

Prof. dr hab. inż. Aleksandr Cariow  
Katedra Architektury Komputerów  
i Telekomunikacji  
Wydział Informatyki  
Zachodniopomorski Uniwersytet  
Technologiczny w Szczecinie  
ul. Żołnierska 49

Szczecin, dnia 26.06.2015 r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**  
DLA RADY WYDZIAŁU TELEKOMUNIKACJI,  
INFORMATYKI I ELEKTROTECHNIKI UNIWERSYTETU  
TECHNOLOGICZNO-PRZYRODNICZEGO  
W BYDGOSZCZY

**Tytuł rozprawy:**

**Zastosowanie wybranej klasy wielomianów do zapewnienia stabilności późno-  
czasowego rozwiązania równań EFIE modelujących anteny liniowe**

**Autor rozprawy:**

mgr inż. Anna Witenberg

**Promotor:**

dr hab. inż. Maciej Walkowiak, prof. nadzw. UTP w Bydgoszczy

**I. Aktualność tematu rozprawy**

W zagadnieniach promieniowania pola elektromagnetycznego jednym z najlepszych opisów matematycznych są równania całkowe. W odróżnieniu od opisu równaniami różniczkowymi, gdzie potrzebne są dodatkowe warunki początkowe i brzegowe, równania całkowe mają te dodatkowe warunki wbudowane w swoją strukturę. W przypadku anten liniowych wygodnie jest posługiwać się równaniem całkowym, które wyprowadzane jest z warunków dla pola elektrycznego przy powierzchni przewodnika. Takie postępowanie prowadzi do sformułowania całkowego równania pola elektrycznego

(Electric Field Integral Equation), z którego można obliczyć prąd płynący po powierzchni przewodów.

Jeżeli równania są formułowane w dziedzinie czasu (Time Domain), to rozwiązanie ma charakter ewolucyjny, co prowadzi do utraty stabilności obliczeń. Przy pobudzeniu anteny krótkim impulsem pola, niemal cała energia jest promieniowana w początkowej części procesu, tak zwanym czasie początkowym. W tym okresie proces zależy silnie od charakteru pobudzenia. W okresie późniejszym przepływ prądu jest kształtowany wyłącznie cechami samej anteny, dlatego okres ten jest dogodny dla identyfikacji. Niestety, poziom zjawisk jest już w okresie późniejszym bardzo mały, a proces obliczeniowy zwykle niestabilny.

Rozważane w tej pracy anteny należą do klasy doskonale przewodzących obiektów o skończonych rozmiarach. Klasa ta ma wielkie znaczenie praktyczne. Może też być łatwo rozszerzona na obiekty o nieskończonych rozmiarach oraz na obiekty wykonane ze stratnych materiałów lub dielektryków.

## II. Przedmiot badań, cel oraz tezy pracy

Praca Autorki jest poświęcona przede wszystkim rozważaniom nad zapewnieniem stabilności procesu obliczeniowego w dalekim czasie późniejszym, wykorzystując do tego celu przede wszystkim odpowiednio dobrane wielomiany.

W pracy zostały zadeklarowane dwa podstawowe cele:

- zaproponowanie metody hybrydowej, polegającej na mieszanym, numeryczno-analitycznym opisie procesu ograniczenia lub uniknięcia utraty stabilności obliczeń późnoczasowego rozwiązania całkowych równań pola elektrycznego w dziedzinie czasu modelujących anteny liniowe,
- zaproponowanie zastosowania w metodzie hybrydowej numeryczno-analitycznej wybranej klasy wielomianów i funkcji pozwalających na istotne uproszczenie procesu aproksymacji/ekstrapolacji w części analitycznej.

