KATEDRA SIECI ELEKTRYCZNYCH I ZABEZPIECZEŃ
POLITECHNIKA LUBELSKA
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI
20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38A
tel.(+ 48 81) 53 84 360, fax (+48 81) 538 43 19 http://weii.pollub.pl e-mail: we.kseiz@pollub.pl

Lublin, 10.06.2019 r.

dr hab. inż. Piotr Miller, Prof. PL
p.miller@pollub.pl
tel. 502 180 550

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 12 -06- 2019
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
prof. dr hab. inż. Zbigniew Nadolny

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Macieja Fajfera

„Obliczenia współbieżne w symulacji układu elektrycznego z zastosowaniem procesora sygnałowego"

Promotor pracy: dr hab. inż. Sławomir Cieślik

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej z dnia 21 maja 2019 r. oraz pismo Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej Pana Profesora Zbigniewa Nadolnego z dnia 27 maja 2019 r.

1 Wybór tematu rozprawy

Dokładne poznanie obiektu badań, jego właściwości oraz reakcji na bodźce zewnętrzne często decyduje o jakości i poprawności wniosków wynikających z analizy poprawności pracy układów elektroenergetycznych. Najbardziej wiarygodnym źródłem informacji w tym zakresie jest przeprowadzenie pomiarów na obiekcie rzeczywistym. Nie zawsze jest to jednak możliwe w praktycznej realizacji i zwykle bywa bardzo kosztowne, szczególnie w przypadku dużych obiektów elektroenergetycznych. Dlatego też w ciągu ostatnich lat wzrosła rola modelowania matematycznego i badań symulacyjnych zarówno w pracach naukowych jak również przy wykonywaniu różnego rodzaju analiz i ekspertyz.

Modele matematyczne, które wykorzystuje się przy realizacji prac badawczych, analiz lub ekspertyz mogą być typowymi modelami wykorzystywanymi do analiz w trybie off-line. Modele takie są stosunkowo proste i nie wymagają stosowania bardzo skomplikowanego aparatu matematycznego. Nie wymagają także szczególnie rozbudowanych zasobów sprzętowych. Klasyczny komputer PC może

z powodzeniem wykonywać analizy rozpływowe, zwarciowe czy też badania stabilności statycznej i dynamicznej. Dokładność uzyskiwanych wyników obliczeń będzie zależała od dokładności odwzorowania badanych obiektów i stopnia ich szczegółowości, przy czym tego typu analizy będą najczęściej wykonywane w oderwaniu od rzeczywistych procesów zachodzących aktualnie w badanym układzie. Na bazie tych modeli można jednak wykonywać także analizy w trybach on-line (przy czym nadal nie są to tryby czasu rzeczywistego). Modele matematyczne są wówczas uzupełniane rzeczywistymi sygnałami informującymi np. o stanie obiektu (włączony/wyłączony).

Kolejną grupą modeli są modele pracujące w trybach czasu rzeczywistego, które są przedmiotem zainteresowania recenzowanej pracy. Modele te znalazły swoje implementacje w komercyjnych, bardzo kosztownych symulatorach, w modelach realizowanych w oparciu o klastry obliczeniowe, w modelach wykorzystujących specjalistyczny sprzęt a także zrealizowanych w oparciu o ograniczone zasoby klasycznego komputera PC. W recenzowanej pracy zaprezentowano rozwiązanie oparte na zastosowaniu wielordzeniowego procesora sygnałowego do wykonywania współbieżnych obliczeń w badaniach symulacyjnych układów elektroenergetycznych. Zasadniczym celem tworzenia modeli jest uzyskanie modeli o akceptowalnej adekwatności przy jednoczesnej redukcji kosztów uzyskania takiego modelu. Stąd konieczność ciągłego poszukiwania kompromisowych rozwiązań w tym zakresie.

