

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Jolanty Sadury
***Kompatybilność elektromagnetyczna aparatury sterującej badaniami
w środowisku laboratoriów wielkoprądowych***

przygotowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny *Automatyka,
Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne* Politechniki Warszawskiej
nr 809/II/2024 z dnia 17.09.2024 r.

1. Problematyka pracy

Rozprawa doktorska dotyczy problematyki kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) aparatury kontrolno-sterującej pracującej w środowisku laboratoriów wielkoprądowych i wysokich napięć. Zaburzenia elektromagnetyczne występujące w tego typu jednostkach często są przyczyną wadliwej pracy układów probierczych powodując w skrajnych przypadkach ich samoczynne i niekontrolowane załączanie stwarzając tym samym zagrożenie dla testowanych urządzeń, jak również wszystkich osób biorących udział w badaniach. Istnieje zatem potrzeba dokładnej identyfikacji zagrożeń związanych z impulsowymi polami elektromagnetycznymi występującymi w trakcie wykonywania prób zwarciovych i wysokonapięciowych oraz określenia wymagań w stosunku do pracującej w tych warunkach wrażliwej aparatury elektronicznej.

W recenzowanej rozprawie dokonano wnikliwej analizy środowiska elektromagnetycznego w Laboratorium Wielkoprądowym Instytutu Energetyki Państwowego Instytutu Badawczego (IEN-PIB) w Warszawie. Przeprowadzono identyfikację źródeł zaburzeń elektromagnetycznych wraz z przyczynami ich powstawania. W rezultacie zaprojektowano i zbudowano nowy nastawnik czasowo-fazowy odporny na zaburzenia elektromagnetyczne, wykonano testy funkcjonalne oraz poddano go badaniom EMC. Ponadto sformułowano zalecenia odnośnie projektowania, budowy i montażu wrażliwej aparatury elektronicznej, dedykowanej do pracy w środowisku laboratoryjnym, w którym wykonywane są próby zwarciove i wysokonapięciowe.

Postawiony w pracy główny problem naukowy ma zatem charakter projektowo-konstrukcyjny i w takim aspekcie należy rozpatrywać oryginalność zaproponowanego rozwiązania. Należy podkreślić, iż przedsięwzięte przez Doktorantkę badania są ważne z punktu widzenia prawidłowego funkcjonowania laboratoriów wysokonapięciowych i wpisują się w tematykę prac badawczych realizowanych w obszarze elektrotechniki. Dlatego też kwalifikują się one jako przedmiot rozprawy doktorskiej w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*.

2. Ocena układu i zawartości pracy

Rozprawa liczy 113 stron i składa się ze strony tytułowej, streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu treści, spisu skrótów i oznaczeń, dziesięciu rozdziałów oraz wykazu bibliografii obejmującej 77 pozycji, w tym 5 pozycji z udziałem Doktorantki.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do pracy, w którym zwrócono uwagę na najważniejszą motywację do przeprowadzenia badań związanych z zapewnieniem kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń pracujących w laboratorium wielkoprądowym. Sformułowano także tezę pracy, zgodnie z którą środowisko elektromagnetyczne laboratorium wielkoprądowego różni się od opisanych w istniejących standardach i należy w każdym konkretnym przypadku zidentyfikować istniejące zaburzenia, a następnie właściwie rozplanować pomieszczenia oraz dobrać osprzęt i aparaturę kontrolno-sterującą zgodnie z zasadami kompatybilności elektromagnetycznej. Głównym celem pracy było natomiast zaprojektowanie, zbudowanie i walidacja kompatybilnego elektromagnetycznie nastawnika czasowo-fazowego, przeznaczonego do sterowania testami zwarciovymi. Na końcu wprowadzenia wymienione zostały również osiągnięcia wynikające z przeprowadzonych badań, które w syntetyczny sposób podane zostały w ośmiu punktach wraz z najważniejszymi czterema publikacjami z udziałem Doktorantki jako głównym współautorem.

