

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Piłata pt.:

”MODELOWANIE OKRĘTOWYCH SYSTEMÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM FLUKTUACJI CZĘSTOTLIWOSCI W STANACH QUASI-USTALONYCH”

Recenzja rozprawy mgr inż. Andrzeja Piłata została opracowana zgodnie z Uchwałą Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni z dnia 27 lipca 2023 r.

1. Ocena wyboru tematyki i zakresu rozprawy

Rozprawa doktorska pt.: „MODELOWANIE OKRĘTOWYCH SYSTEMÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM FLUKTUACJI CZĘSTOTLIWOSCI W STANACH QUASI-USTALONYCH” zawiera 108 stron i składa się z 9 rozdziałów. Bibliografia zawiera 98 pozycji, w tym 5 pozycji współautorskich Doktoranta. Rozprawa dotyczy dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Podjęta przez Doktoranta problematyka dotycząca fluktuacji częstotliwości w okrętowej sieci elektroenergetycznej wynikające z zewnętrznych czynników zakłócających jest ważna i aktualna, szczególnie na okrętach z elektrycznym napędem głównym. Czynnikiem zakłócającymi są częste zmiany obciążenia systemu elektroenergetycznego np. podczas manewrów statku oraz falowanie morza szczególnie w przypadku statków wyposażonych w prądnice wałowe i elektryczne napędy główne. Poziom fluktuacji częstotliwości w okrętowej sieci elektroenergetycznej wraz ze zmianami wartości skutecznej napięć decydują o jakości energii elektrycznej.

Praca doktorska mgr inż. Andrzeja Piłata dotyczy tematyki wpływu zakłóceń zewnętrznych na fluktuacje częstotliwości w okrętowej sieci elektroenergetycznej. Doktorant opracował modele okrętowych systemów elektroenergetycznych kilku statków w programie Typhoon HIL, przeprowadził stosowne symulacje komputerowe oraz przeprowadził badania eksperymentalne dla różnych stanów morza.

Zakres prac przeprowadzonych w rozprawie dotyczy modelowania i symulacji okrętowych systemów elektroenergetycznych w warunkach różnego stanu morza dla kursu statku z i pod falę. Badana symulacyjne po tzw. kalibracji modelu numerycznego Doktorant zweryfikował z wynikami badań eksperymentalnymi, co pozwoliło na potwierdzenie poprawności opracowanego modelu

sieci elektroenergetycznej. Uważam przyjęty w opiniowanej rozprawie doktorskiej zakres badań za uzasadniony. Opiniowana rozprawa ma charakter pracy naukowo-badawczej.

2. Treść i zakres rozprawy

W rozdziale pierwszym Autor omówił problematykę związaną z fluktuacjami częstotliwości w okrętowej sieci elektroenergetycznej, zwracając uwagę na ich negatywne konsekwencje takie, jak: niepoprawne działanie odbiorników elektrycznych, drgania wałów silników elektrycznych czy możliwość wystąpienia zjawiska rezonansowe. Doktorant wskazał na rosnące zainteresowanie przemysłu stocznioowego nowoczesnymi narzędziami informatycznymi do modelowania i symulacji okrętowych systemów elektroenergetycznych, dzięki którym możliwe jest badanie różnych scenariuszy pracy systemu w wybranych warunkach pogodowych. Takie podejście umożliwia projektantom zminimalizować wpływ czynników zewnętrznych na jakość energii elektrycznej miękkiej sieci elektroenergetycznej.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił cel, zakres i tezę pracy. Celem pracy jest analiza możliwości wyznaczania wskaźnika fluktuacji częstotliwości chwilowej napięcia na statkach z elektrycznymi napędami głównymi w różnych warunkach pogodowych na morzu. Zakres pracy obejmuje analizę wpływu czynników zewnętrznych na fluktuację częstotliwości w sieci zasilającej na podstawie wyników pomiarów na statkach Horyzont II, Stena Baltica, Imor, Dar Młodzieży, Karsibór i Zodiak II oraz analizę wpływu fluktuacji na chwilową moc czynną napędu głównego, opracowanie modelu sieci, kalibrację modelu oraz weryfikację eksperymentalną opracowanego modelu. Zgodnie z tezą pracy modelowanie systemu elektroenergetycznego w programie Typhoon III umożliwia wyznaczanie fluktuacji częstotliwości, przeprowadzić analizę jakości energii elektrycznej sieci okrętowej. Takie podejście ma umożliwić określenie dopuszczalnych trybów pracy systemów okrętowych, co ma wpłynąć na zwiększenie bezpieczeństwa prób morskich.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił problematykę jakości napięcia w okrętowych systemach elektroenergetycznych ze zwróceniem na stan prawny. Podał definicję współczynnika THD i T1HD według przepisów Polskiego Rejestru Statków, Lloyd's Register oraz wg norm IEEE 45.1 i IEC-60092-101. Doktorant podał również definicję współczynnika fluktuacji częstotliwości oraz wartości skutecznej podgrupy harmonicznych. W dalszej części pracy Autor podając wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych wyznaczył wartości tych parametrów wykazując wpływ czynników zewnętrznych na poziom fluktuacji częstotliwości napięcia.