Teza rozprawy mówi, że „**zastosowanie wielomianów wybranej klasy ma wpływ na późnoczasową stabilność numeryczną rozwiązania równania TD-EFIE modelującego anteny liniowe w dziedzinie czasu**”. Wydaje mi się, że teza w takim sformułowaniu brzmi zbyt ogólnie. Moim zdaniem, w tezie warto by było po pierwsze jakoś określić tę klasę wielomianów, a po drugie wskazać, jaki to ma być wpływ; aczkolwiek jeśli wpływ był negatywny, to całe to przedsięwzięcie byłoby zmarnowane.

### III. Struktura pracy

Układ rozdziałów jest prawidłowy i nie budzi zastrzeżeń. Praca składa się z sześciu rozdziałów oraz podsumowania. Zawiera 118 stron tekstu, 35 rysunków, 2 tabeli. Spis cytowanej literatury składa się z 104 pozycji.

**Pierwszy rozdział** ma charakter wprowadzający. Zawiera podstawowe informacje z zakresu badań obiektów pobudzanych krótkimi impulsami pola elektrycznego, omawia zastosowanie do modelowania procesów promieniowania i rozpraszania równań całkowych pola elektrycznego w dziedzinie czasu oraz wskazuje na konieczność zapewnienia stabilności późniejszych rozwiązań takich równań. **Drugi rozdział** zawiera krótką charakterystykę klasycznej teorii pola elektromagnetycznego z omówieniem warunków brzegowych na powierzchniach oddzielających ośrodki o różnych parametrach elektrycznych i magnetycznych. W rozdziale tym wyprowadzono równanie falowe Helmholtza, przeanalizowano rozpraszanie pól elektrycznych przez obiekty doskonale przewodzące oraz przedstawiono równania całkowe modelujące te zjawiska. W dalszej części, przyjmując model struktury cienkoprzewodowej, wyprowadzono fundamentalne w analizie anten liniowych równania Pocklingtona i Halléna z jądrem dokładnym i z jądrem zredukowanym. Stosując tzw. aproksymację pierwszego rzędu rozwiązano równanie Halléna w dziedzinie czasu dla przypadku jednej anteny liniowej i układ równań Halléna w dziedzinie czasu dla układu dwóch przewodów prostoliniowych położonych dowolnie względem siebie. **Rozdział trzeci** poświęcony jest metodom rozwiązywania równań całkowych pola elektrycznego w dziedzinie czasu (TD-EFIE). Omówiono w nim dyskretyzację przestrzeni i czasu w obliczeniach. Przedstawiono metody numerycznego rozwiązywania TD-EFIE: kroczenia po czasie (marching-on in time; MOT) i kroczenia po kolejnych stopniach wielomianów Laguerre'a (marching-on in order lub marching-on in degree; MOD). W **rozdziale czwartym** omówiono zagadnienia dokładności i stabilności metod rozwiązywania równań całkowych. Zaprezentowano algorytm MOT i na podstawie wyników testów numerycznych z jego wykorzystaniem oceniono stabilność rozwiązań TD-EFIE dla przypadku anteny liniowej i układu dwóch przewodów prostoliniowych (anten liniowych). **Rozdział piąty** w pierwszej części poświęcony jest teoretycznemu wstępowi do aproksymacji średniokwadratowej dyskretnej wykorzystującej metodę Gaussa-Hermite'a, wielomiany Laguerre'a i zmodyfikowane funkcje sferyczne Bessela pierwszego rodzaju. W dalszej części rozdziału pokazano wyniki zastosowania wybranych metod do zapewnienia stabilności późniejszego rozwiązania równania EFIE w dziedzinie czasu. **Rozdział szósty** jest podsumowaniem pracy.

#### **IV. Charakter rozprawy**

Rozprawa ma charakter teoretyczny i eksperymentalny. Charakter teoretyczny, gdyż rozważania są wyprowadzane od równań Maxwella i mają duży formalizm matematyczny. Eksperymentalny charakter badań widzę w tym sensie, iż dokonuje się badań symulacyjnych na zbudowanym modelu numerycznym. Jest więc to eksperyment numeryczny.

