

Wrocław 16 maja 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Rosołowski
Katedra Energoelektryki
Wydział Elektryczny
Politechnika Wroclawska

WPLYNEŁO

RECENZJA

dn. 2022 -05- 19

rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Krakowskiego
pt. "*Real-Time Simulator of Power System Phenomena*"

1. Dane ogólne

Recenzowana praca powstała w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Łukasza Nogała. Tekst pracy został zawarty na 132 stronach łącznie z bibliografią i wykazem literatury. Praca została wydana w zwartej formie w postaci publikacji książkowej w języku angielskim. Niniejsza recenzja pracy została sporządzona na wniosek Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej.

2. Charakterystyka tematu rozprawy

Zgodnie z tytułem rozprawy, przedstawiona praca ma charakter konstrukcyjno-projektowy i łączy się z zadaniem opracowania oprogramowania oraz doboru sprzętu komputerowego, który może służyć do symulacji zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w rzeczywistych obiektach w tempie obserwowanego procesu fizycznego. Takie urządzenia, często w polskiej literaturze nazywane symulatorami czasu rzeczywistego, znane są od wielu lat i niezależnie od toczonych dyskusji co do ich bardziej trafego nazewnictwa, spełniają bardzo ważne funkcje w zakresie testowania gotowych wyrobów oraz sprawdzania różnych koncepcji na etapie ich projektowania. W odniesieniu do urządzeń elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, takie symulatory są szczególnie ważne i przydatne, gdyż badane układy wypełniają odpowiedzialne funkcje w systemie elektroenergetycznym z wyjątkowo krótkim czasem wymaganej reakcji. Jest to podyktowane bardzo szybkimi procesami zachodzącymi w trakcie awarii w sieciach elektroenergetycznych, przy których zazwyczaj wyzwalane są bardzo duże energie. Pomysły budowy przywoływanych tu symulatorów mogły zostać zrealizowane po uzyskaniu dostępu do efektywnych szybkich układów mikroprocesorowych oraz odpowiedniego rozwoju metod numerycznych z oszczędnymi procedurami odtwarzającymi zjawiska zachodzące zarówno w obiektach sieci elektrycznych, jak i w urządzeniach automatyki elektroenergetycznej. Niestety, dostępne na rynku takie symulatory są w dalszym ciągu niezmiernie drogie i mogą sobie na nie pozwolić jedynie czołowi producenci urządzeń automatyki elektroenergetycznej działający w skali międzynarodowej.

Zespół badawczy, w którym powstała recenzowana praca, od lat zajmuje się tematyką odnoszącą się do budowy i zastosowania symulatorów czasu rzeczywistego, przeznaczonych do testowania systemów automatyki elektroenergetycznej, analizowania zjawisk zachodzących w sieciach elektrycznych podczas awarii oraz weryfikacji różnych koncepcji prowadzących do budowy

nowych urządzeń automatyki. W ten właśnie zakres badań wpisuje się recenzowana praca. Pomysł budowy takiego testera na bazie popularnego sprzętu komputerowego i stosowanego na nim oprogramowania jest zatem w pełni uzasadniony. Dodatkową przesłanką wspomagającą takie działanie jest możliwość rozbudowy odpowiedniej bazy laboratoryjnej i rozwoju badań w zakresie elektrotechniki, a także pokrewnych dyscyplin, jak automatyka, informatyka, czy technika komputerowa. Nie do pominięcia jest także towarzyszący temu zadaniu rozwój metod symulacji stanów dynamicznych w sieciach elektrycznych. Ostatnie publikacje autora recenzowanej pracy oraz innych członków zespołu badawczego wydatnie rozszerzają i upowszechniają wiedzę z tego zakresu.

Recenzowana rozprawa dotyczy zatem aktualnych problemów związanych z szerokim zakresem zagadnień dotyczących testowania nowoczesnych układów automatyki elektroenergetycznej, analizy elektromagnetycznych stanów dynamicznych, symulacji takich stanów w czasie rzeczywistym oraz budowy i eksploatacji związanych z tym systemów komputerowych. Sformułowane we wstępnej części pracy zadania o charakterze analitycznym i projektowym wymagały dogłębnego zaznajomienia się z istniejącymi rozwiązaniami, w dużej mierze narzuconymi przez obowiązujące standardy, ich krytycznej oceny oraz propozycji i weryfikacji nowych rozwiązań na bazie ogólnodostępnych układów komputerowych i ich oprogramowania, co wynika z konieczności obniżenia kosztów takiej instalacji. Podjęty temat, zarówno z użytecznego, jak i teoretycznego punktu widzenia jest więc, bez wątpienia, zagadnieniem naukowym odpowiednim na rozprawę doktorską. Teoretyczne udowodnienie postawionej w pracy tezy oraz jej praktyczna weryfikacja jest ważnym osiągnięciem w zakresie dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, a w szczególności w zakresie automatyki elektroenergetycznej.

