

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: **Wykorzystanie emisji akustycznej w diagnozowaniu morskich urządzeń elektroenergetycznych na przykładzie półprzewodnikowych przyrządów mocy**

Autor rozprawy: **mgr inż. Radosław Gordon**

Promotor rozprawy: **dr hab. inż. Artur Bejger, prof. PM**

Promotor pomocniczy: **dr inż. of. elektroautomatyk okr. Maciej Kozak, prof. PM**

Dziedzina: **nauki inżynieryjno-techniczne**

Dyscyplina: **automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne**

1. Uwagi ogólne

Tematyka rozpatrywana w opiniowanej rozprawie dotyczy zagadnień związanych z diagnostyką urządzeń elektroenergetycznych na przykładzie półprzewodnikowych przyrządów mocy, wspomagającej w swoim celu bezawaryjne działanie systemów sterowania układami napędu elektrycznego pracującymi na jednostkach pływających czy działających w innych morskich systemach typu offshore. Wspomniane systemy sterowania w postaci urządzeń przekształtnikowych, aby zapewnić odpowiednią jakość działania przy dużej szybkości przełączeń, tj. umożliwić uzyskanie odpowiedniej częstotliwości oraz kształtu sygnału napięcia, jak i zapewnić bezawaryjność tego działania, powinny podlegać nie tylko prognozowaniu ich stanu technicznego, ale również powinny umożliwiać detekcję samych uszkodzeń.

Spośród wielu metod takiego działania, znanych z pola diagnostyki urządzeń przemysłowych, Autor skupia się na zjawisku emisji akustycznej, jako podstawie działania swojego układu diagnostycznego. Wybór taki Doktorant wspiera we wstępnej części swojej rozprawy, odnosząc się do istniejącego tła publikacyjnego. Z uwagi na diagnozowanie pracy półprzewodnikowych przyrządów mocy, rozważania są wstępnie prowadzone na przykładzie testowania modułów zawierających tranzystory IGBT.

Celem opiniowanej rozprawy jest zbadanie własności sygnałów emisji akustycznej generowanych przez wybrane typy półprzewodnikowych przyrządów mocy, a także takie poddanie ich cyfrowemu przetwarzaniu sygnału, aby uzyskać informację o stanie pracy tych przyrządów, rozumianym jako wiedza do prognozowania stanu technicznego czy informacja użyteczna w celu detekcji uszkodzenia.

W pracy sformułowano tezę w postaci: *istnieje możliwość wykorzystania fal sprężystych emisji akustycznej do diagnozowania zmiennych stanów pracy energoelektronicznych urządzeń półprzewodnikowych*. Teza jest sformułowana prawidłowo i nie budzi zastrzeżeń.

Zakres pracy wynikający z przedstawionego celu rozprawy jest szeroki i obejmuje następujące zagadnienia:

- a) przegląd metod testowania tranzystorów i modułów tranzystorów z izolowaną bramką, uwzględniając również zjawisko emisji akustycznej,
- b) zjawisko emisji akustycznej, omówienie jego deskryptorów, przegląd czujników i zagadnienie wzorcowania,
- c) opis stanowiska badawczego i sposobów rejestracji zdarzeń emisji akustycznej,
- d) analizę i omówienie wyników badań własnych,
- e) podsumowanie uzyskanych wyników, przedstawienie problemów otwartych i nakreślenie ścieżki dalszych badań.

Szczegółowe rozwinięcie wyżej wymienionych zagadnień stanowi właściwą treść rozprawy, jednak należy zaznaczyć, że jej pokaźna wstępna część ma niestandardową kolejność i zawiera informacje o istocie problemu będącego przedmiotem pracy, o zamierzonym sposobie jego rozwiązania, w odwrotnej niż spodziewana kolejności. Cel pracy jest bardzo skrótowo i nietypowo podany dopiero w rozdziale 5., podobnie jak i teza. Dodatkowo, rozdziały wstępne zajmują praktycznie 60% objętości rozprawy, z wyłączeniem bibliografii, streszczenia, wykazów oznaczeń, czy spisu treści.

Niemniej, zaprezentowane wyniki są przedstawione w sposób pozwalający na weryfikację oraz ocenę efektów osiągnięcia tego celu, choć pozostawiają pewien niedosyt. Tematyka rozprawy jest aktualna i dotyczy zagadnień naukowych o istotnej wartości użytecznej, a jej podjęcie uważam za w pełni uzasadnione.

Rozprawa ma charakter eksperymentalny, a dalsze plany badawcze Doktoranta jasno wskazują na perspektywy rozwoju uzyskanych w niej wyników i aktualność problemu.

