

Wrocław 10 lipca 2021 r.

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

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Karola Filipa Kurka

pt. *"Tester czasu rzeczywistego wykorzystujący platformę Matlab/Simulink jako środek umożliwiający sprawdzenie urządzeń i układów automatyki zgodnych z IEC 61850"*

1. Dane ogólne

Recenzowana praca powstała w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dr hab. inż. Łukasza Nogala. Promotorem pomocniczym był dr hab. inż. Ryszard Kowalik. Tekst pracy został zawarty na 189 stronach łącznie z bibliografią i wykazem literatury. Praca została wydana w zwartej formie w postaci publikacji książkowej. Niniejsza recenzja pracy została sporządzona na wniosek Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.

2. Charakterystyka tematu rozprawy

Zgodnie z tytułem rozprawy, przedstawiona praca ma charakter konstrukcyjno-projektowy i łączy się z pomysłem budowy urządzenia służącego do testowania nowoczesnych urządzeń zabezpieczeń i sterowania, stosowanych w sieciach elektroenergetycznych. Dodatkowym rezultatem prowadzonych prac badawczych jest symulator stanów dynamicznych w sieciach elektroenergetycznych działający w czasie rzeczywistym. Oba te główne wyniki badań i prac konstrukcyjno-projektowych są ulokowane w zakresie zastosowań związanych ze standardem IEC 61850, który w dużej mierze reguluje sposób przesyłania informacji i budowy urządzeń sterujących w tzw. cyfrowej stacji elektroenergetycznej. Od chwili pojawienia się tego standardu przed 16-ma laty, producenci aparatury związanej z automatyką elektroenergetyczną są zobligowani do wytwarzania swoich wyrobów zgodnie z ujętymi tam zaleceniami, co umożliwi współdziałanie układów produkowanych przez różnych wytwórców, a także rozwój stosownych rozwiązań technicznych, a tym samym, prowadzenia nowatorskich prac badawczych. Jedną z ważnych konsekwencji wprowadzenia tego

standardu jest konieczność dostosowania do jego wymagań odpowiednich procedur i urządzeń stosowanych do testowania jakości zadań wypełnianych przez wspomniane układy automatyki elektroenergetycznej. Ze względu na wagę zadań wypełnianych przez te układy, do problemu ich testowania przykładają się bardzo dużą uwagę, zarówno na różnych etapach powstawania koncepcji i budowy układów automatyki, jak również w trakcie eksploatacji tych urządzeń w stacji elektroenergetycznej. Warunki prowadzenia takich testów wymagają stosowania unikalnej aparatury, która musi zapewnić możliwość sprawdzenia różnych zadań związanych z wypełnieniem podstawowych funkcji badanych urządzeń w zakresie ich dynamiki, komunikacji wewnętrznej i zewnętrznej, synchronizacji czasowej i innych, w warunkach zbliżonych do naturalnych stanów pracy. Ten ostatni aspekt prowadzenia takich testów z pewnością skłonił Autora do rozszerzenia zakresu pracy o symulator fragmentu rozważanego systemu elektroenergetycznego, działającego w czasie rzeczywistym.

Na rynku dostępne są profesjonalne urządzenia do testowania rozważanych układów, jednak są to bardzo drogie wyroby, dostępne jedynie dla czołowych światowych producentów automatyki elektroenergetycznej. Pomysł budowy takiego testera na bazie popularnego sprzętu komputerowego i stosowanego na nim oprogramowania jest zatem w pełni uzasadniony. Dodatkową przesłanką wspomagającą takie działania jest możliwość rozbudowy odpowiedniej bazy laboratoryjnej i rozwoju badań w zakresie elektrotechniki, a także pokrewnych dyscyplin, jak informatyka, czy technika komputerowa. Nie do pominięcia jest także towarzyszący temu zadaniu rozwój metod symulacji stanów dynamicznych w sieciach elektrycznych. Zespół, w którym powstała recenzowana praca, znany jest w kraju z tych badań. Ostatnie publikacje rozszerzają także tę wiedzę na obszar międzynarodowy.

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 standard IEC 61850, ich krytycznej oceny oraz propozycji i weryfikacji nowych rozwiązań na bazie ogólnodostępnych układów komputerowych i ich oprogramowania. Podjęty temat, zarówno z utylitarnego, jak i teoretycznego punktu widzenia jest więc, bez wątpienia, zagadnieniem naukowym odpowiednim na rozprawę doktorską. Teoretyczne udowodnienie postawionych w pracy tez oraz ich

praktyczna weryfikacja jest ważnym osiągnięciem w zakresie dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika, a w szczególności w zakresie automatyki elektroenergetycznej.