3. Charakterystyka rozwiązania postawionego problemu i użytych metod

Recenzowana praca jest podzielona na 8 rozdziałów; zawiera ponadto wykaz bibliografii, spis najważniejszych pozycji literaturowych oraz załącznik, w którym pomieszczone są teksty oryginalnych procedur związanych z prowadzeniem symulacji. We wstępnej części sformułowane są: cel i teza pracy oraz wymienione są szczegółowe zadania, zmierzające do jej udowodnienia. Autor objaśnia także swój oryginalny udział w pracach i osiągnięciach, w których uczestniczyli także inni członkowie zespołu badawczego. Należy podkreślić, że pewne rozwinięcie sformułowanej na początku tezy zostało podane w podsumowaniu (rozd. 6), gdzie znajduje się także klarowne uporządkowanie uzyskanych w pracy rezultatów i propozycja rozwinięcia niektórych badań w prezentowanej tematyce.

Następny rozdział (rozd. 2) zawiera przegląd metod matematycznych stosowanych do modelowania stanów dynamicznych w elementach sieci elektrycznej z punktu widzenia ich zastosowania w omawianym symulatorze. W odniesieniu do rozwiązywania równań równowagi sieci, dwie podstawowe metody są stosowane: - metoda potencjałów węzłowych, znana także z zastosowania w standardowych programach symulacyjnych EMTP oraz metoda zmiennych stanu, która jest bazą dla procedur używanych w znanym programie Matlab/Simulink. Jednym z ciekawych wniosków wypływających z tego przeglądu jest wyższa ocena metody zmiennych stanu w odniesieniu do numerycznej stabilności obliczeń. W końcowej części rozdziału omówiony jest problem przekraczania czasu obliczeń wynikający z przyjętego kroku symulacji (ang. *overrun*). To ważne zagadnienie jest szczegółowo analizowane w dalszej części dysertacji.

W kolejnym rozdziale autor omawia podstawowe wymagania, jakie powinien spełniać projektowany system, nakreśla jego konfigurację z nałożonymi ograniczeniami co do rodzaju użytego sprzętu i oprogramowania oraz szczegółowo przedstawia proponowane rozwiązania zapewniające realizację poszczególnych funkcji symulatora. Rozwiązanie tych zagadnień wymagało szczegółowego rozpoznania w zakresie dostępnych elementów konfiguracji sprzętowej oraz zasad tworzenia i koordynacji współdziałania procedur programowych, z uwzględnieniem kosztów realizacji projektu. Następnie doktorant opisuje sposób programowej realizacji symulatora czasu rzeczywistego na ogólnie dostępnym sprzęcie komputerowym, a także, w końcowej części pracy przedstawia wyniki testów z wykorzystaniem rzeczywistych przekaźników zabezpieczeniowych, które są porównywane z podobnymi testami prowadzonymi na profesjonalnych urządzeniach. Do wykonania tych zadań autor wybrał przemysłową wersję standardowego komputera ogólnego zastosowania, na którym jest uruchomiony system operacyjny Linux RT z dołączoną kartą procesorową ze wsparciem programowym w postaci procedur przygotowanych z użyciem systemu Matlab/Simulink, które zapewniają elastyczne tworzenie procedur symulacji stanów dynamicznych sieci. Czytelnik, zwłaszcza jeśli jest obeznany z warunkami pracy systemów działających w czasie rzeczywistym, ma możliwość uczestniczenia w tworzeniu różnych rozwiązań, poczynając od szczegółowych procedur numerycznych związanych z rozwiązywaniem równań różniczkowych w symulatorze, a kończąc na procedurach synchronizacji czasu w poszczególnych blokach przetwarzania i transmisji sygnałów.