Biorąc powyższe pod uwagę uznaję tematykę rozprawy za ważną, aktualną oraz wybraną prawidłowo, zarówno pod względem naukowym jak i praktycznym.

2 Ogólna ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa zawiera 140 stron tekstu wraz z ilustracjami, wzorami oraz spisem literatury obejmującym 176 pozycji.

Część główna rozprawy podzielona została na cztery rozdziały plus rozdział podsumowujący. W rozdziale pierwszym, wprowadzającym, określono cele pracy, zakres badań oraz postawiono tezę rozprawy, która brzmi następująco: „*Istnieje taka metoda modelowania matematycznego układów elektrycznych, która zaimplementowana w postaci odpowiednich algorytmów w strukturze sprzętowej i programowej platformy cyfrowej z wielordzeniowym procesorem sygnałowym, umożliwia wykonywanie obliczeń współbieżnych w określonym czasie i o zadanej precyzji*". Sposób sformułowania tezy uważam za prawidłowy.

Przegląd literatury, obejmujący zagadnienia związane z modelowaniem systemu elektroenergetycznego i jego elementów oraz symulacyjną analizą systemu w czasie rzeczywistym został przeprowadzony rzetelnie. W wykazie literatury znalazły się także pozycje dotyczące metod numerycznych i programowania. Najstarsza pozycja w wykazie literatury datowana jest na rok 1969, najnowsza pochodzi z roku 2018. Niemal 80% publikacji cytowanych w rozprawie powstało w ostatnim

dziesięcioleciu. Dziesięć pozycji literaturowych powstało przy udziale Autora rozprawy, przy czym tylko jedna z tych publikacji jest publikacją współautorską.

W rozdziale pierwszym Autor rozprawy oprócz zaprezentowania tezy oraz celu i zakresu pracy scharakteryzował aktualny światowy stan badań nad symulatorami układów elektrycznych pracującymi w czasie rzeczywistym. Rozdział ten to typowe, rzetelnie przeprowadzone studium literaturowe, w którym Autor przywołując prezentowane w literaturze światowej rozwiązania symulatorów (także tych komercyjnych) poddaje je krytycznej ocenie. Oczywiście w rozdziale tym podano także podstawowe definicje związane z symulatorami pracującymi w czasie rzeczywistym (PwCR) oraz określono wymagania stawiane tego typu układom. Istotną częścią rozdziału pierwszego jest część poświęcona obliczeniom współbieżnym. Autor rozprawy zwrócił uwagę na olbrzymie koszty wykonywania badań symulacyjnych współczesnych, bardzo złożonych układów elektrycznych oraz elektroenergetycznych, a następnie wykazał, że jednym z możliwych sposobów redukcji tych kosztów jest zastosowanie obliczeń współbieżnych.

Rozdział drugi rozprawy to charakterystyka sprzętowa i programowa symulatora PwCR opracowanego przez Autora rozprawy. Z uwagi na fakt, że Autor zdecydował się na opracowanie symulatora PCR wykorzystującego wielordzeniowy procesor sygnałowy w rozdziale znalazła się analiza porównawcza dostępnych na rynku platform cyfrowych. Autor porównując ich cechy dokonał wyboru procesora, który spełnił jego wymagania odnośnie zapotrzebowania na moc obliczeniową, wymagania odnośnie architektury rdzenia procesora, dostępnej pamięci oraz dostępności układów peryferyjnych i interfejsów. Wybór procesora zdecydował o wyborze platformy cyfrowej i programowej symulatora. Całość została dokładnie opisana i scharakteryzowana w rozdziale. Istotną częścią rozdziału jest także opis konstrukcji bloków wyjściowych mocy w jakie został wyposażony opracowany przez Autora symulator. Bloki te, w postaci wzmacniaczy wysokonapięciowych oraz źródła prądowego skonstruowanych przez Autora, umożliwiają prowadzenie symulacji standardowych wyjść przekładników napięciowych (100 V) i prądowych (5 A). Zdaniem Autora w literaturze światowej brak jest opisów realizacji tego typu bloków dla symulatorów PwCR.