3. Charakterystyka rozwiązania postawionego problemu i użytych metod

Recenzowana praca jest podzielona na 7 rozdziałów; zawiera ponadto wykaz bibliografii i spis najważniejszych pozycji literaturowych. We wstępnej części sformułowane są: cel i teza pracy oraz wymienione są szczegółowe zadania, zmierzające do jej udowodnienia.

W kolejnych rozdziałach Autor omawia podstawowe wymagania, jakie powinien spełnić projektowany system, nakreśla jego konfigurację z nałożonymi ograniczeniami co do rodzaju użytego sprzętu i oprogramowania i szczegółowo przedstawia proponowane rozwiązania zapewniające realizację poszczególnych funkcji testera, zgodnych z wymaganiami standardu IEC 61850. 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 przekładników zabezpieczeniowych, które są porównywane z podobnymi testami prowadzonymi na profesjonalnych urządzeniach.

W pierwszych trzech rozdziałach pracy przedstawiona jest historia rozwoju koncepcji sterowania i nadzoru stacją elektroenergetyczną od momentu pojawienia się rozwiązań bazujących na urządzeniach i sieciach komputerowych. Działania te doprowadziły do sformułowania pierwszego standardu IEC 61850 na początku bieżącego stulecia. Autor szczegółowo opisuje problemy związane ze współpracą w stacji elektroenergetycznej urządzeń oferowanych przez różnych producentów. Ten opis, moim zdaniem niepotrzebnie szczegółowy i długi, pokazuje w dużej mierze wyzwania przed jakimi stoi cała dziedzina związana z automatyką elektroenergetyczną i nieudolne próby jej uporządkowania. Stan ten porządkuje wprowadzony standard, który jednak w początkowym okresie nie do końca jest rozumiany przez różnych udziałowców, którzy spotykają się w stacji elektroenergetycznej, a więc: producenci aparatury, spółki elektroenergetyczne oraz użytkownicy tych urządzeń.

W kolejnych rozdziałach, po zaprezentowaniu tezy pracy, Autor szczegółowo przedstawia koncepcję tworzenia konfiguracji proponowanego testera i wspomagającego go symulatora sieciowego, który powinien wypełniać zadania zgodnie z potrzebami określonymi przez standard IEC 61850. Ta część pracy jest niezmiernie ciekawa, gdyż czytelnik ma możliwość z jednej strony poznania zawłości związanych z zadaniami, jakie musi wykonać hierarchiczny system sterowania stacją – gdzie ważne są priorytety wykonywania różnych zadań, a tym samym szybkość ich realizacji i przesyłania towarzyszących im sygnałów, a z drugiej strony, propozycje ich wypełnienia w systemie komputerowym, ograniczonym środkami finansowymi i programowymi. Do realizacji tych zadań

Autor wybrał przemysłową wersję standardowego komputera ogólnego zastosowania, na którym jest uruchomiony system operacyjny Linux RT ze wsparciem programowym w postaci procedur przygotowanych z użyciem systemu Matlab/Simulink, który 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 związanych z rozwiązywaniem równań różniczkowych w symulatorze, a kończąc na procedurach synchronizacji czasu w poszczególnych blokach 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. Przedstawione testy obejmują sprawdzenie wykonania poszczególnych funkcji systemu testowego i symulatora stanów sieci, porównanie wykonania tych zadań z funkcjami dostępnymi w układzie testera profesjonalnego oraz sprawdzenie współpracy z fizycznym urządzeniem zabezpieczającym, pracującym w pętli zamkniętej, obejmującej tester, symulator czasu rzeczywistego oraz urządzenie zabezpieczające. 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, służących do testowania systemów automatyki elektroenergetycznej. Możliwość i kierunki dalszych badań służących rozbudowie i doskonaleniu utworzonego testera jest sygnalizowane w szóstym rozdziale pracy.

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 testowania urządzeń automatyki elektroenergetycznej w czasie rzeczywistym, zgodnych ze standardem IEC 61850. Wykonane prace badawczo-projektowe doprowadziły także do budowy dyskretnego symulatora czasu rzeczywistego, który umożliwia dostarczanie do testera sygnałów pochodzących z programowalnego modelu wybranego fragmentu sieci elektroenergetycznej. System ten pozwala na wykonywanie testów w pętli zamkniętej obejmującej model sieci oraz badany przekaźnik zabezpieczeniowy. Uzyskano w ten

sposób system testowy, który w podstawowym zakresie funkcjonalnym nie odbiega od profesjonalnych rozwiązań dostępnych na rynku. 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, co w rezultacie doprowadziło do udowodnienia postawionej w pracy tezy w zakresie badań i projektowania takich systemów.