2. Przedmiot, zakres i ocena merytoryczna pracy

2.1. Zawartość rozprawy

Wstęp rozprawy zawiera uzasadnienie podjęcia tematyki badań przez Autora, wychodząc od popularności silników sterowanych przez urządzenia przekształtnikowe, kończąc na zjawisku emisji akustycznej i nakreśleniu kształtu rozprawy.

Rozdział 1. dysertacji zawiera przegląd metod testowania tranzystorów i modułów IGBT, od odniesienia się do możliwych źródeł awarii układów półprzewodnikowych przetaczających, przez podział metod pomiarowych użytych do celu wykrywania uszkodzeń, a także szczegółowe omówienie wybranych metod, jak: analiza temperatury radiatora, pomiar napięcia kolektor-emiter w stanie włączenia, wykorzystanie promieniowania rentgenowskiego w defektostkopii, wykrywanie uszkodzeń za pomocą ultradźwięków, czy wreszcie wykorzystanie emisji akustycznej do celów diagnostyki wybranych układów półprzewodnikowych.

Rozdział 2. dotyczy zjawiska emisji akustycznej. Autor dokonuje przeglądu literatury opisując wielkości charakteryzujące emisję akustyczną, przedstawiając zjawiska oddziałujące na fale, prezentując podział fal z uwagi na charakter, częstotliwość, w końcu zamieszczając przegląd deskryptorów emisji akustycznej. W rozdziale dalej są zaprezentowane przetworniki sygnałów emisji akustycznej, a także metody wzorcowania toru pomiarowego.



Rozdział 3. pracy szczegółowo omawia technologię tranzystorów IGBT, w tym ich budowę, historię ewolucji zmian w technologii tranzystorów IGBT, kończąc na mostku z tranzystorów IGBT, wykorzystywanym przy sterowaniu układów napędowych.

W **rozdziale 4.** nadmiernie skrótowo zdefiniowano cel i tezę rozprawy, które to powinny raczej być zdefiniowane zaraz po wstępie.

Rozdział 5. zawiera właściwą część rozprawy w postaci zaprezentowania wyników badań własnych, w tym opis stanowiska badawczego, charakterystykę torów pomiarowych i omówienie metodyki prowadzonych badań. Poszczególne wyniki cząstkowe są przedstawiane w odniesieniu do kolejnych składowych stanowiska badawczego, zdjęć stanowiska badawczego i urządzeń pomiarowych, zrzutów ekranu oscyloskopu lub ewentualnie przebiegów uzyskanych ze środowiska obliczeniowego Matlab, po przetworzeniu odpowiednich danych. Zadanie samego pomiaru emisji akustycznej zostało zrealizowane za pomocą własnego rejestratora emisji, urządzenia Pocket AE2, sensora Vallen VS600-Z1, sensora WS Alfa, jak i urządzenia LinWave. W rozdziale tym zawarto również wyniki badań nad zależnością zjawiska emisji akustycznej a temperaturą otoczenia.

Podsumowanie i wnioski formułują zestaw otwartych zagadnień, a podsumowanie samych wyników zamieszczono we **Wnioskach końcowych**.

Ostatnia część rozprawy (**Bibliografia**) zawiera 99 pozycji, w tym 6 pozycji współautorstwa Autora. Wyłączając instrukcje, karty katalogowe i noty aplikacyjne. Około 18% pozycji literaturowych jest z ostatnich 5 lat, około 31% z przedziału 6-10 lat, natomiast 51% starszych niż 10 lat. Bibliografia stanowi reprezentatywny przegląd prac poświęconych zagadnieniom stanowiącym temat rozprawy doktorskiej, uwzględniając najnowsze wyniki badań, do których odnosi się Autor.

2.2. Merytoryczna ocena pracy

Celem rozprawy jest wieloaspektowe zbadanie własności sygnałów emisji akustycznej, towarzyszących pracy wybranych typów półprzewodnikowych przyrządów mocy wraz z przygotowaniem do uzyskania informacji o stanie pracy wyżej wymienionych układów. Realizacja tego celu wymagała wykonania szeregu eksperymentów, przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń czy w końcu wykonania krytycznej analizy wiarygodności uzyskanych wyników.

Do najważniejszych osiągnięć badawczych pracy zaliczam:

- przeprowadzenie dogłębnej analizy czynników wpływających na pracę czujników w zadaniu rejestracji emisji akustycznej,
- zbudowanie i wykorzystanie różnych układów pomiarowych do celu rejestracji emisji akustycznej, biorąc pod uwagę wady istniejących i raportowanych w literaturze rozwiązań.