Rozdział trzeci poświęcony jest teorii modelowania matematycznego układów elektrycznych z wykorzystaniem obliczeń współbieżnych. Rozdział rozpoczyna się podaniem kilku definicji dotyczących przyjętego sposobu modelowania układów elektrycznych, czyli metody wielobiegunników elektrycznych. Następnie Autor wyprowadza podstawowe równania macierzowe dla liniowego oraz nieliniowego elementu układu elektrycznego. Równania te stanowią podstawę implementacji algorytmów symulacyjnych opisanych przez Autora w kolejnych podrozdziałach. Algorytmy zostały omówione bardzo szczegółowo, kolejno dla układu liniowego i nieliniowego. W obydwu przypadkach porównano algorytm wykorzystujący obliczenia sekwencyjne z obliczeniami częściowo

współbieżnymi. W przypadku tych drugich Autor dokładnie wskazał szczególnie wymagające uwagi kroki algorytmu, np. te dotyczące synchronizacji obliczeń pomiędzy rdzeniami procesora lub sterowania dostępem do pamięci współdzielonej. Jednym z ciekawszych rozwiązań zaproponowanych przez Autora jest wykorzystanie bufora kołowego w celu przechowywania w pamięci systemu komputerowego wartości określonych zmiennych z poprzednich chwil czasowych. Innym istotnym zagadnieniem poruszanym w rozdziale jest wykorzystanie metody gradientów sprzężonych do rozwiązywania układów równań z macierzami rzadkimi. Bardzo ważną częścią rozdziału trzeciego jest opis autorskich algorytmów optymalizacyjnych obliczeń współbieżnych dla układów nieliniowych. Optymalizacja ma na celu takie rozdzielenie zadań na poszczególne rdzenie, aby były one wykorzystane równomiernie. Zaproponowaną przez Autora rozprawy funkcją celu jest minimalizacja odchylenia standardowego czasów realizacji zadań obliczeniowych przez poszczególne rdzenie procesora. W rozdziale zaprezentowano efekt działań optymalizacyjnych dla testowego układu zawierającego zarówno elementy liniowe jak i nieliniowe.

Rozdział czwarty to prezentacja wyników badań symulacyjnych przeprowadzonych z wykorzystaniem skonstruowanego przez Autora rozprawy symulatora PwCR. W badaniach wykorzystano także rejestrator PQ-Box 100, którego jednym z zadań było generowanie raportów pozwalających ocenić stan pracy badanego układu elektrycznego. W rozprawie zaprezentowano wyniki kilku różnych symulacji, kilku różnych układów sieci niskiego napięcia. Każdy podrozdział zawiera dokładną charakterystykę badanego układu. O dokładności niech świadczy fakt, że Autor podaje numery działek, charakteryzuje ich wyposażenie a nawet w przypadku kilku stwierdza, że są jeszcze niezabudowane, więc nie wpływają na stan pracy analizowanej sieci. Następnie Autor określa cel badań, ich metodykę a następnie przechodzi do prezentacji wyników i ich interpretacji. Badania dotyczą stabilności stanów pracy układu elektrycznego w czasie rzeczywistym, możliwości testowania układów automatycznej regulacji dołączonych do symulatora PwCR jako obiekty zewnętrzne, stanowiące otoczenie symulatora. W tym wypadu Autor zaprezentował autorski algorytm regulacji napięcia w sieci niskiego napięcia. Dodatkowo Autor zaprezentował wyniki badań nieliniowego układu elektrycznego, przy czym badania sprawdzające poprawność modelowania układów nieliniowych wykonano w MatLAB'ie, bez udziału symulatora PwCR. Wykorzystanie symulatora do badań tego typu układów będzie tematyką dalszych prac badawczych Autora.