W drugim rozdziale opisano układ probierczy wykorzystywany w IEN-PIB do testów zwarciovych, w którym najważniejszymi elementami są: odłącznik i wyłącznik próżniowy SN, uziemniki, załączniki zwarciove nN, dławiki regulacyjne, transformatory grzejno-zwarciove oraz nastawnik czasowo-fazowy pełniący funkcję urządzenia sterującego. Przedstawiono także procedurę próby zwarciovej obejmującą między innymi podanie na pierwotną stronę transformatorów probierczych napięcia 15 kV poprzez dławiki ograniczające prąd. Zwrócono uwagę, że właśnie w tej części procedury generowane są zaburzenia elektromagnetyczne mogące w sposób samoczynny i niekontrolowany uruchamiać załącznik zwarcia bez udziału operatora. W ostatnim podrozdziale opisano natomiast plan usytuowania pomieszczeń i ułożenia tras przewodów w laboratorium wielkoprądowym IEN-PIB. Dla porównania przedstawiono także strefy narażania zdefiniowane w normach dla elektrowni i stacji elektroenergetycznej w izolacji powietrznej i gazowej.

W kolejnym rozdziale trzecim przedstawiono wyniki pomiarów pola elektrycznego i magnetycznego w laboratorium skupiając się na fazie początkowej testu związanej z podawaniem na stronę pierwotną transformatora napięcia średniego 15 kV wymagającym załączenia odłącznika i wyłącznika próżniowego. Równolegle obserwowano także sygnały napięciowe po stronie wtórnej transformatora oraz w układzie sterującym.

Problem wpływu niejednoczesności załączania styków wyłącznika próżniowego SN na generowane zaburzenia elektromagnetyczne został przeanalizowany w rozdziale czwartym. Pomiar różnic czasowych występujących przy załączaniu styków dokonano w

układzie niskonapięciowym i z wykorzystaniem transformatora TP60, co pozwoliło na odseparowanie wyłącznika próżniowego od stacji SN. Sygnałem odniesienia był sygnał sterujący zamknięciem styków wyłącznika. Zmierzone opóźnienia czasowe były na poziomie 100 μ s i wpływały one na przedłużanie się stanów nieustalonych w rozpatrywanym układzie.

Kolejny rozdział piąty poświęcony jest symulacjom komputerowym, które miały wykazać, iż źródłem przebiegów przejściowych w układzie probierczym jest proces zamykania się wyłącznika próżniowego spotęgowany nierównoczesnością załączania jego styków w poszczególnych fazach, jak również zjawisko rozchodzenia się i odbicia fal wędrownych w układzie pomiędzy wyłącznikiem i transformatorem. Zaproponowane modele układu z zaimplementowaną linią długą pozwoliły na symulacje komputerowe napięć przejściowych w uzwojeniach transformatora przy założeniu określonych opóźnień czasowych zamykania się styków. Uzyskane przebiegi miały postać tłumionych oscylacji.

W dwóch następnych rozdziałach rozpatrywane były zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej aparatury kontrolno-pomiarowej pracującej w laboratorium wielkoprądowym IEN-PIB. W rozdziale szóstym przedstawiono wyniki z przeprowadzonych testów wykorzystujących impulsy typu BURST reprezentujących zidentyfikowane wcześniej w układzie probierczym zaburzenia. Poddany testom nastawnik czasowo-fazowy nieprawidłowo działał już dla napięć 1,5 kV, co potwierdziło wcześniejsze obserwacje wykonane w czasie prób zwarciovych i konieczność zaprojektowania i zbudowania nowego urządzenia sterującego. Z kolei w rozdziale siódmym sformułowano w tabelach wytyczne do badań EMC aparatury kontrolno-sterującej. Przyjęto trzy podstawowe kryteria oceny jakości funkcjonowania nastawnika, które przewidywały odpowiednio: brak pogorszenia jakości funkcjonowania nastawnika bez możliwości samoczynnego przełączenia ze stanu gotowości w tryb rozpoczęcia badania (kryterium A), pogorszenie jakości działania nastawnika w czasie trwania testów odpornościowych nie wymagające ingerencji operatora i bez możliwości samoczynnego przełączenia ze stanu gotowości w tryb rozpoczęcia badania (kryterium B) oraz pogorszenie jakości działania nastawnika w czasie trwania testów odpornościowych wymagające ingerencji operatora po zakończeniu testów i bez możliwości samoczynnego przełączenia ze stanu gotowości w tryb rozpoczęcia badania (kryterium C).

