



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚĆ

WPŁYNEŁO

2022 -05- 24

dn.....

dr hab. inż. Jacek Klucznik, prof. uczelni
Katedra Elektroenergetyki

18.05.2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Krakowskiego
pt.: „ Real-time simulator of power system phenomena”**

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Łukasz Rajmund Nogał, prof. uczelni

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Krakowskiego zatytułowanej „Real-time simulator of power system phenomena”, została opracowana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, prof. dr. hab. inż. Tomasza Stareckiego z dnia 23 marca 2023 r. (sygn. RPW/12195/2023), zgodnie z Uchwałą Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej z dnia 21 marca 2021 roku.

I Ocena ogólna pracy

1. Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy i czy został on trafnie i jasno sformułowany?

W ogólnym ujęciu, recenzowana praca dotyczy trzech zagadnień elektrotechniki, którymi są:
- modelowanie i symulacja funkcjonowania elementów systemu elektroenergetycznego,
- testowanie układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej,
- projektowanie i wykorzystanie systemów hardware-in-the-loop (HIL).

Wykorzystanie metody połączenia środowiska symulacyjnego z fizycznym urządzeniem lub urządzeniami daje unikalną możliwość zweryfikowania interakcji jakich można się spodziewać w rzeczywistych sytuacjach, jednak bez konieczności wykonywania prób/testów/eksperymentów wprost na obiekcie rzeczywistym. Zagadnienie to jest istotne między innymi w przypadku gdy obiektem rzeczywistym ma być fragment systemu elektroenergetycznego, którego nie można odseparować od reszty urządzeń aby wykonywać na nim badania. Z drugiej strony współczesne układy elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, których sposoby testowania są w recenzowanej pracy szeroko dyskutowane, są coraz bardziej złożonymi urządzeniami. Weryfikacja poprawności działania tych układów nie zawsze może być zrealizowana metodami tradycyjnymi gdzie wartości napięć czy prądów są zmieniane liniowo czy skokowo. Układy takie często reagują na dynamikę zmian sygnałów wejściowych (np. układy blokad przy kotłowaniu mocy, wykrywanie pracy asynchronicznej generatora itp.). Fakt powszechnego stosowania układów komunikacyjnych w zabezpieczeniach takich jak np. układy wiążące zabezpieczenia odległościowe zainstalowane na dwóch końcach linii, czy przesyłanie sygnałów logicznych między zabezpieczeniami w obrębie stacji elektroenergetycznej rozdzielni drogą analogową lub z wykorzystaniem protokołów komunikacyjnych powoduje, że procedury testowania takich układów

są złożona i trudne w realizacji, ponieważ wymagane jest odwzorowanie wzajemnych interakcji pomiędzy różnymi urządzeniami. Symulatory czasu rzeczywistego i metoda HIL testowania urządzeń pozwalają na uzyskanie miarodajnych rezultatów.

Podjęta w recenzowanej pracy idea jest zatem właściwa, aktualna, ale nie nowa. Od lat 90-tych XX wieku symulatory czasu rzeczywistego są dostępne komercyjnie. To na co zwraca uwagę Doktorant to wysoki koszt zakupu takich urządzeń, powodujący ograniczony dostęp do tej technologii dla szerszej grupy odbiorców, w tym placówek naukowo-dydaktycznych. Wysoki koszt wynika w mojej opinii z faktu, że są to rozwiązania małoseryjne, a oparte o zaawansowane, dedykowane (pod względem sprzętowym i programowym) układy obliczeniowe.

Doktorant stawia tezę, że mówiąc, że jest możliwe zaprojektowanie i zbudowanie symulatora czasu rzeczywistego zdolnego do testowania układów automatyki zabezpieczeniowej wykorzystując do tego ogólnie dostępne i względnie tanie komponenty. Ponieważ praca została napisana w języku angielskim poniżej jest prezentowana teza w oryginalnym brzmieniu:

„... it is possible to propose and implement real-time simulator architecture that is sufficient for accurate power system protection testing utilizing highly available and relatively cheap components. With such solution it becomes realistic that most of the engineers could have an access to the real-time simulations wherever it is needed”.

Prace prowadzone w Politechnice Warszawskiej do wielu lat skupiały się na testowaniu układów zabezpieczeń i już wcześniej zajmowano się tematyką symulatorów czasu rzeczywistego. Można zatem stwierdzić, że teza w takiej ogólnej postaci jest „bezpieczna” bo prace wykonywane przez zespół badawczy z Zakładu Aparatów i Automatyki Elektroenergetycznej owocowały publikacjami ukazującymi możliwości współpracy komputerów klasy PC z analogowymi kartami wejść/wyjść i ich wykorzystaniem do badania układów automatyki zabezpieczeniowej. Dlatego uważam, że można było postawić tezę bardziej wyraźną, odnosząc się do przedstawianej w pracy metody implementacji symulatora w środowisku GNU/Linux, która różni się od wcześniejszych prac wykonywanych w Instytucie Elektroenergetyki PW.