Ostatni rozdział rozprawy to podsumowanie i wnioski, w których znalazło się stwierdzenie, że w pracy osiągnięto założone cele i tym samym teza została udowodniona.

Moja ogólna ocena rozprawy, jej struktury oraz merytorycznej zawartości jest pozytywna.

3 Uwagi szczegółowe i krytyczne

Autor rozprawy nie ustrzegł się niestety błędów redakcyjnych. Typowych błędów redakcyjnych, literówek, jest stosunkowo niewiele. Poniżej kilka przykładów:

Na stronie 10, akapit 2 od góry, jest: „Niejednokrotnie informacja o wartościach chwilowych nie jest potrzebna do analizy danego **układy** elektrycznego.". Powinno być: „**układu**".

Na stronie 28, akapit 1 od góry, jest: „Na bazie procedur BLAS **powstały** pakiet LAPACK". Powinno być: „**powstał**".

Na stronie 35, akapit 1 od góry, jest: „Wykonuje on obliczenia zarówno **zmienno**, jak i **stało przecinkowe**". Wyrazy **zmiennoprzecinkowe** oraz **stałoprzecinkowe** pisze się razem.

Na stronie 63, akapit 1 od góry, jest: „Dzięki takiemu rozwiązaniu poprawiona zostaje zbieżność metody **gradientów sprzężony**.". Powinno być: „**gradientów sprzężonych**".

Na stronie 71, akapit 1 od góry, jest: „Jak już wspomniano w **podrozdziałach 0** i 3.5…". Tutaj błędne odwołanie do podrozdziału 0.

Na stronie 78, akapit 1 od góry, jest: „Poszczególne zależności wyprowadzone zostały z zastosowaniem dyskretnego **algorytmy** interpolacyjnego trapezów.". Powinno być: „**algorytmu**".

Na stronie 83, akapit 1 od dołu, jest: „Karta pomiarowa była **dołączoną** do komputera PC poprzez interfejs USB". Powinno być: „**dołączona**".

Na stronie 118, akapit pod rys.4.40, jest: „Przebieg taki stanowi zbliżenie, zawierające fragment przebiegu napięcia **między fazowego**, jaki został…". Powinno być: „**międzyfazowego**".

Na stronie 123, akapit 2 od dołu, jest: „W rozprawie **przestawiono** wyniki tylko wybranych prac badawczych …". Powinno być „**przedstawiono**".

To są przykłady „literówek", ponieważ nie ma ich dużo, nie będę ich dalej przytaczał.

Autor często pisze o „**ilości**" w stosunku do zbiorów, które są wyraźnie policzalne. Np. na stronie 8 Autor pisze: „Sieci takie są nasycone znaczną **ilością** instalacji prosumenckich", podczas gdy powinno się pisać o „znacznej liczbie instalacji prosumenckich". Na str. 23 jest: „… mocą obliczeniową i **ilością** linii wejścia/wyjścia", podczas gdy bardziej pasuje „**liczbą** linii wejścia/wyjścia". Na stronie 27 jest: „…na taki stan rzeczy ma struktura uzyskiwanej macierzy i wzrastający z **ilością** aktywnych rdzeni…", podczas gdy bardziej pasuje „**liczba** aktywnych rdzeni". W rozprawie można znaleźć jeszcze: „**ilość** niezależnych węzłów układu", „**ilość** wystąpień przerwania IPC", itd.