Na podkreślenie zasługuje staranność Autora w prezentowaniu i opisie wprowadzanych pojęć, głęboka wiedza z dziedziny elektroniki i elektrotechniki, walor merytoryczny licznych rysunków umożliwiających łatwe śledzenie toku pracy, a waga niezręczności edycyjnych jest mało istotna. Rysunki są celowo dobrane i dobrze dopracowane graficznie.

W trakcie czytania pracy nasunęły mi się następujące uwagi krytyczne o charakterze ogólnym:

- 1) czy wykonano badania dotyczące wpływu częstotliwości kluczowania na wydajność metody diagnostycznej korzystającej z emisji akustycznej? Jeżeli tak, to jak zależy to od materiału, na którym jest zamontowany element półprzewodnikowy?
- 2) cel ze s. 61 jest sformułowany mało precyzyjnie, ponieważ „ich charakterystyczne stany pracy” nie wiadomo do jakich „ich” się odnosi – sygnałów czy półprzewodnikowych przyrządów mocy, co powoduje kłopot w interpretacji wyników?
- 3) sposób doboru cieczy sprzęgającej (s. 62) jest opisany jako wiedza ekspercka, przy czym Autor nie dzieli się tutaj z czytelnikiem taką informacją, ani nie podaje źródła literaturowego – jakie są kryteria doboru takiej cieczy i wpływ na uzyskane wyniki, a także jak wygląda stan literatury światowej?
- 4) proszę przedstawić metodologię doboru szybkości próbkowania w relacji do warunków twierdzenia Shannona-Kotelnikowa, także w odniesieniu do widocznej na rys. 5.18 najwyższej składowej częstotliwości obecnej w widmie zarejestrowanego sygnału, w szczególności mając na względzie efektywność metody diagnostycznej (może to stanowić cenne wnioski pod kątem uzupełnienia stanu badań o uwagę nr 2);
- 5) jak Autor rozumie „diagnostykę” i jak widzi możliwość zautomatyzowania całego procesu (s. 94), tak aby zapewnić rzetelne wyniki prognozowania stanu danego elementu – o jakim poziomie wiarygodności tak przeprowadzonej diagnostyki można mówić, wreszcie – czy wynik uzyskany na s. 97 jest przenośny (czy metodę można zastosować do diagnostyki innych urządzeń)?
- 6) brakuje informacji dotyczącej przewidywanego związku między temperaturą otoczenia a możliwością wykrywania uszkodzeń zastosowaną metodą diagnostyczną (s. 103);
- 7) jak Autor ocenia możliwości diagnostyczne i efektywność metody emisji akustycznej w sytuacji, gdy ocenie podlega urządzenie pracujące na jednostce pływającej, gdzie będą się nakładać na siebie oddziaływania jednostki napędowej, zakłócenia zewnętrzne, czy inne nieoczekiwane efekty związane ze stanem pracy układu napędowego?
- 8) czy możliwości diagnostyczne (s. 101) jest bezpiecznie opierać wyłącznie na cesze powtarzalności emisji akustycznej – co jeżeli nieprawidłowo dobierze się deskryptor, jak i nastawy zastosowanych filtrów? Jakiego rodzaju uszkodzenia zostały wykryte w trakcie badań, co prowadziło Autora do określenia uzyskanego rozwiązania jako system diagnostyczny?
- 9) czy w celu zautomatyzowania procesu diagnostycznego Autor widzi możliwość zastosowania uczenia maszynowego wraz z odpowiednią automatyczną ekstrakcją cech, tak aby rozpoznawać odpowiednie modele uszkodzeń, przy pomocy np. rekurencyjnych sieci neuronowych?
- 10) do zasadniczych wad metod cytowanych na podstawie literatury Autor zaliczył brak możliwości prowadzenia testów w trakcie pracy układu przy badaniu temperatury układu, skomplikowaną budowę układów do pomiaru napięcia, użycie wielkogabarytowych urządzeń (RTG), brak możliwości pracy w czasie rzeczywistym (ultradźwięki) – proszę o odniesienie uzyskanego rozwiązania (metody) do tego tła.

Podział tekstu rozprawy na rozdziały jest prawidłowy, materiał ilustracyjny jest bogaty i czytelny, a przedstawiona bibliografia jest reprezentatywna dla problematyki poruszanej przez Autora.