Mimo powyższej uwagi stwierdzam, że sformułowany przez Doktoranta problem naukowy został trafnie i jasno zaprezentowany i uznaję tematykę rozprawy za ważną, aktualną oraz wybraną prawidłowo, zarówno pod względem naukowym jak i praktycznym.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle.

Analiza obecnego stanu wiedzy w zakresie symulatorów czasu rzeczywistego został przeprowadzono dwutorowo. Z jednej strony w pracy zestawiono dostępne rozwiązania komercyjnie, podając orientacyjne ceny urządzeń, a także podając skrótowe informacje o stosowanej architekturze układów. Ta część przeglądu literatury jest zrobiona rzetelnie i dokładnie. Z drugiej strony w pracy zawarto też bardzo lakoniczne odwołania do części pozycji wymienionych w spisie literatury. Na stronie 9 pracy mamy odwołania do 53 pozycji z literatury! Uważam, że część teoretyczna pracy dotycząca przeglądu wiedzy i podejścia do problemu symulacji czasu rzeczywistego na świecie powinna być bardziej obszerna. Doktorat przygotowano w postaci książki, Doktorant nie musiał się zatem zmieścić w określonym limicie stron. Zatem, o ile uznaję, że literatura zawarta w spisie (123 pozycje) jest aktualna i dobrze dobrana do podjętego tematu, to zbyt mało informacji z literatury zostało przeniesione do właściwej treści pracy.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione.

Autor osiągnął postawiony cel pracy. System czasu rzeczywistego umożliwiający testowanie układów automatyki zabezpieczeniowej został w pełni zrealizowany i przetestowany. Układ umożliwia działanie w dwóch trybach pracy. Pierwszy tryb pracy polega na generacji analogowych sygnałów wyjściowych, które następnie są przetwarzane przez wzmacniacz CMS156 i służą do zasilania wejść prądowych i/lub napięciowych badanego układu zabezpieczeniowego. Drugi tryb w jakim może pracować symulator to generacja sygnału cyfrowego w standardzie IEC61850, gdzie połączenie symulatora i badanego zabezpieczenia następuje z wykorzystaniem sieci Ethernet.

Praca zawiera wyniki testów zabezpieczeń nadprądowych, ziemnozwarciowych i impedancyjnych. W każdym analizowanym przypadku uzyskano oczekiwaną reakcję zabezpieczeń, co pozwala twierdzić o prawidłowości działania zrealizowanego układu.

Doktorant poświęcił dużo czasu zjawisku dopasowania szybkości obliczeń do szybkości próbkowania przebiegów wyjściowych, aby uniknąć sytuacji gdzie w określonym czasie komputer nie będzie w stanie zakończyć obliczeń danego kroku symulacji. Doktorant przedstawia w pracy bardzo praktyczne wskazówki jak skonfigurować system, aby uniknąć zniekształceń przebiegu wyjściowego spowodowanego opóźnieniami symulacji.

Uważam, że zastosowane w pracy metody badawcze, metody testowania są właściwe do rozwiązywanego problemu.

Dodatkowe uwagi związane ze sposobem prowadzenia analiz zawarto w rozdziale recenzji II Szczegółowa ocena pracy.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową.

Doktorant wymienia w podsumowaniu pracy swoje najważniejsze osiągnięcia. Są to:

1. Krytyczna analiza literatury związanej z symulacją w czasie rzeczywistym;
2. Przegląd istniejących rozwiązań symulatorów czasu rzeczywistego;
3. Opracowanie nowej architektury symulatora czasu rzeczywistego zbudowanego na bazie tanich łatwo dostępnych komponentów wraz ze szczegółowymi instrukcjami implementacji;
4. Opracowanie metodologii oceny wydajności symulatora czasu rzeczywistego w zależności od różnych ustawień systemu operacyjnego i ocena stosowalności Linux RT-Preempt;
5. Analiza zjawiska przekroczenia czasu symulacji (zjawisko overrun) w systemie opartym na Linux RT-Preempt;
6. Rozszerzenie proponowanej architektury o komponenty oparte na standardzie IEC 61850 i porównanie obu wariantów symulatora pod względem wydajności w czasie rzeczywistym (we współpracy z Karolem Kurkiem i w oparciu jego pracę doktorską);
7. Zaproponowanie automatyzacji symulatora czasu rzeczywistego w celu przeprowadzania testów na dużą skalę z automatyczną prezentacją wyników.