W rozdziale czwartym Doktorant przedstawił wyniki eksperymentalne zmian częstotliwości chwilowej zarejestrowane dla morza spokojnego i wzburzonego na statku Horyzont II, Stena Baltica oraz Imor. Na przedstawionych wykresach widać wyraźnie korelację stanu morza z poziomem fluktuacji częstotliwości napięcia. Szkoda, że na załączonych wykresach nie pokazano przechyłów statków. W pracy nie ma informacji czy rejestrowano przechyły statków podczas badań. Na koniec rozdziału Autor zwrócił uwagę na skutki występowania fluktuacji częstotliwości napięcia w sieci elektroenergetycznej, w tym na możliwość wystąpienia rezonansów mechanicznych w okrętowych systemach elektroenergetycznych, zakłóceń w pracy odbiorników i problemy z synchronizacją prądnic. Możliwość wystąpienia tych skutków, jak podał Doktorant można zbadać korzystając z symulacji komputerowych.

W rozdziale piątym Autor przedstawił wyniki badań napięć i prądów w okrętowych systemach elektroenergetycznych na statkach: Dar Młodzieży, Karsibór II oraz Zodiak II. Jednostki te mają różne typy systemów elektroenergetycznych oraz przekształtniki. Szczególnie duże zniekształcenia występują w sieci Daru Młodzieży z sześciopulsowym przekształtnikiem.

Na rys.5.3 pokazano przebiegi napięcia międzyfazowego i prądu na statku Karsibór II z przekształtnikami dwunastopulsowymi. Autor nie wyjaśnił, dlaczego prąd ma inny kąt fazowy w porównaniu do prądów na rys.5.1 i rys.5.5. W podrozdziale 5.2 Doktorant przedstawił uproszczony model okrętowej sieci elektroenergetycznej z nieliniowym odbiornikiem, będącym ekwiwalentem źródła prądu harmonicznego. Nie podano parametrów modelu oraz opisu nieliniowego odbiornika. Nie jest też jasne, dlaczego Doktorant operuje impedancjami w nieliniowym obwodzie.

W rozdziale szóstym Doktorant opisał etapy projektowania okrętowych systemów elektroenergetycznych oraz porównał komercyjne programy symulacyjne, wskazując, że programem dającym największe możliwości symulacyjne jest Typhoon HIL. Niestety schematy na rys.6.2, rys.6.8 są mało czytelne.

W rozdziale siódmym Doktorant opisał model matematyczny falowania morza, jednak ostatecznie w symulacjach fluktuacji częstotliwości napięcia nie wykorzystał tego modelu. Samo zjawisko przechyłów statku na skutek falowania morza jest skomplikowane, o czym pisze Autor na stronie 61. W dalszej części pracy przedstawiono wykresy zarejestrowanych chwilowych mocy czynnych pędników i częstotliwości napięcia na statku Zodiak II oraz uśrednione widma amplitudowe sumy mocy chwilowej pędników dla statku płynącego pod i z falą. Zgodnie z przedstawionymi wykresami kształt widma zależny jest czy statek płynie z, czy pod falę.