Praca nie ma oprócz nietypowej kolejności rozdziałów zasadniczych wad, można jednak wykazać drobne uchybienia lub elementy dyskusyjne:

- s. 9: selektywne uwzględnienie jednostek przy opisie oznaczeń;
- s. 9_{2.1}: oznaczenie *deg* nie pozwala się zorientować w jakich jednostkach jest mierzona temperatura;
- s. 11¹⁵: „wsparcie o” powinno być zamienione na „wsparcia przez”;
- s. 11¹⁹: z tekstu nie wiadomo o obniżenie czyjego śladu węglowego chodzi Autorowi,
- s. 12¹⁸⁻¹⁹: układ sterowania, dalej – czy awaria elektroniki zagraża życiu sprzętu (personifikacja)?
- s. 13₉: zdanie jest kłopotliwe w interpretacji – czy meritum prac to sama obserwacja zjawiska, czy też wykorzystanie emisji akustycznej do efektywnej diagnostyki?
- s. 15_{4.2}: idem per idem, sposób pozwala wykryć uszkodzenie przed zaistnieniem faktu dającego możliwość prognozowania mogącego wystąpić uszkodzenia;
- s. 20¹²: czytając zdanie można odnieść wrażenie, że wzór (1.1) definiuje formułę opisującą uszkodzenie tranzystora IGBT;
- s. 20₃: brak konsekwencji w przyjętej konwencji pisania skrótów (raz „rysunek”, innym razem „rys.” jest umieszczane w nawiasie);
- s. 27, styl cytowań, przykładowo [30,31] lub [13,45,72] nie pozwala czytelnikowi rozprawy zrozumieć na czym polega specyfika rozwiązań prezentowanych w przywołanych pozycjach literaturowych – powinno się unikać podawania wielu odnośników razem, bez należytego scharakteryzowania ich;
- s. 28⁵: sformułowanie „sygnał zbędny” jest zbyt pojemne – w jakim sensie zbędny?
- s. 37: poniżej wzoru (2.1) jest odniesienie do drogi dx , po czym jest mowa o odległości; dodatkowo, nie wiadomo czym jest samo x , co w tandemie z „początkowa wartość amplitudy x ” pozostawia czytelnika bez żadnej odpowiedzi;
- s. 38, rys. 2.5: brak opisu osi odciętych – czy chodzi o x ?
- s. 39, Tab. 2.2: brak użycia jednostek SI, dodatkowo prezentowanie wyników z różną liczbą cyfr po przecinku, co utrudnia (w sumie w całości pracy) szybką ocenę wzrokową tych wyników;
- s. 42¹²: od jakiej wartości jest mierzona ta połowa amplitudy przy niezerowej początkowej wartości sygnału?
- s. 44-45: pominięto wibroakustyczne metody diagnostyki maszyn;
- s. 48: pewnym mankamentem jest brak charakterystyki pozostałych metod kalibracji, co właściwie nie wspiera wyboru przez Autora testu łamania ołówka jako słusznej metody kalibracji;
- s. 54: spolszczenie nazw jednostek SI – „om”, „kiloherców”, co jest właściwie obecne w całości tekstu pracy, przykładowo s. 80;
- s. 70²: skrót myślowy „wartością rezystora”;
- s. 73, rys. 5.14: powinno być „tranzystora” zamiast „tranztstora”;
- s. 82-83: zachowanie tej samej skali na osi rzędnych uwypukliłoby (oczywiście przy logarytmicznej zmianie wartości powodującej wybór odpowiedniego odcienia koloru) zmiany składowych na charakterystykach widmowych;
- s. 86₁₁: skrót myślowy – jak można „zobaczyć widmo” używając określone algorytmy?
- s. 87₇: powinno być „wynika” zamiast „wnika”;



- s. 98⁴⁻⁵: nie jest podane, że podane wartości odnoszą się do pasma przenoszenia, częstotliwości granicznej, etc.;
- Bibliografia – widoczna jest dowolność w sposobie podawania dat (por. [1] i [11]), zakresów stron ([20] i [24]) czy numerów tomów ([41], [42]).

3. Ocena końcowa i wnioski

Mimo przedstawionych powyżej uwag krytycznych, które nie dotyczą zasadniczego dorobku Doktoranta, uważam, że postawiony cel pracy ma charakter naukowy i został zrealizowany. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej, ma bardzo dobre przygotowanie z zakresu elektroniki oraz opanował ogólną wiedzę teoretyczną umożliwiającą prawidłowe wykorzystanie metod cyfrowej obróbki i analizy sygnałów.

Wobec powyższych uważam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Radosława Gordona *Wykorzystanie emisji akustycznej w diagnozowaniu morskich urządzeń elektroenergetycznych na przykładzie półprzewodnikowych przyrządów mocy* spełnia właściwe ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim oraz mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.



/Dariusz Horla/