Realizacja tego szeroko zakrojonego zadania wymagała dokładnego poznania wielu odmiennych funkcji związanych ze sterowaniem stacją elektroenergetyczną i realizacją zadań automatyki elektroenergetycznej. Zarówno pomysł, jak i jego realizacja zostały zweryfikowane przez rezultaty testów funkcjonalnych, które zostały szczegółowo przedstawione w rozdziale piątym. Prezentowane testy obejmują sprawdzenie wykonania poszczególnych funkcji systemu testowego i symulatora stanów sieci oraz porównanie wykonania tych zadań z funkcjami dostępnymi w układzie symulatora profesjonalnego. Pozytywne rezultaty tych testów świadczą o pomyślnym zakończeniu weryfikacji postawionej tezy badawczej i potwierdzają poprawność przyjętych założeń projektowych, odnoszących się do sprzętu komputerowego oraz oprogramowania.

Tekst rozprawy pokazuje, że autor w sposób metodyczny uzasadnia postawioną tezę, dostarczając jednocześnie wskazówek dla konstruktorów i użytkowników zarówno utworzonego systemu, jak i podobnych rozwiązań układów komputerowych, służących do symulacji stanów dynamicznych sieci elektrycznej i testowania systemów automatyki elektroenergetycznej. Możliwość i kierunki dalszych badań służących rozbudowie i doskonaleniu utworzonego symulatora jest sygnalizowane w szóstym rozdziale pracy. Struktura tekstu dysertacji, prezentacja prowadzonych badań zakończonych projektem i utworzeniem omawianego symulatora, a także wykonaniem obszernych badań testowych, wskazuje na osiągnięcie przez autora wysokiego profesjonalizmu w zakresie wiedzy odnoszącej się do projektowania tego typu systemów w aspekcie sprzętowym i programowym. Zamieszczony wykaz literatury prezentuje pełny zakres wiedzy dotyczącej omawianego zagadnienia.

4. Wartość merytoryczna rozprawy

Wartość merytoryczna pracy nie budzi wątpliwości, a jej zalety polegają na oryginalnym sformułowaniu poznawczego zagadnienia związanego z utworzeniem proponowanego systemu

konstrukcyjno-programowego, przeznaczonego do symulacji zjawisk dynamicznych w sieci elektrycznej oraz testowania urządzeń automatyki elektroenergetycznej w czasie rzeczywistym, zgodnie ze współczesnymi wymaganiami w tym zakresie. Wykonane prace badawczo-projektowe doprowadziły do budowy dyskretnego symulatora czasu rzeczywistego, który umożliwia generowanie sygnałów w tempie procesu fizycznego, pochodzących z programowalnego modelu wybranego fragmentu sieci elektroenergetycznej. Uzyskano w ten sposób system testowy, który w podstawowym zakresie funkcjonalnym nie odbiega od profesjonalnych rozwiązań dostępnych na rynku, a jest dużo tańszy. W celu wykonania tego zadania autor musiał szczegółowo zapoznać się z zasadami pracy systemów komputerowych w czasie rzeczywistym, zaproponować, utworzyć i przetestować konfigurację sprzętowo-programową na bazie popularnego sprzętu komputerowego ze stosownym uzupełnieniem, co w rezultacie doprowadziło do udowodnienia postawionej w pracy tezy w zakresie badań i projektowania takich systemów.