Największym mankamentem pracy jest interpunkcja. Czy należy stawiać przecinek przed spójnikiem „lub"? Szukając informacji na ten temat natknąłem się na stwierdzenie, że: „Przed spójnikiem *lub* prawie nigdy nie stawiamy przecinka". Autor rozprawy stosuje dokładnie odwrotną zasadę. Prawie każde wystąpienie spójnika „lub" zostało w rozprawie poprzedzone przecinkiem. Oczywiście są wyjątki od przytoczonej reguły. Należy postawić przecinek przed „lub", gdy spójnik ten rozpoczyna część zdania będącą wtrąceniem. W rozprawie można jednak wskazać takie przykłady, w których trudno dopatrzeć się wtrącenia.
Str.6, pierwszy akapit rozprawy: „Pojęcie symulacji w ujęciu encyklopedycznym rozumiane jest jako sztuczne odtwarzanie **danego procesu, lub zjawiska** z wykorzystaniem jego modelu".
Str.7, akapit 3 od góry: „Definicja systemu czasu rzeczywistego odnosi się do **aplikacji w której** system komputerowy musi odpowiedzieć na zdarzenie tak szybko, jak jest wymagane przez **użytkownika, lub sterowany proces**.".
Powyższy fragment ukazuje także drugi problem interpunkcyjny rozprawy. Niestety Autor nie stosuje się do kolejnej, wydawałoby się żelaznej zasady, czyli do obowiązkowego postawienia przecinka przed wyrazem „który" i innymi jego formami. Ten drugi problem nie występuje tak często jak ten pierwszy, tym niemniej można wskazać kolejne przykłady błędów interpunkcyjnych w rozprawie.

Pomimo powyższych uwag chcę jeszcze raz podkreślić, że błędów redakcyjnych w pracy nie ma dużo. Pomijając interpunkcję, którą należałoby poprawić, należy stwierdzić, że Autor potrafi redagować teksty techniczne i odbiór całości rozprawy jest pod względem redakcyjnym jak najbardziej pozytywny.

Poniżej kilka uwag o charakterze dyskusyjnym:

- Autor na stronie 26 (akapit 1 od góry) stwierdza: „W ogólności można stwierdzić, że koszt symulacji układu elektrycznego jest proporcjonalny do N^{α}, gdzie N stanowi stopień macierzy opisującej dany układ, zaś α zależy od współczynnika wypełnienia tej macierzy …". Dalej Autor

definiuje współczynnik wypełnienia macierzy jako: „stosunek liczby elementów niezerowych danej macierzy do całkowitej liczby elementów", pisząc dalej, że: „dla typowych układów elektrycznych α zawiera się w zakresie od 1,1 do 2,4". Nasuwa się pytanie, jaki jest wymiar współczynnika α. Biorąc pod uwagę przytoczoną definicję oraz typowe wartości wydaje się, że liczba elementów niezerowych może być nawet 2,4 razy większa od całkowitej liczby elementów co jest oczywiście niemożliwe. Zabrakło tutaj informacji, że wartość współczynnika α podawana jest w procentach. Czy zatem wartość taką wartość procentową podstawia się do wyrażenia N^{α} szacując koszt symulacji układu elektrycznego?