Komentując wskazane przez Doktoranta osiągnięcia można zauważyć, że faktycznie w bibliografii zestawiono dużą liczbę publikacji związanych z symulacjami w czasie rzeczywistym, ale analiza treści tych publikacji w samej pracy jest dość skromna, na co zwrócono uwagę uprzednio. Dobrze wykonano natomiast przegląd istniejących rozwiązań symulatorów czasu rzeczywistego. Architektura symulatora w sensie sprzętowym w moim odczuciu nie jest oryginalna. Przecież

wykorzystanie w strukturze symulatora czasu rzeczywistego komputera PC z kartą PCI-1720, wzmacniacza CMS156 i środowiska Simulink było już realizowane wcześniej (prace dra Adama Smolarczyka). Rzeczą nową jest tu wykorzystanie system operacyjnego Linux i osobnego komputera do prowadzenia właściwej symulacji oraz osobnego komputera z systemem Windows do przygotowania i uruchomienia modelu symulacyjnego w środowisku Matlab/Simulink. Kolejne punkty 4, 5 i 6 uważam za faktyczne osiągnięcia Doktoranta, za szczególnie interesujące uznając analizy dotyczące przekroczeń czasu symulacji i „dostrojenia” systemu operacyjnego do uniknięcia zniekształceń przebiegów wyjściowych. Ostanie z opisanych osiągnięć ma w moim odczuciu formę częściowo oryginalną, bo rozbudowane testy zabezpieczeń (ISA, Omicron) posiadają w swoim oprogramowaniu możliwości automatyzowania testów zabezpieczeń. Nie mniej jednak Doktorant zaimplementował do komputera sterującego obliczeniami na własny sposób możliwość automatyzacji, co następnie wykorzystywał w testach układu.

Recenzowana praca nie odbiega od standardów w literaturze światowej pod względem stosowanych metod i technik obliczeniowych.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników(zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna)?

Praca napisana jest na niezłym poziomie językowym. Zachowane są zasady ortografii, gramatyki i interpunkcji. W pracy zdarzają się co prawda zdania, lub sformułowania, które można by skonstruować inaczej, aby polepszyć jakość przekazu, ale nie utrudniają one istotnie odbioru pracy. Doktorant sprawnie uniknął przeładowania pracy tabelami i rysunkami zawierającymi wyniki symulacji, prezentując jedynie najistotniejsze wielkości. Odwołania do rysunków i tabel w tekście pracy zrobione są prawidłowo. Również odwołania do literatury i jej spis zrobione są właściwie.

Dwie główne uwagi do części edycyjnej pracy to chwilami zbyt skąpe opisy problemu, a także posługiwanie się dużą liczbą specjalistycznych skrótów i zwrotów z dziedziny informatyki, które nie są wyjaśniane. Na początku pracy zabrakło wykazu stosowanych w rozprawie skrótów. Poprawiłoby to znacznie odbiór części pracy zwłaszcza dla osób nie będących specjalistami w dziedzinie informatyki.

Zauważone, najistotniejsze uchybienia w zakresie języka i strony edycyjnej pracy zawarto w rozdziale II recenzji.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych

Zaproponowany przez Doktoranta sposób realizacji symulatora czasu rzeczywistego jest bardzo interesujący. Bez wątpienia upowszechnienie wiedzy jak taki symulator zbudować i przygotować do pracy jest bardzo wartościowe. Uważam, że pracą mogą być zainteresowane jednostki dydaktyczne i ośrodki badawczo-rozwojowe w kraju i za granicą, które nie mogą pozwolić sobie na zakup komercyjnego symulatora czasu rzeczywistego.

II Szczegółowa ocena pracy

1. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

1.1. Na str. 43 Doktorant opisuje sposoby zwiększenia wydajności obliczeń w czasie rzeczywistym, wskazując, że jedna z nich prowadzi od „dramatycznego wzrostu pobieranej mocy”. Jak ma się ten stan do pozostałych analizowanych przypadków? Jak bardzo wzrasta pobierana moc? Jeżeli jest to cena za wzrost wydajności, to czy Doktorant uważa, że układ może w takim stanie pracować czy też należy unikać takiej sytuacji?

