

Dr hab. inż. Paweł Bienkowski, prof. uczelni  
Wydział Informatyki i Telekomunikacji  
Politechnika Wrocławska  
Wybrzeże Wyspiańskiego 27  
50-370 Wrocław

Wrocław, 15.11.2024 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej sporządzona dla  
Rady Dyscypliny Naukowej  
„Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne”  
Politechniki Warszawskiej**

**Tytuł rozprawy:** Kompatybilność elektromagnetyczna aparatury sterującej badaniami w środowisku laboratoriów wielkopiędowych

**Autorka rozprawy:** mgr inż. Jolanta Sadura

Recenzja została przygotowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny „Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Politechniki Warszawskiej, z dnia 17 09 2024 r. nr 809/II/2024 w sprawie wyznaczenia recenzentów rozprawy doktorskiej w postępowaniu nadania stopnia doktora Pani mgr inż. Jolancie Sadurze.

Recenzję przygotowano na podstawie Pisma Pana Profesora Tomasza Stareckiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne” Politechniki Warszawskiej pismo z dnia 21.10.2024 r.).

Recenzję wykonano w oparciu o dostarczoną dokumentację, zawierającą egzemplarz rozprawy doktorskiej pt. **Kompatybilność elektromagnetyczna aparatury sterującej badaniami w środowisku laboratoriów wielkopiędowych.**

**1. Teza rozprawy i cel badań**

Teza recenzowanej rozprawy doktorskiej brzmi następująco:

*„Środowisko elektromagnetyczne wielkopiędowego laboratorium zwarciowego ma specyfikę odbiegającą od środowisk zdefiniowanych w normach, w tym w szczególności od środowiska:*

- *elektrowni i podstacji, zdefiniowanych w normie “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-5: Generic standards - Immunity for equipment used in power station and substation environment. Norma Europejska IEC 61000-6-5:2016-01. Wer. 2016-01. PKN”,*
- *opisanego w normie „Wyposażenie elektryczne do pomiarów, sterowania i użytku w laboratoriach – Wymagania dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej (EMC) – Część 1: Wymagania ogólne - Norma Europejska EN 61326-1. Wer. 2020. PKN” dla laboratoriów, w których wykorzystywana jest aparatura pomiarowa i sterująca.”.*

Rozwinięciem tezy głównej są tezy pomocnicze, które określają zakres pracy Doktorantki: *Kompatybilność elektromagnetyczną aparatury sterującej badaniami w laboratorium wielkopiędowym mozna osiągnąć po rygorystycznym spełnieniu następujących warunków:*

- *Laboratorium wielkopiędowe trzeba potraktować jako instalację stacjonarną, rozumianą jak podano w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/30/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do kompatybilności elektromagnetycznej . Określić występujące w niej zaburzenia, znaleźć przyczynę ich powstawania i zdefiniować indywidualny program badań kompatybilności. Inaczej mówiąc, trzeba zidentyfikować środowisko elektromagnetyczne laboratorium wielkopiędowego.*

- *Aparatura sterująca musi być zbudowana z restrykcyjnym zachowaniem wszelkich zasad dotyczących kompatybilności.*

- *Pomieszczenia laboratorium oraz osprzęt w nim używany (wyłącznik, kanały kablowe, ekranowanie kabli) muszą być rozplanowane i zbudowane zgodnie z wszelkimi wymaganiami kompatybilności.*

Kierując się treścią postawionej tezy Doktorantka przeprowadziła analizę wybranych zagadnień badawczych skupiających się wokół problematyki:

- a. Środowisko pomiarowe w laboratorium wielkopiędowym (LWP) i ryzyka związane z niezachowaniem kompatybilności elektromagnetycznej( Rozdział 2).
- b. Analiza pola elektromagnetycznego (PEM) i przebiegów napięciowych generowanych w czasie prób zwarciovych w trakcie (Rozdział 3 i 4).
- c. Próba wyjaśnienia zidentyfikowanych przebiegów napięcia i PEM metodami numerycznymi (Rozdział 5).
- d. Badania EMC aparatury kontrolno-pomiarowej w LWP (Rozdział 6) i opracowane na ich podstawie wytyczne dla takiej aparatury (Rozdział 7).
- e. Opracowanie, uruchomienie i badania własnego rozwiązania nastawnika czasowo-fazowego (Rozdział 8) oraz jego badania EMC (Rozdział 9).
- f. Zebranie wytycznych dla zasad projektowania urządzeń przewidzianych do pracy w warunkach LWP oraz zakresu badań EMC dla takich urządzeń i zalecenia dla topografii LWP minimalizującej prawdopodobieństwo wystąpienia PEM mogących być źródłem zakłóceń dla aparatury kontrolno-pomiarowej.

W ramach teyże problematyki Doktorantka przeanalizowała i opracowała materiał w zakresie głównego celu pracy jakim jest „zaprojektowanie, budowa i walidacja kompatybilnego elektromagnetycznie nastawnika czasowo-fazowego, przeznaczonego do sterowania badaniami w laboratorium wielkopiędowym” Oprócz tego Doktorantka zaplanowała opracowanie zbioru zaleceń dotyczących: projektowania, budowy i montażu aparatury elektronicznej, przeznaczonej do pracy w środowisku laboratorium wielkopiędowego (LWP) oraz tworzenia w LWP stref, rozmieszczania w nich aparatury i wytyczania tras ułożenia przewodów wewnątrz stref i między strefami.

Postawiony cel pracy wydaje się jasny, a zaproponowany zakres badań można uznać za prawidłowy do osiągnięcia celu.

## **2. Charakter, organizacja i redakcja rozprawy oraz**

Rozprawa ma charakter eksperymentalno-analityczny. Dotyczy specyficznego środowiska jakim są laboratoria wielkopiędowe i związane z tym ryzyka wystąpienia zaburzeń w trakcie realizacji rutynowych badań realizowanych w tych laboratoriach, a mogących wpływać na zakłócenia pracy aparatury kontrolno-pomiarowej – co miało miejsce w laboratorium będącym przedmiotem niniejszej rozprawy. Dla eliminacji takich sytuacji niezbędna jest

analiza środowiska elektromagnetycznego, określenie charakteru potencjalnych zaburzeń, analizy odporności aparatury kontrolno-pomiarowej oraz opracowanie metod poprawy tej odporności. Doktorantka zidentyfikowała problemy, przeprowadziła odpowiednie pomiary i analizy numeryczne oraz opracowała i zoptymalizowała pod kątem odporności na zidentyfikowane zaburzenia własną wersję sterownika czasowo-fazowego.

Rozprawa obejmuje 106 stron, 77 pozycji literatury, z których 21 to normy i akty prawne, a w 5 Doktorantka jest współautorką. Dobór literatury jest w większości przypadków właściwy i adekwatny do tematyki pracy, zawiera pozycje z literatury krajowej i zagranicznej.

Sama praca jest zredagowana poprawnie, napisana w sposób zrozumiały, chociaż czasami ze zbyt dużymi wtrąceniami z języka potocznego. Rysunki i wykresy, których w pracy jest stosunkowo dużo, są w większości przypadków właściwe i czytelne, ale zdarzają się zbyt małe opisy. Praca zawiera spis skrótów i oznaczeń.

### **3. Analiza i rozwiązanie przedstawionego zadania, poprawność przyjętych założeń i metod – oryginalność, mocne i słabe strony rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa zawiera 10 rozdziałów, przy czym główna treść merytoryczna to rozdziały 2-10. W rozdziale 2 Doktorantka analizuje podstawy problemu naukowego swojej pracy – środowisko elektromagnetyczne laboratorium wielkopądowego. Zwróciła uwagę na specyfikę prac realizowanych w takim laboratorium i związane z tym zaburzenia elektromagnetyczne. Swoje tezy podparła odniesieniami do literatury. Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej aktów normatywnych i sytuacji LWP uznała, że warunki LWP nie odpowiadają żadnemu z rodzajów obiektów opisywanych w normach EMC – a tym samym postawiony przez problem badawczy jest zasadny. *Pewną niejednoznaczność budzą rysunki 2.9-2.11 – można przypuszczać, na podstawie treści pracy, że są to kopie fragmentów normy – ale nie ma to tej normy odniesienia w podpisie rysunków.* Odniesienie do tej części pracy znajdujemy w rozdziale 10.1, gdzie Doktorantka przedstawia propozycje poprawy warunków EMC w LWP jako realizację jednego z celów swojej pracy.