W rozdziałach ósmym i dziewiątym przedstawiono nowy nastawnik czasowo-fazowy i jego testy kompatybilności elektromagnetycznej. Określono wymagania dla nowej konstrukcji, która powinna być odporna na istniejące w laboratorium wielkoprądowym zidentyfikowane zaburzenia elektromagnetyczne. Ponadto uwzględniono między innymi właściwe ułożenie przewodów elektrycznych, ekranowanie przewodów sygnałowych oraz zainstalowanie ograniczników przepięć.

Opracowano także algorytm działania nastawnika czasowo-fazowego. Zbudowany prototyp poddany został testom EMC, zarówno w zakresie emisji zaburzeń elektromagnetycznych jak również odnośnie jego odporności, w tym na oddziaływanie oscylacji tłumionych, impulsów typu BURST i oddziaływanie elektryczności statycznej ESD. Przeprowadzone badania EMC wymusiły dalsze udoskonalenie zbudowanego prototypu nastawnika.

Ostatni rozdział rozprawy zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników. Znajduje się w nim również stwierdzenie, iż osiągnięty został główny cel pracy, a teza sformułowana w pierwszym rozdziale została udowodniona. Dodatkowo w rozdziale tym przedstawiono ponownie w sposób syntetyczny wytyczne odnośnie budowy wrażliwej na zaburzenia elektromagnetyczne aparatury kontrolno-sterującej przeznaczonej do pracy w laboratoriach wielkoprądowych oraz rozkładu pomieszczeń w tego typu laboratoriach. Krótko określono również potencjalne dalsze kierunki badań w tematyce prezentowanej w rozprawie.

Po sformułowanych wnioskach zamieszczono spis pozycji literaturowych, do których Doktorantka odnosiła się w rozprawie.

3. Ocena pracy

Tematyka rozprawy jest aktualna z uwagi na coraz większy udział aparatury kontrolno-sterującej i innych wrażliwych urządzeń elektronicznych w pracy współczesnych laboratoriów wielkoprądowych i wysokonapięciowych. Generowany w takich jednostkach badawczych wysoki poziom zaburzeń elektromagnetycznych stanowi poważne zagrożenie mogące być przyczyną wadliwej pracy układów probierczych powodując ich samoczynne i niekontrolowane załączanie stwarzając tym samym duże zagrożenie dla testowanych urządzeń jak również obsługi biorącej udział w badaniach.

W rozdziale pierwszym stwierdzono, że głównym celem pracy jest zaprojektowanie, budowa i walidacja kompatybilnego elektromagnetycznie nastawnika czasowo-fazowego, przeznaczonego do sterowania badaniami w laboratorium wielkoprądowym. Nastawnik taki został faktycznie skonstruowany i kompleksowo przebadany pod kątem emisyjności i odporności na zaburzenia elektromagnetyczne. Aby rozwiązać postawiony problem o charakterze projektowo-konstrukcyjnym wykonano w laboratorium IEN-PIB badania środowiska elektromagnetycznego polegające na pomiarach i analizie pola elektrycznego i magnetycznego generowanego w trakcie prób oraz przebiegów przepięciowych występujących w różnych obwodach układu probierczego i aparatury kontrolno-sterującej. Ważnym etapem tych badań było zwrócenie uwagi na wpływ zjawiska nierównoczesności zamykania się styków wyłącznika próżniowego SN na charakter generowanych zaburzeń elektromagnetycznych. Efekt ten został zbadany zarówno eksperymentalnie jak i z wykorzystaniem symulacji komputerowych przeprowadzonych w oparciu o odpowiednio zamodelowany układ probierczy wraz z instalacjami. Należy podkreślić, iż

proces modelowania wymagał od Doktorantki wykazania się umiejętnością przyjmowania odpowiednich założeń upraszczających z uwagi na dużą złożoność rzeczywistego obiektu.

