czas wykonania obliczeń dla jednej krotki dla różnej liczby danych. Wprawdzie podał źródło, z którego pochodzi zamieszczony wykres (artykuł, którego jest współautorem), ale w pracy warto było podać wyjaśnienia skrótów zamieszczonych w legendzie wykresu. Nie wymagałoby to szukania tych informacji w przywoływanym artykule.

W pracy brakło informacji, że zaprezentowane na str. 19 metody graficzne nie pozwalają uzyskać rozwiązania równań (6), zastosować je można tylko do lokalizacji epicentrow wstrząsów.

Uściślenia wymaga także stwierdzenie, które znalazło się u dołu str. 19, o iteracyjnym rozwiązaniu układu równań typ 5. Ponadto, wydaje się, że częściej używany jest podział metod optymalizacji nieliniowej na bezgradientowe i gradientowe (str. 20).

W drugim rozdziale przedstawione zostały: cel, teza i zakres pracy. Cele pracy zostały jasno określone – praktyczne zastosowanie algorytmów automatycznego wyznaczania czasu pierwszego wejścia fali P, wykorzystujących technologię CUDA, w procesie lokalizacji ognisk wstrząsów górotworu oraz rozszerzenie analizy sejsmogramów o metodę automatycznego odrzucania silnie zaszumionych sejsmogramów. W rozdziale tym sformułowana została także następująca teza pracy:

„Detekcja czasu pierwszego wstąpienia podłużnej fali sejsmicznej P z wykorzystaniem technologii CUDA pozwala na automatyzację procesu lokalizacji zjawisk sejsmicznych w kopalniach”.

Uważam, że tak sformułowana teza pracy jest poprawna. Sądzę jednak, że równie uprawnione byłoby stwierdzenie, że: *detekcja czasu pierwszego wstąpienia podłużnej fali sejsmicznej P pozwala na automatyzację procesu lokalizacji zjawisk sejsmicznych w kopalniach*. Warto było podkreślić, być może trochę inaczej formułując tezę pracy, że zastosowanie technologii CUDA umożliwia przyspieszenie detekcji czasu pierwszego wstąpienia fali P.

W rozdziale 3 zostały scharakteryzowane dane wykorzystane podczas realizacji pracy. W wykonywanych testach numerycznych uwzględniono ponad trzy tysiące sejsmogramów wybranych 100 wstrząsów, które wystąpiły w rejonie silnie zagrożonej tąpniętami ściany 3 prowadzonej w KWK „Bobrek-Centrum”. Autor podał także nazwy wykorzystanych kompilatorów, środowisk programistycznych oraz dodatkowych bibliotek. W rozdziale tym podana została także informacja o konfiguracjach komputerów wykorzystywanych w testach numerycznych. Konfiguracje te, w dalszej części pracy oznaczane PC1, PC2 i PC3 nie imponują mocą obliczeniową, pojawiły się na rynku w latach 2010÷2012. Jest to istotne ze względu na porównywanie czasu obliczeń wykonywanych z wykorzystaniem CPU i GPU. Należy jednak dodać, że od premier wykorzystywanych w testach kart graficznych upłynął równie długi okres czasu.

Rozdział 4 zawiera opis zastosowanych w prowadzonych badaniach: metody lokalizacji ognisk wstrząsów górotworu, algorytmów automatycznego wyznaczania czasów wejścia fali P, które zostały poddane akceleracji z wykorzystaniem technologii CUDA, a także algorytmu automatycznego odrzucania silnie zaszumionych sejsmogramów.

Odnosnie treści rozdziału 4 można sformułować poniższe, drobne uwagi, które, podobnie jak w przypadku poprzednio sformułowanych, mają głównie redakcyjny charakter.

Zapis wzoru 16 sugeruje uwzględnianie w obliczeniach wartości prędkości fal podłużnych zależnych od położenia ogniska wstrząsu, natomiast wcześniej stwierdzono, że przyjmowano stałą wartość, wynoszącą 3580 m/s.

Warto w tym miejscu przypomnieć liczne prace B. Drzęźli, w których poruszał problem wpływu wartości wykładnika p (wyboru normy L1 względnie L2) na uwarunkowanie i niejednoznaczność zadania lokalizacji.

W tekście pod wzorem 24 znalazło się błędne odwołanie do zależności 26.

Rysunki 11÷14 warto było nieco dokładniej opisać. Znajdują się na nich informacje, które nie zostały wyjaśnione ani w treści pracy, ani w podpisach pod rysunkami.