W rozdziale ósmym Doktorant poruszył kwestię kalibracji i weryfikacji eksperymentu modelu okrętowego systemu elektroenergetycznego statku Zodiak II. Model systemu składa się z modelu fluktuacji momentu obrotowego śruby okrętowej oraz modelu okrętowego systemu elektroenergetycznego. Model systemu elektroenergetycznego został opracowany w środowisku Typhoon HIL. Schemat modelu pokazany na rys.8.1 jest mało czytelny. W modelu systemu obciążenie silnika indukcyjnego zamodelowano w postaci zmiennego w czasie momentu mechanicznego (8.4), którego parametry wyznaczono na podstawie pomiarów mocy chwilowej każdego z pędników. Wypadkową moc odbiorników określano eksperymentalnie i przyjmowano jej stałą wartość. W podrozdziale 8.3 Doktorant opisał tzw. metodę kalibracji modelu. Kalibracja ta odbywa się w czterech krokach tj.: wyznaczenie chwilowych mocy czynnych na podstawie pomiarów napięć i prądów, dwuetapowe wyznaczenie parametrów funkcji mocy chwilowej, wyznaczenie parametrów funkcji zmiennego obciążenia mechanicznego (8.4) oraz dobór stałej czasowej członu inercyjnego oraz nastaw regulatora prędkości obrotowej. W pracy nie doczytałem w jaki sposób wyznacza się moment mechaniczny (8.4 –krok trzeci kalibracji modelu). Doktorant przedstawił wyniki symulacji, ale nie podał wartości stałej czasowej członu inercyjnego oraz nastaw regulatora prędkości obrotowej. Nie doczytałem się też jaki został zastosowany regulator prędkości obrotowej. Kalibrację modelu Doktorant przeprowadził dla dwóch załączonych zespołów prądotwórczych, załączonych dwóch pędników oraz stałego obciążenia pozostałych odbiorników.

W podrozdziale 8.4 Autor zaprezentował weryfikację eksperymentalną opracowanego modelu dla czterech konfiguracji tj. z falą i pod falę z jednym i z dwoma załączonymi zespołami prądotwórczymi. Moc stałą pozostałych odbiorników przyjęto taką samą jak w procesie kalibracji modelu. Weryfikacja eksperymentalna przebiegała w taki sam sposób jak w procesie kalibracji modelu. Wyniki symulacji wydają się zadawalające zarówno dla przypadku z falą jak i pod falę. Jednakże wg mnie brakuje w pracy ogólnego schematu blokowego modelu okrętowej sieci elektroenergetycznej, co sprawia trudności w pełnym zrozumieniu przeprowadzonych w pracy symulacjach.

W podrozdziale 8.4.3 Autor przedstawił weryfikację eksperymentalną wyników symulacji zniekształceń na statku Zodiak II w czasie zmian częstotliwości chwilowej, jednak trudno się tu odnieść do treści zawartych w tym podrozdziale. Jak widać wykresy wykonano w programie

MathCad, o czym wcześniej Autor nie pisał w pracy. W podsumowaniu wyników weryfikacji eksperymentalnej Doktorant podał słuszne wnioski.

W rozdziale dziewiątym Doktorant podsumował wyniki przeprowadzonych badań i postawił słuszne wnioski, zaznaczając, że ograniczeniem w zaprojektowanym modelu jest konieczność opracowania funkcji momentów obrotowych pędników.

3. Uwagi krytyczne

W opiniowanej rozprawie przeprowadzono badania symulacyjne i eksperymentalne okrętowych sieci elektroenergetycznych. Sposób wykonania i interpretacja badań symulacyjnych nie budzi większych zastrzeżeń. Uwagi krytyczne wymagające wyjaśnienia zamieszczam poniżej:

Rozdział 2

- 1) Autor w tezie pracy podał, że model okrętowego systemu elektroenergetycznego umożliwia „*określenie dopuszczalnych trybów pracy nowoprojektowanych systemów okrętowych*”. Proszę o wyjaśnienie tego zapisu.

Rozdział 5

- 1) Proszę wyjaśnić z czego wynika mocno odkształcony przebieg prądu w podsystemie steru strumieniowego na statku Dar Młodzieży (rys.5.1).
- 2) Proszę wyjaśnić przesunięcie fazowe prądu w systemie na statku Karsibór II względem napięcia.
- 3) Na rys.5.7 pokazano uproszczony schemat okrętowej sieci elektroenergetycznej z nieliniowym odbiornikiem. Dlaczego w opisie schematu mowa jest o impedancjach odbiorników?
- 4) Na rys.5.10 podano niecałkowite wartości kolejnych harmonicznych.

Rozdział 6

- 1) Rys.6.2a i rys.6.8 są nieczytelne.
- 2) We wzorze (6.1) występują wielkości zespolone. Czy oznaczenia napięć i prądów są prawidłowe? Co oznacza wielkość δ we wzorze (6.1)?