Jak już wspomniałem wcześniej, badania Autorki wpisują się w aktualne badania opisywane w literaturze. Dokumentuje to spis źródeł zamieszczony na końcu pracy. W pracy znajduje się opis najnowszych badań światowych, sama zaś praca jest ich uzupełnieniem. Wyniki tej pracy powinny zostać zgłoszone do publikacji w dobrych czasopismach.

W zakończeniu rozprawy autorka wskazuje na kierunki dalszych potencjalnych badań. Wymienia trzy zaledwie zadania, z których każde może prowadzić do wyników wartych opublikowania.

#### **V. Analiza literatury, oraz istniejącego stanu wiedzy**

Literatura światowa jest dobrana prawidłowo i dobrze odzwierciedla stan wiedzy na Świecie. Źródła zawierają publikacje z ostatnich kilkunastu lat, chociaż są też wcześniejsze, często cytowane prace o historycznym znaczeniu. Świadczy to o dużym odczytaniu, głębokiej wiedzy i kompetencjach Autorki rozprawy. Przeprowadzone szerokie studia źródeł pozwoliły na właściwą ocenę stanu badań w świecie i określenie oryginalnych zagadnień rozpatrywanych i rozwiązanych w pracy.

Wyniki badań własnych zostały przedstawione w dziesięciu opublikowanych pracach. Z tej liczby, w spisie literatury ocenianej dysertacji jest osiem prac, których doktorantka jest współautorką.

#### **VI. Rozwiązanie postawionego zagadnienia oraz oryginalność rozprawy**

Do oryginalnych pomysłów i własnych osiągnięć zgłaszanych w ramach dysertacji Autorka zalicza:

1. stworzenie nowych, zmodyfikowanych funkcji sferycznych Bessela pierwszego rodzaju,
2. wykorzystanie zmodyfikowanych funkcji sferycznych Bessela pierwszego rodzaju do analitycznego opisu dalszej części procesu w czasie późniejszym,

3. opracowanie hybrydowej numeryczno-analitycznej wersji rozwiązywania równania EFIE dla cienkich przewodów (najpierw FDTD, potem formuła analityczna),
4. stworzenie modułu wyznaczającego ekstrapolację w czasie późniejszym,
5. porównanie skuteczności stosowania różnych wielomianów do ekstrapolacji prądu w czasie późniejszym.

Doktorantka rozwiązuje problem wykorzystując do tego celu własną inwencję oraz, opartą o dotychczasowy opublikowany w literaturze światowej dorobek w rozpatrywanej dziedzinie, wiedzę z teorii pola elektromagnetycznego, teorii równań całkowych Fredholma, numerycznych metod rozwiązywania zagadnień elektromagnetyzmu, a w szczególności rozwiązywania równań całkowych w dziedzinie czasu. Użycie tych narzędzi było celowe, uzasadnione i wymagało dużej biegłości w posługiwaniu się nimi. Cele teoretyczne i aplikacyjne pracy zostały osiągnięte. Teza pracy została uzasadniona w sposób eksperymentalny.

## **VII. Przydatność rozprawy dla praktyki inżynierskiej i nauk technicznych**

Badania nad stabilnością numerycznych rozwiązań równań całkowych sformułowanych w dziedzinie czasu są w – omawianej dziedzinie – prowadzone od kilkunastu lat. Nadal nie widać satysfakcjonującego rozwiązania. Większość prac koncentruje się na procesach stacjonarnych. O stabilności rozwiązań przy pobudzeniu pojedynczym impulsem prac jest mniej i koncentrują się one głównie na początkowej części procesu, w której umieszczona jest większość energii.

Czas późniejszy jest słabiej zbadany. W czasie późniejszym mamy do czynienia z sygnałami o niewielkim poziomie w porównaniu z czasem początkowym i łatwiej o utratę stabilności.