Do głównych osiągnięć Autora należy zaliczyć:

- Przeprowadzenie szczegółowej analizy zakresu zadań, jakie powinien realizować komputerowy system czasu rzeczywistego przeznaczony do testowania systemu nadzoru i kontroli stacji cyfrowej, zbudowanej zgodnie z wymaganiami standardu IEC 61850. Wartość poznawcza tych badań polega na określeniu funkcji realizowanych w stacji cyfrowej, poznaniu ich struktury hierarchicznej i koordynacji czasowej.
- Zaproponowanie struktury systemu komputerowego czasu rzeczywistego oraz stosownej bazy programowej, która umożliwi zbudowanie testera systemu komunikacji w stacji elektroenergetycznej wraz z układami automatyki zabezpieczeniowej, przy założonych ograniczeniach budżetowych.
- Zbudowanie komputerowego testera czasu rzeczywistego przeznaczonego do sprawdzania charakterystyk funkcjonalnych i dynamicznych systemów kierowania i nadzoru cyfrowej stacji elektroenergetycznej wraz z układami automatyki elektroenergetycznej.
- Opracowanie zasad organizacji i programowa realizacji symulatora czasu rzeczywistego, przeznaczonego do generowania naturalnych przebiegów prądu i napięcia w modelu sieci elektroenergetycznej. Symulator ten jest źródłem sygnałów testujących do sprawdzania charakterystyk funkcjonalnych i dynamicznych testowanych układów stacji.
- Przeprowadzenie badań weryfikujących działanie utworzonego testera czasu rzeczywistego i symulatora sieci elektrycznej. Należy tu wymienić podstawowe funkcje utworzonego systemu: - prowadzenie testów statycznych na bazie generowanych ustalonych przebiegów prądu i napięcia; - badanie dynamicznych funkcjonalnych charakterystyk testowanego systemu, również w zamkniętej pętli symulacji; - sprawdzanie zależności czasowych narzuconych przez standard IEC 61850. Należy podkreślić, że zbudowany system zapewnia możliwość sprawdzania funkcjonowania w badanym urządzeniu automatyki modułów, które są w standardzie określone 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 testowania nowoczesnych układów automatyki elektroenergetycznej oraz symulacji w czasie rzeczywistym fragmentu systemu elektroenergetycznego, który jest źródłem sygnałów testujących. Uznając oryginalność postawionej tezy i poprawność jej wykazania można jednak pod adresem jej Autora sformułować następujące zastrzeżenia i pytania natury bardziej ogólnej.

1. Do udowodnienia postawionej tezy Autor musiał dogłębnie zaznajomić się z zasadami funkcjonowania systemów kierowania i nadzoru stacją elektroenergetyczną, które są zdefiniowane przez zalecenia standardu IEC 61850. Ustalenia zawarte w tym standardzie są ogólnie znane i dostępne dla specjalistów zajmujących się zarówno projektowaniem, jak i eksploatacją takich systemów. Tymczasem Autor przeznaczył na opis tych zagadnień niemal połowę objętości pracy. Spowodowało to, że teza pracy jest sformułowana dopiero na 107 stronie jej tekstu. To długie wprowadzenie jest ciekawe i wartościowe, natomiast nie wpływa na udowodnienie postawionej tezy pracy i niepotrzebnie zwiększa jej objętość.
2. W opisie projektu stacji Autor w odniesieniu do protokołów transmisji danych używa określenia: - 'zagubione pakiety' lub 'powolna wymiana danych' bez dalszych wyjaśnień. W jakich okolicznościach mogą pojawić się tego typu 'zguby'?
3. Znany problem, jaki towarzyszy rozwojowi systemów komputerowych w elektroenergetyce jest zagadnienie cyberbezpieczeństwa. Stacje cyfrowe są przede wszystkim budowane z myślą o zastosowaniu w ważnych węzłach elektroenergetycznych. Jak ten problem wygląda w kontekście testowania urządzeń w uruchomionej już stacji, gdy dołączany tester może być źródłem niebezpiecznych, zamierzonych lub przypadkowych, infekcji wirusowych?
4. Testowanie zabezpieczeń odcinkowych natrafia zazwyczaj na ograniczenia wynikające z konieczności zwielokrotnienia mierzonych sygnałów, co wymaga zastosowania odpowiednich wzmacniaczy, a także odpowiedniego dostosowania symulatora. Czy proponowane w pracy rozwiązanie jest w stanie zapewnić wykonanie takiego testu?

6. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

Praca jest starannie zredagowana, zawiera wiele ilustracji prezentujących zależności pomiędzy analizowanymi parametrami. Nieliczne nieścisłości lub błędy są nieuchronne w tego typu pracach i w tym przypadku nie wpływają na jej pozytywną ocenę. Warto jednak zwrócić uwagę na notoryczne w pracy błędne rozróżnienie pomiędzy policzalnymi i niepoliczalnymi rzeczownikami, np.: 'ilość

przewodów' zamiast: 'liczba przewodów', czy 'ilość urządzeń' w miejsce: 'liczba urządzeń' i tak dalej.

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). Wnioskuje zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'P. M.' or similar, written in a cursive style.