Do głównych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- Przeprowadzenie szczegółowej analizy zakresu zadań, jakie powinien realizować komputerowy symulator czasu rzeczywistego przeznaczony do wiernego odtworzenia zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w analizowanej sieci z uwzględnieniem zależności czasowych odpowiadających realnym procesom. Zapewnia to możliwość testowania systemów automatyki elektroenergetycznej zgodnie z najnowszymi wymaganiami w tym zakresie. Wartość poznawcza tych badań polega na symulacyjnym odtworzeniu za pomocą sprzętu komputerowego wraz z utworzonym oprogramowaniem, zjawisk zachodzących w analizowanej sieci oraz w testowanych przekaźnikach zabezpieczeniowych, poznaniu zasad ich funkcjonowania wraz z odwzorowaniem występujących zależności czasowych.
- Zaproponowanie struktury systemu komputerowego czasu rzeczywistego oraz stosownej bazy programowej, która umożliwia zbudowanie symulatora umożliwiającego generację sygnałów elektrycznych w tempie zachodzącego procesu, co zapewnia odwzorowanie rzeczywistych procesów w warunkach laboratoryjnych i daje możliwość elastycznego planowania wykonywanych testów przy wielokrotnym obniżeniu kosztów takich badań.
- Przeprowadzenie szerokiej analizy warunków związanych z numeryczną realizacją algorytmów rozwiązywania równań modelu sieci i nałożonych wymagań czasowych. Niedotrzymywanie narzuconych w tym zakresie zależności czasowych w układach pracujących w trybie rzeczywistym określa się ogólnym terminem 'przekroczenia' (ang. 'overrun'). Przekroczenia są nieuchronne w tego typu instalacjach, natomiast projektanci muszą zapewnić poprawną ich pracę. Autor przeprowadził szczegółową pozytywną analizę występujących przekroczeń w zbudowanym symulatorze.
- Przeprowadzenie badań weryfikujących działanie utworzonego symulatora czasu rzeczywistego i jego zastosowanie do testowania rzeczywistych przekaźników zabezpieczeniowych. Należy podkreślić, że zbudowany system zapewnia możliwość sprawdzania funkcjonowania w badanym urządzeniu automatyki modułów, które są w odnośnych standardach określane jako krytyczne – ze względu na szybkość transmisji – a więc funkcji SV (*sampled values*) oraz GOOSE (*generic substation state events*).

5. Ogólne uwagi dyskusyjne

Praca dotyczy bardzo wyspecjalizowanego zagadnienia związanego z projektowaniem systemów przeznaczonych do symulacji zjawisk w sieci elektroenergetycznej i testowania nowoczesnych układów automatyki zabezpieczeniowej. Uznając oryginalność postawionej tezy i poprawność jej wykazania można jednak pod adresem jej autora sformułować następujące zastrzeżenia i pytania natury bardziej ogólnej.

1. W dołączonym do pracy streszczeniu można znaleźć słowa kluczowe, wśród których znajduje się znany termin: 'hardware-in-the-loop', przez co zazwyczaj rozumie się układ testowania rzeczywistego obiektu (w tym przypadku jest to przekaźnik zabezpieczeniowy) z udziałem symulatora i z wzajemnym współdziałaniem obu tych elementów. Tymczasem, w podstawowej części pracy, to zagadnienie jest mało eksponowane. Dobrze byłoby szerzej naświetlić to właśnie wzajemne oddziaływanie obiektu (badanego przekaźnika) z symulatorem sieciowym, również w odniesieniu do ewentualnych przyszłych działań w tym zakresie.
2. Testowanie zabezpieczeń odcinkowych natrafia zazwyczaj na ograniczenia wynikające z konieczności zwielokrotnienia liczby mierzonych sygnałów, co wymaga zastosowania dodatkowych wzmacniaczy sygnałów, a także odpowiedniego dostosowania struktury symulatora. Czy proponowane w pracy rozwiązanie jest w stanie zapewnić wykonanie takiego testu?
3. W przeprowadzonych testach przekaźników, w tym również przekaźników odległościowych, stosowane są modele linii reprezentowane za pomocą czwórników π . W przypadku linii długich (badane linie mają długość nawet 200 km) może to ograniczać poprawną reprezentację zjawisk zachodzących w rzeczywistych obiektach. Dlaczego wobec tego nie stosowano modeli linii o parametrach rozłożonych. Czy to znacznie komplikuje numeryczny algorytm symulatora?

6. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

Praca jest starannie zredagowana, ma poprawny układ i zawiera wiele ilustracji prezentujących zależności pomiędzy analizowanymi parametrami i przebiegami. Wykaz literatury obejmuje całość tematyki, której dotyczy praca. Nieliczne nieścisłości lub drobne błędy są nieuchronne w tego typu pracach i w tym przypadku nie wpływają na jej pozytywną ocenę.

7. Wnioski końcowe

Po zapoznaniu się z recenzowaną pracą, z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że spełnia ona z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz.U. z dnia 21.06.2016r., poz. 882) w odniesieniu do dyscypliny *elektrotechnika* i wypełnia odnośne wymagania zawarte w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w odniesieniu do dyscypliny *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*. (Dz. U. z dnia 30.01.2018 r., poz. 261), które obowiązują obecnie w odniesieniu do nowej nazwy dyscypliny: *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*. Wnioskuje zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.