Rozdział 3 to pomiary i analiza pola elektromagnetycznego w LWP w różnych warunkach pracy – trybach prowadzonych w laboratorium badań głównie pod kątem oszacowania narażeń elektromagnetycznych aparatury kontrolno-pomiarowej. Pomiary zrealizowano izotropowym miernikiem pola E i H z rejestracją wyników w czasie. *Rysunki 3.2 i 3.3 są trudne do interpretacji ze względu na opis osi poziomych – w rys. 3.2 opisano TIME [s] z dopiskiem  $\times 10^6$  – a zakres skali jest od 3,92 do 4,1 – i według tego np. skok natężenia pola do 8kV/m powinien trwać  $0,01s \times 10^6$  co daje 10 000s co odpowiada ok. 167 minutom – jak wierzyć opisowi na stronie 22 – chyba chodzi o 1,5 minuty. Na rys. 3.3 można się tylko domyślać że pomiary wykonano w godzinach 9.30-10.00. Dostyc niefortunne jest sformułowanie Doktorantki dotyczące zmian natężenia pola – „schodki”: Uzyskane w wyniku schodki związane są z zamknięciem łączników. Pierwszy i drugi schodek to reakcja pola E”. Na tejże samej stronie 22 pracy Doktorantka błędnie odniosła się do dopuszczalnych poziomów pola elektromagnetycznego – przywołała Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 17 grudnia 2019 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów pól elektromagnetycznych w środowisku, które to rozporządzenie dotyczy miejsc dostępnych dla ludności czyli tzw. „środowiska ogólnego”, a zdecydowanie właściwym byłoby odniesienie do środowiska pracy – czyli Rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. 2018 r. poz. 1286 z późn. zmianami) i odniesienie się do wynikających z niego wartości IPN dla pola elektrycznego i magnetycznego. Powyższy błąd pojawia się jeszcze co najmniej raz – na stronie 37 – gdzie wprost Doktorantka pisze: „dla których poziomy pól elektrycznego i magnetycznego nie przekraczały wartości dopuszczalnej w środowisku pracy określonej w obowiązującym rozporządzeniu **ministra zdrowia**”. Niedopatrzenie to nie ma bezpośredniego wpływu na*

wartość merytoryczną pracy, ponieważ praca nie odnosi się do narażenia ludzi na pole-EM, ale może wprowadzić w błąd czytelnika. Poza pomiarami pola w stanach ustalonych Doktorantka próbowała zmierzyć pole w stanach nieustalonych – jak się można domyślać – wykorzystując wyjście oscyloskopowe miernika ESM-100. *Nie jest dla mnie jasne jak należy interpretować oscylogramy 3.6-3.10. W opisie Doktorantka skaluje wykresy na natężeniu pola – jednocześnie na wykresach mamy wartości bipolarne – dodatnie i ujemne – czy natężenie pola jest ujemne? Należy też zastanowić się nad przebiegami – jeżeli miernik ESM-100 ma pasmo pracy do 400kHz to jak interpretować przebiegi wyjściowe o zmienności na poziomie 10ns – jak słusznie zauważa Doktorantka – co wskazuje na pasmo rzędu GHz na nie kHz?. Rozdział 3.1.2 to pomiary pola szerokopasmowymi sondami D-dot i B-dot. Tu również wyjaśnienia wymaga sposób interpretacji wyników na wykresach 3.12 i 3.13. Czy to są oscylogramy bezpośrednio z wyjścia sondy? Czy wyniki natężenia pola po przeprowadzeniu całkowania przebiegu wyjściowego sondy z uwzględnieniem charakterystyki częstotliwościowej sond? Pomiary napięć nie budzą zastrzeżeń, ale podsumowując rozdział pomiarowy, wydaje się że bardzo brakuje jakiegokolwiek odniesienia do niepewności prowadzonych pomiarów i tym samym szerszej analizy ich miarodajności. Faktem jest, że pomiary te pełnią rolę pomocniczą w realizacji pracy – ale jednak miały wpływ na dalsze działania Doktorantki.*