Praca koncentruje się na czasie późniejszym. Dzięki zaproponowanemu rozwiązaniu hybrydowemu można kontynuować obliczenia bez utraty stabilności, przy jednoczesnym zachowaniu charakterystycznych cech procesu.

Wydaje się, że stworzone przez autorkę zmodyfikowane sferyczne funkcje Bessela znajdują też inne zastosowania przy modelowaniu tłumionych wykładniczo procesów oscylacyjnych.

## **VIII. Przydatność rozprawy dla gospodarki narodowej**

Wykorzystanie wyników badań nie jest w pracy szeroko omawiane. Wspomniano

o możliwości wykorzystania opracowanej metody do celów identyfikacji obiektów.

W mojej opinii przydatność opisanych w rozprawie badań może mieć zastosowanie w dwóch obszarach. Po pierwsze w obszarze obronności i bezpieczeństwa narodowego, do zdalnej identyfikacji lub klasyfikacji obiektów przy zastosowaniu metod aktywnych bądź pasywnych.

Po drugie, wszędzie tam, gdzie potrzeba bezprzewodowej identyfikacji obiektów, na przykład w handlu, w logistyce czy w służbie zdrowia. Szczególnie tam, gdzie identyfikacja ma przebiegać z wykorzystaniem sygnałów radiowych o znikomym natężeniu. Oczywiście, są to tylko przykłady. Niemniej, we wszystkich wymienionych przypadkach potrzebne są dodatkowe, ukierunkowane badania.

Niewątpliwym potwierdzeniem przydatności rozprawy dla gospodarki narodowej jest m.in. fakt, że praca powstała przy wsparciu projektu „Realizacja II etapu Regionalnego Centrum Innowacyjności” współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju regionalnego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Kujawsko-Pomorskiego na lata 2007-2013.

## **IX. Umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)**

Praca jest napisana poprawnym językiem. Zagadnienia są przedstawione jasno i zwięźle. Zastosowano właściwy formalizm matematyczny, typowy dla rozpraw naukowych z dziedziny nauk technicznych i dostosowany do charakteru rozpatrywanych zagadnień. Teoretyczna strona pracy obraca się wokół formułowanych w dziedzinie czasu równań całkowych pola elektromagnetycznego oraz numerycznych metod rozwiązywania równań całkowych. To dość skomplikowany i bardzo specjalizowany aparat matematyczny. Doktorantka radzi sobie dobrze z matematyką, praca jest od tej strony czytelna. Jednakże dodatkowe komentarze do niektórych wzorów i wyprowadzeń sprawiłyby, że praca byłaby łatwiej dostępna dla tych, którzy ze stosowanymi działami matematyki nie są dobrze obeznani.

Tekst pracy, zwłaszcza spis literatury zawiera drobne literówki oraz defekty spowodowane m.in. nie do końca skrupulatnym redagowaniem fragmentów przenoszonych z jednej wersji dokumentu do drugiej.

Mimo, że od strony poligraficznej praca została wykonana bardzo dobrze, jakość rysunków 2.4, 2.3 jest nie do końca wystarczającą.

Wymienione wyżej usterki nie obniżają merytorycznego obrazu pracy.

## X. Uwagi i pytania do pracy wymagające odpowiedzi

Podstawową słabą stroną pracy jest – moim zdaniem – nadmierna skrótowość opisu tekstowego i to począwszy od drugiego rozdziału pracy. To prawda, że wzory matematyczne mówią same za siebie. Ale szerszy komentarz po niektórych wyprowadzeniach sprawiłby, że tekst byłby czytelniejszy także dla czytelnika mniej znającego tematykę rozprawy.