Na 38 stronie, powyżej rys. 13 znalazła się uwaga dotycząca konieczności wykonywania obliczeń w oknach o długości mniejszej od całkowitej długości sejsmogramu. Wynika to zapewne z analizy rezultatów większej liczby testów numerycznych; celowe byłoby pokazać w tym miejscu pracy, jak przyjęcie okna

o mniejszej długości wpływa na zwiększenie poprawności wyznaczania czasów wejścia fali P, a także odnieść się do problemu długości tego okna.

Analogicznie, w opisie metody STA/LTA brakuje informacji o długościach okien. Nad rys. 14 Autor stwierdza, że okna STA i LTA przesuwano sekwencyjnie o jedną próbkę wzdłuż całego sygnału sejsmicznego, natomiast pod tym rysunkiem podaje, że długość okna LTA była równa długości całego analizowanego sejsmogramu. Jest to powtórzone na 45 stronie pracy.

Na tej stronie znalazł się zapis: „*Wartość bezwzględna LTA obliczana jest w jednym wątku przez procesor główny CPU komputera...*”. Co Autor rozumie pod pojęciem wartość bezwzględna? Średnia wartość kwadratów amplitud sygnału zawsze jest nieujemna.

Na 46 stronie chyba po raz pierwszy zostało użyte pojęcie „długość okna”. Uważam to określenie za bardziej trafne niż „szerokość okna”, bardzo często występujące wcześniej w pracy.

W opisie do listingu 7 znajduje się stwierdzenie, że zmienna *wko* zawiera numer próbki końca skróconego okna czasowego, tymczasem z zamieszczonego listingu wydaje się, że tak nie jest, bowiem wartość *wko* może być większa od wartości *N*.

W związku z interesującymi algorytmami odrzucania sejsmogramów z szumem sejsmicznym o dużych amplitudach mam dwa pytania. Czy można przyjąć wartość progu, wynoszącą 5 (48 strona pracy) stosować także w przypadku analizy rejestracji pochodzących z innych sieci sejsmologicznych, a także, czy Doktorant zastanawiał się nad możliwością przyjęcia jakiejś miary względnej pozwalającej określić wartość powyższego progu. Kolejne pytanie dotyczy drugiej z prezentowanych metod. Od czego zależy długość przedziału czasu, która w badaniach prowadzonych przez Autora wahała się od 200 do 400 próbek?

W rozdziale 5 omówione zostały wyniki badań możliwości przyspieszenia obliczeń czasów wejścia fali P dzięki zastosowaniu technologii CUDA. Zaprezentowane zostały także rezultaty automatycznej lokalizacji ognisk wstrząsów górotworu.

W pierwszej kolejności przeanalizowane zostało automatyczne wyznaczanie czasu wejścia fali P z wykorzystaniem algorytmu STA/LTA. Większość epicentrow wstrząsów zlokalizowanych automatycznie znajduje się w stosunkowo niedużej odległości od epicentrow zlokalizowanych z wykorzystaniem „ręcznie” wyznaczonych czasów wejścia fali P. Ponieważ jednak w przypadku niektórych z analizowanych

zdarzeń różnice lokalizacji są stosunkowo duże, mam pytanie, czy Doktorant zweryfikował (poprzez samodzielne ich odczytanie z sejsmogramów wstrząsów) wyniki „ręcznego” określenia czasów wejścia fali. Być może w tych przypadkach duże różnice wynikają z błędów popełnionych przez geofizyka górniczego? Wprawdzie Autor niejednokrotnie używa sformułowania „doświadczony geofizyk”, ale wydaje się, że przynajmniej część sejsmogramów, szczególnie w przypadku zjawisk charakteryzujących się małymi energiami sejsmicznymi, była interpretowana przez mniej doświadczonych obserwatorów zatrudnionych w stacji geofizyki górniczej. Wątpliwości budzi zapis warunków w tytułach kolumn 13, 14 oraz 16, 17 w tabeli 5. Wydaje się, że przypadku tych dwóch ostatnich kolumn, zamiast wartości granicznej 1 powinna być wpisana wartość 0.

W tej samej tabeli, w kolumnie 8, której tytuł wymaga korekty, podano liczbę czasów wejść fali P obliczonych automatycznie. Na przykład w pierwszym wierszu wynosi ona 1660. Tymczasem, sumując wartości podane w kolumnach 14, 15 i 17 uzyskujemy jedynie 772 czasy wejścia. Powstaje pytanie, co z pozostałymi 888 przypadkami. Powyższe uwagi dotyczą także tabel 7, 9 i 11.