W szczególności do najważniejszych osiągnięć Doktorantki należy zaliczyć:

- przegląd literaturowy odnoszący się do aktualnego stanu wiedzy na temat wymagań stawianych różnym obiektom, w których występują wysokie poziomy zaburzeń elektromagnetycznych;
- identyfikacja głównych źródeł zaburzeń elektromagnetycznych i wykonanie pomiarów pola elektrycznego i magnetycznego w laboratorium wielkoprądowym;
- zbadanie wpływu zamykania styków wyłącznika próżniowego SN na charakter i poziom generowanych zaburzeń elektromagnetycznych oraz przepięć;
- zaprojektowanie i budowa nowego nastawnika czasowo-fazowego oraz przebadanie go pod kątem kompatybilności elektromagnetycznej;
- określenie wymagań odnośnie projektowania i budowy aparatury elektronicznej, przeznaczonej do pracy w środowisku laboratorium wielkoprądowego;
- określenie zaleceń odnośnie wydzielania odpowiednich stref w pomieszczeniach laboratorium wielkoprądowego, ekranowania kabli oraz pomieszczeń z aparaturą elektroniczną;
- wyciągnięcie wniosków z przeprowadzonych badań i prac projektowo-konstrukcyjnych sfinalizowanych zbudowaniem nowego nastawnika czasowo-fazowego przeznaczonego do sterowania działaniem układu probierczego.

Na podstawie wymienionych wyżej oryginalnych osiągnięć należy stwierdzić, że Pani mgr inż. Jolanta Sadura udowodniła postawioną w rozprawie główną tezę i tezę pomocniczą, **wykazując się wymaganą ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, jak również zdolnościami do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, w szczególności badań eksperymentalnych.** Można również ocenić, że rozprawa jako całość stanowi oryginalne rozwiązanie problemu projektowo-konstrukcyjnego, które wymagało przeprowadzenia kompleksowych badań środowiska elektromagnetycznego laboratorium wielkoprądowego oraz opracowania szeregu testów EMC, którym poddany został skonstruowany nastawnik. Dodatkowo wykonane zostały symulacje komputerowe w oparciu o samodzielnie opracowany model całego układu probierczego wraz z instalacjami. Dlatego też przedstawione w pracy wyniki mają wartości poznawcze, stwarzając jednocześnie podstawę do ich wykorzystania w praktyce w funkcjonujących laboratoriach. Wykorzystane odnośniki literaturowe wskazują na niezbędną orientację w bibliografii obejmującej podejmowane zagadnienia. Jeśli chodzi o warsztat pisania rozpraw naukowych to Doktorantka opanowała go w stopniu zadawalającym. W pracy występują niedociągnięcia w postaci nieprecyzyjnych sformułowań, braku odnośników

do tabel i błędów stylistycznych utrudniających fragmentami czytanie rozprawy. **Jednakże biorąc pod uwagę wszystkie powyższe stwierdzenia należy w rezultacie ocenić, że recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim.**

4. Uwagi

Biorąc pod uwagę ogólne zasady pisania rozpraw doktorskich oraz poruszane przez Doktorantkę zagadnienia merytoryczne, można sformułować uwagi oraz problemy, które mogą być przedmiotem dyskusji stwarzając pole między innymi do dalszych badań, **lecz nie podważają one jednak zasadniczych wartości recenzowanej rozprawy doktorskiej, która ma wystarczająco bogatą treść merytoryczną.**

1. Teza główna rozprawy wydaje się trochę rozmyta przez wprowadzenie rozbudowanej tezy pomocniczej, która faktycznie opisuje wnioski z badań. Dodatkowo dochodzi jeszcze cel główny wraz z celami pobocznymi rozprawy i w zasadzie wymienionych jest wiele problemów i zadań przez co najważniejsza kwestia jest niejednoznaczna.
2. Wydaje się jednak, że najważniejszą kwestią było zbudowanie nowego nastawnika, które wymagało przeprowadzenia badań i udowodnienia tezy, jak również sformułowania zaleceń odnośnie aparatury kontrolno-sterującej narażonej na intensywne zaburzenia elektromagnetyczne występujące w laboratoriach wieloprądowych. Brakuje jednak informacji w rozprawie jaki był udział Doktorantki w budowie tego nastawnika. Czy był to projekt samodzielny czy zespołowy, a jeśli zespołowy to za jakie zadania była Doktorantka odpowiedzialna.
3. Kluczowym problemem do rozwiązania w trakcie badań była eliminacja niekontrolowanego uruchamiania się z nastawnika testu zwarcowego w pierwszej fazie próby, gdy podawane było napięcie 15 kV po stronie pierwotnej transformatora. W trakcie tej operacji dochodziło do zamykania się styków wyłącznika próżniowego SN i samoczynnego uruchamiania badań. W rozprawie podkreślono, że przyczyną takiej sytuacji było zjawisko niejednoczesnego zamykania się styków wyłącznika SN, generujące zaburzenia o charakterze oscylacji tłumionych. Dużo miejsca poświęcono w pracy temu problemowi zarówno w trakcie badań eksperymentalnych jak i symulacyjnych. Czy można zatem przyjąć teoretycznie, że problem zostałby rozwiązany jeśli udałooby się wyeliminować wszystkie występujące opóźnienia czasowe? A czy badano zaburzenia wysokoczęstotliwościowe powstające w wyłączniku próżniowym w trakcie samego procesu łączeniowego?