1.2 Doktorant policzył koszt komponentów symulatora na około 2800 Euro (tab. 3.6) Tabela nie uwzględnia kosztów wzmacniacza prądowo-napięciowego, stojaka i okablowania. Jednak przede wszystkim nie policzone zostały godziny pracy jakie Doktorant spędził na przygotowaniu koncepcji, budowie układu, wykonywaniu testów. Zakładając 2 lata pracy nad układem dodatkowy koszt wyniesie jakies 48000 Euro więcej cena symulatora stanie się porównywalna z częścią symulatorów dostępnych na rynku.

1.3 Założenia dla modelu sieci wydają się mało realistyczne: obciążenie mocą 5 MW linii 15 kV o długości 30 km, przy dość dużej rezystancji jednostkowej, będzie powodowało spadek napięcia ponad 2 kV. W rozdziale 4.2 wspomniano o cewce Petersena uziemiającej punkt neutralny sieci, komentując, że nie wpływa ona na prąd zwarcia trójfazowego. Z kolei modelując zwarcie doziemnie w sieci (5.4) cewkę się pomija przyjmując, że sieć pracuje z nieuziemiającym punktem neutralnym. Widzę tu jakąś niejasną dla mnie niekonsekwencję.

1.4 Czy testy jakie były wykonywane w rozdziale 5.5 powtarzano aby wyeliminować błędy losowe? Jeden z uzyskanych wyników czasu wyłączenia istotnie się różni od pozostałych. Czy próbowano wyjaśnić opóźnione działanie zabezpieczenia powtarzając testy, czy też wykryto inny powód opóźnionego działania zabezpieczenia?

1.5 Jak sam Doktorant zauważa, pewnym mankamentem powstałego układu jest na stosunkowo wąski zakres zastosowania symulatora ukierunkowany wyłącznie na zabezpieczenia systemu elektroenergetycznego. Jednak w tezie ograniczono zastosowanie do tego właśnie obszaru. Czy jednak symulator pozwala na analizę bardziej złożonych układów sieci, zawierających kilka generatorów wraz z układami regulacji tak aby możliwe było analizowanie zabezpieczeń od poślizgu biegunów, utraty wzbudzenia, pracy wyspowej czy blokad kołysaniowych w zabezpieczeniach impedancyjnych? Czy złożoność takiego modelu nie będzie zbyt duża, aby czas trwania jednego kroku symulacji był odpowiednio krótki?

2. Uwagi o charakterze redakcyjnym

- 2.1. Rys. 3.4 niewiele wnosi do pracy, mógłby zostać pominięty.
- 2.2. Dlaczego na rys. 3.5 przy opisywaniu problemu występującego przy inicjalizacji karty jest prąd podawany w kA jeżeli karta PCI 1720 ma wyjścia napięciowe?
- 2.3. Czy określenie/wielkość „priority” (strona 52) ma wartość ujemną, czy jest to niewłaściwe zastosowanie myślnika?
- 2.4. Określenie (strona 55) „the most optimal” podobnie jak polska wersja „najbardziej optymalny” nie powinno być stosowane.
- 2.5. Czy rysunku 5.4 powinny być oznaczenia I0, U0 czy też 3I0, 3U0?
- 2.6. Co doktorant rozumie przez prąd pojemnościowy kabla (zwrot cable feeder with capacitive current) czy jest to prąd ładowania linii (w stanie normalnej pracy) czy też udział w prądzie zwarciovym w przypadku zwarcia jednofazowego – nie są to te same wielkości.
- 2.7. Czy wartością oczekiwaną (str.74) było 12A jak wynika z danych sieci?
- 1.4 Rysunek 5.9 nie zawiera opisu sygnałów i trzeba się domyślać co Autor prezentuje,
- 2.8. W tabeli 5.8 brakuje kolumny „cases” do których dalej w tekście odnosi się Doktorant.
- 2.9. Dla osób nie znających modelu PI-section z biblioteki Simulink będzie niezrozumiałe stosowanie dodatkowej rezystancji w celu modelowania upływności linii, ponieważ typowy (książkowy) model linii typu PI zawiera konduktancję reprezentującą upływność. Należało to wyjaśnić w tekście.

III Podsumowanie i wniosek końcowy

Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

- a) nie spełniająca wymagań; b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania;
- c) zadowalająco spełniająca wymagania; d) wyraźnie wykraczająca poza poziom przeciętny (spełniająca wymagania z nadmiarem; e) wybitna?

Recenzent zalicza niniejszą Rozprawę do zadowalająco spełniającej wymagania.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marcina Krakowskiego podejmuje ważny i aktualny temat badawczy. Ponadto, oceniam ją jako spełniającą w zadowalającym stopniu wymagania, wynikające z Ustawy 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 późniejszymi zmianami) dotyczące rozpraw doktorskich i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania.