- Autor na stronie 38 (akapit drugi od góry) uzasadnia brak konieczności stosowania systemów operacyjnych czasu rzeczywistego (RTOS) w symulatorach czasu rzeczywistego pisząc: „Zdaniem autora niniejszej rozprawy w symulatorze pracującym w czasie rzeczywistym nie zachodzi na tyle dużo zdarzeń i zależności czasowych by stosowanie RTOS było uzasadnione". Czy nie wpływa to jednak negatywnie na elastyczności, uniwersalność takiego symulatora? System operacyjny to jednak dodatkowe, często uniwersalne narzędzia programistyczne, które mogą być wykorzystane przez konstruktorów symulatorów. W przypadku symulatorów typowo sprzętowych nawet jeżeli jakieś narzędzia istnieją, to są już to narzędzia specjalistyczne.
- Jakie jest zdanie Autora rozprawy na temat tworzenia struktur sprzętowych symulatorów PwCR, składających się z różnego typu symulatorów połączonych ze sobą elektrycznie?
- W podrozdziale 4.1.1 Autor opisuje obiekt, cel i metodykę badań stabilności symulacji. Opisując schemat analizowanej sieci Autor podaje nawet numery działek. W przypadku trzech działek Autor stwierdza, że są one jeszcze niezabudowane, więc nie będą uwzględnione w dalszej analizie. Czy zatem sieć testowa poddana badaniom była wzorowana na sieci rzeczywistej?
- Na stronie 87, rys. 4.6 prezentuje przebiegi wartości średnich (10-sekundowych) częstotliwości napięcia w całym okresie analizy. No cóż, wykres jest „nudny". Czy jest sens prezentowania wykresów, na których analizowana wartość nie zmienia się w ogóle? Myślę, że wystarczyłoby napisać, że częstotliwość nie ulegała zmianie przez cały czas prowadzenia analizy.
- W literaturze opisywane są rozwiązania symulatorów PwCR, w których dokonuje się dekompozycji modelu w celu wykonywania obliczeń z różnym krokiem całkowania. Tego typu rozwiązania stosowane są do symulacji złożonych układów elektrycznych, np. sieci elektroenergetycznych z przekształtnikami energoelektronicznymi. Pozwala to na symulację w czasie rzeczywistym, w części elektroenergetycznej z większym krokiem całkowania, natomiast w części energoelektronicznej z mniejszym. Czy przedstawiona w rozprawie doktorskiej teoria

modelowania matematycznego układów elektrycznych z obliczeniami współbieżnymi może być zastosowana do symulacji z różnymi krokami całkowania?

- Wśród układów elektrycznych jest grupa, która charakteryzuje się występowaniem sprzężenia magnetycznego (transformator, linia elektroenergetyczna, itp.). W jaki sposób konstruuje się modele matematyczne tego typu układów z zastosowaniem przedstawionej w rozprawie teorii modelowania matematycznego?

Powyższe uwagi traktuję jako dyskusyjne i pozostające bez wpływu na moją, pozytywną ocenę rozprawy.

4 Uwagi końcowe, podsumowanie, spełnienie wymogów ustawowych

Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wymaga, aby rozprawa doktorska stanowiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Opiniowana rozprawa według mnie spełnia to wymaganie. Zgodnie z wymogami Ustawy Doktorant, mgr inż. Maciej Fajfer, wykazał się wiedzą, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej oraz umiejętnością prowadzenia badań i przedstawienia ich wyników.

Lista istotnych osiągnięć rozprawy, które powinny być uznane za oryginalny dorobek Doktoranta zawiera następujące, najistotniejsze elementy:

- opracowanie spójnej teorii modelowania matematycznego układów elektrycznych z zastosowaniem obliczeń współbieżnych.
- opracowanie platformy cyfrowej, na bazie procesora sygnałowego TMS320C6678 wraz z niezbędnym otoczeniem, w którym mogą być implementowane modele matematyczne różnych układów elektrycznych, rozwiązywane z zastosowaniem obliczeń współbieżnych.
- opracowanie autorskich konstrukcji wzmacniacza wysokonapięciowego oraz sterowanego źródła prądowego, dzięki którym możliwe jest prowadzenie symulacji standardowych wyjść przekładników napięciowych (100 V) i prądowych (5 A),
- opracowanie własnego algorytmu optymalizacji obliczeń współbieżnych,
- opracowanie własnego algorytmu regulatora napięcia.

Doktorant w rozprawie zmierza konsekwentnie do realizacji jej celu i udowodnienia postawionej we wstępie tezy. Pomimo drobnych mankamentów wykład jest jasny i czytelny, zawiera także wszystkie istotne elementy: genezę, tezę, krytyczny przegląd aktualnego stanu wiedzy, sformułowanie problemu, jego rozwiązanie, prezentację wyników, podsumowanie oraz wykaz literatury.

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej ocenę stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Fajfera odpowiada wymaganiom ustawowym stawianym przed rozprawami doktorskimi (Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. – Dz. U. nr 65, poz. 595 z dnia 16 kwietnia 2003 r. z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.