4. Zjawisko niejednoczesności zamykania się styków generowało oscylacje tłumione o częstotliwości rzędu megaherców, czyli długości fali rzędu 100 m. Brak istotnych różnic w otrzymanych symulacjach komputerowych dla różnych modeli układu nie oznacza jednak, że modelowany tor zasilający nie jest linią długą (stwierdzenie na str. 56), tylko że z uwagi na częstotliwości odpowiadające rozpatrywanym oscylacjom nie ujawniły się wyraźnie efekty falowe. Czy zatem można odrzucić hipotezę postawioną na początku rozdziału 5 (str. 45), że na kształt zaburzeń może mieć wpływ nie tylko niejednoczesność zamykania się styków wyłącznika SN, ale również efekty związane z falami wędrującymi w układzie?
5. Pracujący dotychczas nastawnik czasowo-fazowy był starej generacji i nie spełniał norm EMC, co zostało wykazane w trakcie przeprowadzonych testów. Czy zatem nie wystarczyłoby zastosować tylko nowego nastawnika spełniającego normy EMC emisyjności i odporności? Dlaczego konieczne były dodatkowe środki ochrony (ekranowanie, ochrona przepięciowa) i zalecenia odnośnie stref i ułożenia przewodów w laboratorium wielkoprądowym?
6. Struktura treści pracy jest w zasadzie poprawna, chociaż można mieć wątpliwości czy zastosowana w rozprawie stosunkowo duża liczba rozdziałów jest uzasadniona. Niektóre z nich są bardzo krótkie i opisują podobną problematykę, więc logiczna byłaby ich konsolidacja. Generalnie praca została zredagowana starannie, chociaż występują w niej nieprecyzyjne sformułowania, błędy stylistyczne, edycyjne oraz literówki. Przykładowo na str. 21 podana na rysunku 3.2 skala czasu w sekundach jest błędna, a na kolejnym rysunku 3.3 brak jest jednostki na osi poziomej. Opis tabel w publikacjach naukowych zamieszcza się generalnie nad nimi, a nie jak na str. 37 pod tabelami 3.1 i 3.2. Ponadto w drugiej kolumnie tabeli 3.2 sformułowanie „opóźnienie włączenia względem przez 0” jest niezrozumiałe, a w tej samej tabeli opis zamieszczony w ostatniej kolumnie „czas od rozpoczęcia testu do” jest niekompletny. Na rys. 5.2 (str. 46) określone są pojemności C_{11} , C_{22} i C_{33} , które nie występują w równaniu macierzowym 5.1. W tym samym równaniu pojawia także błędnie oznaczona energia W_{123} . W rozdziale siódmym tabele 7.1, 7.2 i 7.3 nie są przywołane w głównym tekście i nie są wystarczająco szczegółowo omówione. Wymienione wyżej przykładowe błędy i nieścisłości nie wpływają jednak w zasadniczy sposób na ogólną ocenę rozprawy.

5. Podsumowanie

Uwzględniając odnotowane oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze Doktorantki w dyscyplinie *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*, jak również poznawcze i uytylitarne walory rozprawy, a także to, że przedstawione uwagi o charakterze dyskusyjnym nie podważają jej zasadniczych wartości stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Jolanty Sadury spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