Rozdział 4 i 5 to próba pomiarowej i analitycznej odpowiedzi na źródła zaburzeń impulsowych zidentyfikowanych w rozdziale 3.

Rozdział 6 to program badań EMC i ich wyniki używanej w LWP aparatury kontrolnej. W ramach realizacji tych badań wykazano brak odporności na najistotniejsze w tym urządzeniu zaburzenie impulsowe już przy poziomie 1,5kV – czyli jak pisze Doktorantka - poniżej progu wymaganego normami dla tego typu aparatury. Brak odporności badanego nastawnika był przyczynkiem do realizacji całej pracy doktorskiej, w tym propozycji autorskiego programu badań EMC dla urządzeń wykorzystywanych w LWP. Program taki zawarto w rozdziale 7 jako istotny wkład Doktorantki do dyscypliny. *Rodzi się pytanie, na jakiej podstawie Doktorantka przyjęła podwyższone poziomy odporności, jeżeli z badań wynika, że badane urządzenie nie spełnia wymogu „podstawowego” – więc nie ma pewności, że jakby spełniało ten wymóg – system działałby poprawnie. Być może wynika to z badań w rozdziale 3 – ale nie znalazłem albo przeoczyłem w pracy takie powiązanie. Nie do końca jasne są ostatnie kolumny tabel 7.1-7.3 – Kryterium oceny wymagane/uzyskane. Przymyszczenie chodzi o założenia-wymagania przyjęte na początku rozdziału 7 – a uzyskane – wyniki badań z 6 czy 9?*

Rozdział 8 to kluczowy rozdział dla realizacji celu głównego pracy – opracowania i uruchomienia nowego nastawnika czasowo-fazowego. Doktorantka przedstawiła opracowane na podstawie wcześniejszych pomiarów i analiz podstawowe wytyczne dla zaprojektowania takiego układu oraz przedstawiła swoje propozycje rozwiązań z Arduino oraz – wersję ostateczną z mikrokontrolerem STM32F407F. Przeprowadzone testy funkcjonalności Doktoranta uznała za spełniające wymagania i w rozdziale 9 opisała badania EMC wykonanego urządzenia. Program badań był zgodny z założeniami przyjętymi w rozdziale 7. Ze względu na brak odporności urządzenia na niektóre testy, Doktorantka modyfikowała układ, traktując te modyfikacje jako wytyczne potwierdzające jedną z tez pomocniczych pracy. Wytyczne te znalazły się w rozdziale 10.1.1. pracy. Analizując zaproponowane przez Doktorantkę wytyczne, można dojść do wniosku, że urządzenia przewidziane do pracy w LWP muszą spełniać typowe zasady „dobrej praktyki projektowania dla zachowania EMC”. Wydaje się, że Doktorantka nie wyróżniła czy też nie zidentyfikowała żadnych nietypowych zaleceń projektowych, ale zwróciła szczególną uwagę (w rozdziale 9) np. na konieczność stosowania rozszerzonych względem typowego filtra przeciwzakłóceńowego filtrów ferrytowych i właściwej konstrukcji i ułożenia przewodu zasilającego wewnątrz urządzenia.