Rozdział 7

- 1) Doktorant w podrozdziale 7.1 opisał model matematyczny falowania morza, a w podrozdziale 7.2 opisał modelowanie zachowania statku w warunkach falowania morza. Zjawisko to jest niewątpliwie skomplikowane, ale ostatecznie w badaniach symulacyjnych pominięto to zagadnienie. Wydaje się, że można było tylko zwrócić uwagę na złożoność problemu.
- 2) Na rys. 7.12 pokazano zmiany sumy chwilowych mocy czynnych pędników statku Zodiak II, a na rys.7.16-7.19 uśrednione widma amplitudowe sumy mocy chwilowych pędników. Szkoda, że nie pokazano dla tych przypadków przebiegów napięć i prądów.

Rozdział 8

- 1) Na str.74 Doktorant napisał „*Oczywiście uwzględnienie efektu zmiennego wiatru wraz z falowaniem w modelowaniu zmian oporu całkowitego jest możliwe, ponieważ modelowanie fluktuacji częstotliwości chwilowej wymaga wyznaczenia funkcji opisującej zmiany momentu śruby napędowej statku*”. Proszę o wyjaśnienie tego sformułowania.
- 2) Rys.8.3 jest nieczytelny.
- 3) W pracy brakuje wg mnie schematu blokowego okrętowej sieci elektroenergetycznej wraz z układem sterowania. Opisana metoda kalibracji modelu polega na doborze stałej czasowej członu inercyjnego oraz nastaw regulatora, jednak Doktorant nie podał wartości tych wielkości. Nie ma też informacji jaki rodzaj regulatora zastosowano i czy tylko była regulowana prędkość obrotowa ? Na podstawie zmierzonych napięć i prądów wyznaczone zostały chwilowe moce czynne pędników i dla wybranego okresu czasu wyznaczono szereg Fouriera metodami numerycznymi, otrzymując postać chwilowych mocy czynnych w postaci wzoru (8.5). Następnie wyznaczono parametry funkcji zmiennego obciążenia mechanicznego (8.4), ale Doktorant nie podał w jaki sposób. Ostatni etap kalibracji polega na wyznaczeniu stałej czasowej członu inercyjnego oraz nastaw regulatora prędkości obrotowej poprzez dopasowanie wyników pomiaru z wynikami modelowania i symulacji fluktuacji częstotliwości chwilowej. Jeżeli wyznaczono stałą czasową członu inercyjnego i nastawy regulatora przy takim kryterium, to jaki to miało wpływ na napięcie zasilające w sieci ?
- 4) W pracy przyjęto stałe obciążenie pozostałych odbiorników na poziomie 140 kW. Jak zmiana tego obciążenia może wpłynąć na wyniki symulacji ?

4. Ocena poziomu wydawniczego i redakcyjnego rozprawy

Układ treści rozprawy jest właściwy. Praca zawiera nieliczne błędy językowe. Na uwagę zasługuje staranne opracowanie wykresów i rysunków, poza nielicznymi nieczytelnymi schematami.

7. Ocena rozprawy doktorskiej

Wybór tematyki rozprawy i jej zakres są właściwe i nie budzą zastrzeżeń. Tematyka rozprawy jest aktualna na tle obecnego stanu wiedzy. Autor rozprawy wykazał wiedzę teoretyczną i praktyczną w zakresie dyscypliny naukowej, której dotyczy rozprawa. Cele postawione w rozprawie zostały osiągnięte.

Nie ulega wątpliwości, że wykonano bardzo pracochłonne i wartościowe badania eksperymentalne i symulacyjne. Opiniujący oczekuje od Doktoranta ustosunkowania się do podanych uwag w czasie publicznej dyskusji nad rozprawą. Stwierdzam, że Doktorant posiada wiedzę ogólną i predyspozycje niezbędne do prowadzenia pracy naukowej.

8. Wniosek końcowy

Mając na uwadze pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Andrzeja Piłata pt.: „*Modelowanie okrętowych systemów elektroenergetycznych z uwzględnieniem fluktuacji częstotliwości w stanach quasi-ustalonych*”, stwierdzam, że rozprawa ta spełnia wymagania Ustawy z 14 marca 2003 roku „*O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*” (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) " oraz Rozporządzenia MNISzW z dnia 26.09.2016 (Dz. U. z 30.09.2016, poz. 1586).

Uwzględniając powyższe stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Andrzeja Piłata do publicznej obrony.



Mirosław Wołoszyn