Skrótowość jest widoczna zarówno przy określeniu zadania badawczego, jak i przy opisywaniu własnych osiągnięć. W szczególności, w rozprawie zabrakło wyraźnie sprecyzowanego przedmiotu oraz obiektu badania, niewypukłone też metody naukowe stosowane podczas wykonania badań. Brakuje też informacji dotyczącej aprobacji pracy (akceptacji wyników przez społeczność naukową). Brakuje także informacji o tym, czy i jakie środowisko programistyczne było zastosowane podczas wykonania eksperymentalnej części badania. Prosiłbym uwzględnić powyższe uwagi podczas przygotowania autoreferatu i uzupełnić brak informacji przy prezentacji wyników podczas obrony.

Mimo, iż na początku pracy została umieszczona strona z listą skrótów i oznaczeń, nie wszystkie używane dalej w tekście symbole zostały zdefiniowane i wytłumaczone.

Pewne negatywne wrażenie sprawiają wzory (3.16)-(3.21), w których zasady sumowania zmiennych zostały zdefiniowane w sposób nietypowy i nie do końca zrozumiały. Nie jestem przekonany, czy taki sposób przedstawienia i określenia przedziałów sumowania podobałby się ortodoksyjnym matematykom. W każdym razie wnosi on pewne zamieszanie podczas lektury rozprawy.

Wracając do wspomnianej skrótowości: w zakończeniu Autorka wspomina o bezwarunkowo stabilnych metodach rozwiązywania równań EFIE. Chciałbym usłyszeć w trakcie obrony, dlaczego te metody zostały odrzucone.

Idąc dalej, moim zdaniem, wzory (3.29) oraz (3.85) zostały błędnie zdefiniowane. We wzorze (3.29) przy  $n=1$ , indeks sumowania „ $r$ ” przyjmuje wartości od 1 do 0, co – chyba – nie powinno się zdarzyć. We wzorze (3.85) przy  $i=0$  górny przedział w pierwszej sumie trafia do obszaru wartości negatywnych, co też, chyba, nie powinno się zdarzyć. Podobne przypadłości mają też wzory (3.81), (3.82) oraz (3.112).

Równania (3,99) (3.100), wyjaśniające oraz uzupełniające wzory (3.97) i (3.98), definiują zmienne „ $g$ ”, których w jawnej formie nie ma w podstawowych wzorach. W tym przypadku tekst, a przynajmniej kolejność podania wzorów oraz objaśnienia,

należałoby sporządzić inaczej.

Symbole „0,4exp” oraz „sin” posiadają niezrozumiałe wartości wykładników, których chyba nie powinno być w ogóle.

Na stronie 74 w zdaniu „Antenę dzielimy na...” Powinno być nie „N”, a „N”.

Na stronie 99 ten sam indeks „ $n$ ” jest zdefiniowany na interwale  $n = 1, 2, 3, \dots$  (patrz wzór 5.63), za chwilę, we wzorze (5.64) on już zmienia się na interwale  $n = 2, 3, 4, \dots$ , natomiast poniżej, we wzorze definiującym tę samą wartość, co wzór (5.64), zostały podane już inne zasady zmiany „ $n$ ”, mianowicie:  $n = 0, 1, 2, \dots$ . To jakoś dziwnie wygląda. Może warto by było zastosować w tym przypadku różne indeksy?

Uważam również, że rozdział dotyczący syntezy nowych zmodyfikowanych sferycznych funkcji Bessela powinien być obszerniejszy i szerzej opisywać te funkcje.

## **XI. Podsumowanie recenzji**

W moim przekonaniu, recenzowana rozprawa doktorska jest interesującą i oryginalną pracą badawczą. W rozprawie został przebadany i rozwiązany problem naukowy, który ma istotne znaczenie poznawcze i praktyczne. Autorka wykazała się dużą erudycją i dobrą znajomością wiedzy teoretycznej i praktycznej oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Uważam, że praca doktorska mgr inż. Anny Witenberg pt. „Zastosowanie wybranej klasy wielomianów do zapewnienia stabilności późnoczasowego rozwiązania równań EFIE modelujących anteny” spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zapisane w ustawie o tytule naukowym i stopniach naukowych i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony na Radzie Wydziału Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy.