Odnosnie danych znajdujących się w tab. 5 nie jest jasne, czym różnią się warianty oznaczone STALTA2-T3 i STALTA2-T3-V1. Ponadto, w przypadku najlepszego wariantu, STALTA2-Z100-V4 przyjęto próg odrzucania sejsmogramu wynoszący 3. Jest to sprzeczne ze stwierdzeniem ze strony 48: *„W pracy przyjęto wartość progu jako 5, którą otrzymano metodą wielokrotnych prób na cyfrowych sejsmogramach zjawisk sejsmicznych”*. Także podczas analizy automatycznego wyznaczania czasów wejścia fali P algorytmem AR-AIC (z modelami F i S – AR1) przyjęto próg o wartości 2.

W przypadku algorytmu AR1 uzyskano nieco gorsze rezultaty automatycznego wyznaczania czasu wejścia fali P w porównaniu do algorytmu STA/LTA.

Analogiczne jak podane powyżej, uwagi, dotyczące wartości progu i uzyskanych rezultatów obliczeń, można sformułować biorąc pod uwagę kolejny rozpatrywany algorytm – AR-AIC (z modelem F – AR2).

Analizując dane znajdujące się w tab. 7 trudno stwierdzić, czym różnią się warianty oznaczone AR1-T2-V1 i AR1-Z100-V1, natomiast w przypadku tab. 9 – taka sama wątpliwość powstaje w odniesieniu do wariantów AR2-T2-V1 i AR2-Z100-V1.

Wykorzystując kolejny z badanych algorytmów automatycznego wyznaczania czasu wejścia fali P – AIC-MAEDA zlokalizowano jedynie 53 wstrząsy. Być może wpływ na

to miało przyjęcie większej wartości progu kryterium odrzucenia sejsmogramu, która wynosiła w tym przypadku 5.

Rozważania zamieszczone w rozdziale 5.3 mają podstawowe znaczenie, biorąc pod uwagę udowodnienie tezy pracy. Autor przedstawił w nim wyniki badania akceleracji obliczeń przeprowadzanych z wykorzystaniem procesorów kart graficznych (GPU), w porównaniu do takich samych obliczeń wykonywanych z wykorzystaniem procesorów głównych (CPU). Wyniki wszystkich przeprowadzonych testów wskazują, że wykorzystanie technologii CUDA pozwala skrócić czas automatycznego wyznaczania momentów wejścia fali P na stanowiska sieci seismologicznej. Oczywiście wielkość tego przyspieszenia zależy od wielu czynników. Natomiast jego maksymalna wartość wyniosła, zgodnie z informacją podaną na 76 stronie, 188 (*„Jest to największa wartość współczynnika akceleracji jaką udało się zaobserwować w ramach niniejszej pracy”*) lub 220, co podano na 90 stronie pracy (*„Maksymalne uzyskane w pracy przyspieszenie obliczeń automatycznego wyznaczania czasu wejścia fali sejsmicznej P wyniosło aż 220 razy”*). To drugie stwierdzenie zostało powtórzone na stronach 90 i 93.

Wartość współczynnika akceleracji, ze względu na długotrwały transfer danych do i z GPU, zależy od długości sejsmogramu, dla którego określany jest automatycznie czas wejścia fali P. Czy jednak na pewno jest tak, że w przypadku sygnału o długości 541 próbek, współczynnik akceleracji wyniósł 4, ze względu na to, że *„zasoby karty graficznej nie zostały w pełni wykorzystane (z czym oczywiście należy się zgodzić), a czas na transfer danych pomiędzy pamięcią komputera a kartą graficzną się zwiększył”*, jak stwierdza Autor na 76 stronie pracy?

Uważam, że w pracy brakło wyjaśnienia, co należy rozumieć przez *„stabilność pracy danego komputera”*? Określenie sugeruje, że jest to cecha sprzętowa, natomiast wyniki testów numerycznych wskazują, że zależy ona od rozwiązywanego problemu. W przypadku metody STA/LTA zarówno konfiguracja PC2, jak i PC3 pracują stabilnie (rys. 35). Natomiast wykonując obliczenia metodą AR2 stwierdzono, że konfiguracja PC2 pracuje niestabilnie, w przeciwieństwie do konfiguracji PC3, która zachowała stabilność działania (rys. 36).

W rozdziale 6 Autor przedstawił dyskusję uzyskanych wyników. Zwrócił w nim uwagę, że traktowane jako wartości referencyjne, wyniki lokalizacji epicentrow wstrząsów przez pracowników kopalnianej stacji geofizyki górniczej są obarczone błędami, wynikającymi z niepewności określenia czasów wejścia fali P oraz określenia

jej prędkości rozchodzenia się w górotworze. Zamieścił mapę statystycznych błędów lokalizacji składowych poziomych XY ognisk wstrząsów. Wynika z niej, że odchylenie standardowe tych składowych nie przekracza 30 m.