*Zdecydowanie największym mankamentem tej części pracy jest moim zadaniem brak badań in situ w LWP opracowanego i wykonanego nastawnika czasowo-fazowego. W rozdziale 10.1.2 Doktorantka zaproponowała wytyczne dla modernizacji topografii LWP w Instytucie Energetyki – PIB w Warszawie – co jest wypełnieniem ostatniej tezy pomocniczej pracy. Zaproponowane wytyczne wydają się słuszne i logiczne nawet przy podstawowej znajomości zasad EMC, natomiast w pracy brakuje bardziej szczegółowego uzasadnienia przyjętych założeń. Pewnym niedostatkim jest również brak rozważań, czy wszystkie elementy tezy pomocniczej muszą być spełnione jednocześnie, czy też jest duże prawdopodobieństwo właściwej pracy systemu przy częściowym spełnieniu wymagań postawionych w tezach pomocniczych? Odpowiedzią na to pytanie mogły być przywołane już wcześniej badania in situ nowego nastawnika lub badania starego urządzenia ale po modernizacji LWP.*

#### **4. Oryginalność rozprawy, samodzielny dorobek autora, pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy (poziomu techniki) prezentowanego w literaturze światowej**

Do najważniejszych elementów stanowiących oryginalny i twórczy wkład Doktorantki do aktualnego stanu wiedzy w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej należy zaliczyć zidentyfikowanie potencjalnych zaburzeń elektromagnetycznych w środowisku LWP poprzez pomiary pola elektromagnetycznego oraz analizy numeryczne układów probierczych. Europejskie zharmonizowane dokumenty standaryzacyjne nie uwzględniają bezpośrednio takiego środowiska, więc wytyczne dla organizacji laboratoriów wieloprądowych oraz dla aparatury kontrolno-pomiarowej w takich laboratoriach też należy uznać za oryginalny i samodzielny dorobek Autorki.

#### **5. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych, przemysłu, obronności kraju, itp.**

Recenzowana rozprawa wpisuje się w aktualny trend badań odporności dla coraz wyższych poziomów narażeń w różnych gałęziach techniki. Praca jest związana ze środowiskiem laboratoriów wieloprądowych, ale coraz wyższe poziomy narażeń są stosowane między innymi w sektorze komponentów samochodowych czy elektromobilności. Doktorantka w treści rozprawy wskazała na potencjalne problemy ze środowiskiem pomiarowym w warunkach dużych poziomów pola elektromagnetycznego oraz ryzyko niewłaściwej pracy systemów pomiarowych. Co prawda skupiła się na specyficznym przykładzie – ale wnioski, które wyciągnęła oraz zalecenia przedstawione w pracy mogą być wykorzystane dla innych obiektów, urządzeń i instalacji podlegających badaniom EMC.

Rezultaty badań opisanych w ramach recenzowanej rozprawy doktorskiej, stanowiące osiągnięcie naukowe autorki są wkładem do dyscypliny naukowej.

#### **6. Podsumowanie**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Jolanty Sadury pt. „Kompatybilność elektromagnetyczna aparatury sterującej badaniami w środowisku laboratoriów wieloprądowych”, mimo pewnych niedoskonałości u uwag przedstawionych w niniejszej recenzji, spełnia wymagania stawiane przez aktualnie obowiązującą Ustawę „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2023 r. poz.742). Zgodnie z tą ustawą przedstawioną do recenzji rozprawę zaliczam do kategorii: spełniająca wymagania.

Ocenę tę uzasadniam:

- dostatecznym poziomem merytorycznym pracy, świadczącym o wystarczających kompetencjach Doktorantki w uprawianej tematyce kompatybilności elektromagnetycznej,
- dostatecznie spójną i logiczną kompozycją dysertacji, ściśle trzymającą się jej tematu i przejętej tezy,
- dostateczną analizą literatury tematu,

- analizą warunków środowiska pomiarowego oraz opracowaniem sterownika czasowo-fazowego dającego prawdopodobieństwo uodpornienia na zaburzenia w laboratorium wieloprądowym.

Na podstawie analizy pracy oraz powyższego uzasadnienia można stwierdzić, że Doktorantka posiada dostatecznie rozległą wiedzę w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej w laboratoriach wieloprądowych, a tym samym spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy mgr. inż. Jolanty Sadury do publicznej obrony.



.....  
Dr hab. inż. Paweł Bieńkowski