Analizując uzyskane wyniki badań (tab. 17) Autor stwierdził, że algorytm STA/LTA umożliwia wyznaczenie największej liczby czasów wejść, natomiast modele autoregresyjne czynią to dokładniej. Czy wynika to z analizy wartości mediany odległości epicentrow będących rezultatem lokalizacji automatycznej i „ręcznej”? Bo wartości średnie tych odległości przeczą temu stwierdzeniu.

W rozdziale 7 przedstawione zostały wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Generalnie są one poprawnie sformułowane, wynikają z rozważań zaprezentowanych w pracy. Wątpliwość budzi jedynie stwierdzenie, że: *„Dla algorytmu AIC-MAEDA uzyskano... W związku z tym można stwierdzić, że nadaje się do wdrożenia w kopalnianych stacjach geofizyki do automatyzacji procesu lokalizacji ognisk wstrząsów górniczych”*. Wyniki porównań badanych algorytmów wydają się wskazywać, że lepsze wyniki uzyska się stosując algorytm STA/LTA.

Podsumowując, pragnę podkreślić, że wysoko oceniam merytoryczny poziom recenzowanej pracy. Sformułowane uwagi krytyczne nie zmieniają bardzo wysokiej oceny rozprawy. W oparciu o analizę przedłożonej pracy stwierdzam, że Doktorant bardzo rzetelnie wykonał zaplanowany przez siebie zakres modelowania numerycznego. Umożliwiło to zrealizowanie założonych celów pracy i udowodnienie przyjętej tezy. Treść rozprawy świadczy o jego bardzo dobrej znajomości opisywanej problematyki.

Uważam, że ze względu na dużą wartość poznawczą i aplikacyjną uzyskanych wyników, powinny one zostać opublikowane. W trakcie opracowywania publikacji Autor powinien poprawić m.in. wymienione wcześniej, drobne błędy oraz niefortunne sformułowania, które znalazły się w pracy, m.in.: wykaz skrótów nie jest kompletny, brakuje w nim m.in. niektórych skrótów ze stron 11 i 12; brak opisu osi na kilku wykresach (np. rys. 1, rys. 23, rys. 26, rys. 29, rys. 32); kropka zamiast przecinka w zapisie liczb (np. strony 10, 11, 76); „fale sprężyste” zamiast „elastyczne” (str. 11); „akceleracja różnych problemów”, „punktów” zamiast „punktów” (str. 12); „liczba” zamiast „ilość” (str. 13, 18); brak wytłuszczenia zwrotu „metody iteracyjne” w tab. 1; generalnie proponowałbym przeniesienie nad tabele ich tytułów; „i” zamiast „&”

w przypadku publikacji w języku polskim; zmiana nazwy jednego z dwóch stanowisk oznaczonych St. 2 na rys. 6; „wstrząsów górotworu” zamiast „wstrząsów górniczych” (wielokrotnie, np. str. 25); „funkcja AIC przyjmuje kształt” (str. 35); „początek czasu wejścia” (str. 45); ujednoczenie nazewnictwa: „współczynnik przyspieszenia”, „współczynnik akceleracji”, „przyspieszenie”, odpowiednio na rysunkach 35, 36 i 37; ostatnie zdanie na 91 stronie. Korekty wymaga także spis literatury, na przykład pozycje: 9, 24, 30, 41, 47, 48, 51, 52 i 53. Proponuję także zmienić „i” na „and” w artykułach napisanych w języku angielskim.

Pragnę jeszcze raz zaznaczyć, że te drobne błędy nie zmniejszają wysokiej oceny wartości merytorycznej pracy.

3. Wniosek końcowy

W konkluzji wyrażam opinię, że recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Aptekorza p.t. **„Automatyczna detekcja pierwszego wstąpienia podłużnej fali sejsmicznej z wykorzystaniem technologii CUDA dla cyfrowych zapisów wstrząsów górniczych”** dotyczy dyscypliny naukowej górnictwo i geologia inżynierska. Ma charakter poznawczy i użyteczny, stanowi kompleksowe i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego sformułowanego w temacie rozprawy, co potwierdza, że Autor posiada pełne umiejętności formułowania celów badawczych, prowadzenia badań, odpowiedniego rozwiązywania zagadnień teoretycznych i eksperymentalnych, wnioskowania w oparciu o wyniki przeprowadzonych badań.

Analizowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim w myśl art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki. Na tej podstawie wnoszę do Rady Naukowej GIG o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

