

Prof. dr hab. inż. Wojciech Jarzyna
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384339; e-mail: w.jarzyna@pollub.pl

Lublin, 01.02.2022 r.

RECENZJA

**ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. SEBASTIANA BĄBY
PT. „RELIABILITY IMPROVEMENT OF HIGH PERFORMANCE POWER SUPPLIES”
(ZWIĘKSZANIE NIEZAWODNOŚCI PRZEKSZTAŁTNIKÓW ENERGOELEKTRONICZNYCH
SPECJALNEGO PRZEZNACZENIA)**

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 23 listopada 2021 r.

1. Ocena problematyki rozprawy i układu treści pod względem formalnym

Oceniana rozprawa doktorska została napisana w j. angielskim. Zawiera pięć rozdziałów, streszczenie, wykaz bibliograficzny, wykaz skrótów i symboli, listę rysunków i tablic. Wymienione części przedstawione są na pierwszych 176 stronach rozprawy. W dalszej kolejności znajduje się osiem załączników, na które składają się: jeden autorski artykuł opublikowany w Biuletynie PAN, trzy współautorskie artykuły opublikowane w uznanych czasopismach naukowych t.j. IEEE Transactions on Power Electronics oraz IEEE Access oraz cztery artykuły opublikowane w materiałach znanych międzynarodowych konferencji dostępnych w bazie IEEE Explore.

Tematyka rozprawy dotyczy zagadnień poprawy niezawodności przeksztaltników energoelektronicznych. Zagadnienie to jest szczególnie istotne dla firm zajmujących się projektowaniem i wytwarzaniem urządzeń energoelektronicznych. W artykułach naukowych podjęta problematyka jest również dość często poruszana, o czym świadczy duża liczba publikacji, na które powołuje się Doktorant oraz blisko 1700 rekordów wygenerowanych przeze mnie w bazie IEEE Explore na hasło "reliability improvement of power electronics". Wyniki te dodatkowo zaświadcniają, że podjęta przez Doktoranta problematyka badawcza jest aktualna i cieszy się znaczącym zainteresowaniem w gronie specjalistów.

2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Wykaz 201 pozycji bibliograficznych, na które powołuje się Doktorant należy uznać za bardzo obszerny. Można go podzielić tematycznie na literaturę związaną z technologią plazmową (ponad 55 pozycji), problematyką niezawodności (ponad 60) oraz energoelektronicznymi zasilaczami i własnościami elementów i układów

energoelektronicznych (ponad 100). Wymienione obszary tematyczne często zachodzą na siebie, co jest sprawą naturalną dla prac wymagających sięgania po specjalistyczną wiedzę z zakresu różnych dyscyplin, a podane w nawiasach wartości mają charakter orientacyjny.

Zdecydowana większość tych publikacji to artykuły opublikowane w wysokiej rangi czasopismach IEEE i Elsevier oraz materiałach znanych konferencji międzynarodowych. Wykaz bibliograficzny uzupełniają podręczniki i materiały szkoleniowe. Opisy bibliograficzne sporządzone są poprawnie, wyjątek stanowią pozycje [193, 194 i 195], w których nie określono wymaganych informacji nt. nośnika, miejsca wydania, wydawcy, daty dostępu, warunków dostępu.

Praktycznie wszystkie to pozycje wydane w ostatnich latach, co świadczy o ich aktualności.

W treści rozprawy Doktorant umiejętnie powołuje się na literaturę. Brak powołania zauważono tylko na stronie 60, gdzie Doktorant przytacza tam wartości procentowe uszkodzeń, bez podania źródła skąd one pochodzą.

3. Ocena celów naukowych, tezy badawczej

Analizowany proces technologiczny dotyczy obróbki plazmowej wymagającej zastosowania zasilaczy specjalnego przeznaczenia zbudowanych w oparciu o przekształtniki energoelektroniczne. Uwzględniając specyfikę procesu technologicznego obróbki plazmy, jak i postawione zadania badawcze, cele rozprawy zostały sformułowane następująco:

- a) Analiza warunków pracy przekształtników specjalnego przeznaczenia do procesów plazmowych oraz topologii przekształtników stosowanych w takich aplikacjach.
- b) Propozycja procedury projektowania zorientowanego na niezawodność, dostosowanej do wymogów związanych z opracowywaniem nowych przekształtników energoelektronicznych specjalnego przeznaczenia.
- c) Projekt i uruchomienie testu przyspieszonego dla tranzystorów SiC MOSFET w obudowie SOT -227B.
- d) Opracowanie modelu niezawodnościowego w oparciu o wyniki testu przyspieszonego.

Przedstawione cele podane są w uzasadnionej logicznie kolejności pozwalającej najpierw zapoznać się ze specyfiką procesu obróbki plazmowej i wynikających z niej wymagań względem zasilaczy (rozdział 1). Następna część dotyczy problemowego zagadnienia poprawy niezawodności przekształtników specjalnego zastosowania (rozdz.2). W rozdziale tym sformułowane są podstawy teoretyczne badań niezawodnościowych. Przedstawione jest klasyczne, czasochłonne podejście, jak również autorska propozycja Doktoranta, pozwalająca skrócić czas wykonania testów niezawodnościowych.

Realizacja celów i rozwiązywane zadania naukowe składają się na wyjaśnienie problemu badawczego, który określony został w postaci tezy naukowej. W języku polskim teza ta przyjmuje brzmienie: **Możliwe jest opracowanie modelu probabilistycznego, opisującego rozkład prawdopodobieństwa awarii tranzystora MOSFET z węgla krzemu, umożliwiającego ocenę niezawodności nowoprojektowanych przekształtników energoelektronicznych specjalnego przeznaczenia do procesów plazmowych, w ramach zmodyfikowanej procedury projektowania zorientowanego na niezawodność.**

Tak sformułowana teza jasno określa problem naukowy, a kwestię jej spełnienia Doktorant rozstrzyga w kolejnych trzech rozdziałach rozprawy doktorskiej.

Merytoryczną część pracy kończy podsumowanie, w którym Doktorant odnosi się do realizacji celów, spełnienia tezy badawczej i sformułowania dalszego kierunku prac. Taki układ pracy wypełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom. Charakteryzuje się logicznym układem treści, ma sformułowane cele, problem badawczy a w końcowej części pracy odniesienie o zakresie spełnienia tezy i realizacji celów pracy.

Załączniki znajdują się poza główną częścią rozprawy. Stanowią je kopie ośmiu artykułów Doktoranta opublikowane w renomowanych wydawnictwach, z których siedem wydanych zostało w 2021r.

4. Charakterystyka pracy i ocena zastosowanych metod badawczych oraz uzyskanych wyników badań

W trakcie badań Doktorant stosował różne metody badawcze, potwierdzając tym samym umiejętność prowadzenia badań i rozwiązywania problemów naukowych. Podstawową są badania literaturowe, których wpływ widoczny jest na każdym etapie realizacji prac. Badanie te pozwoliły określić podstawę do formułowania modeli, a krytyczna ocena metod projektowania niezawodnościowego doprowadziła do ich modyfikacji i dostosowania modeli do realizacji celów postawionych w pracy. Rozwinięciem metody modelowania są badania symulacyjne, które poprzedzały projektowanie, budowę, uruchamianie stanowiska laboratoryjnego i prowadzenie badań eksperymentalnych na stanowisku rzeczywistym. Wykonaniu badań towarzyszyło oczywiście opracowanie wyników, które wymagało sprawnego posługiwania się aparatem obliczeniowo-analitycznym.

Rozdział pierwszy ma charakter wprowadzający. Autor przybliżył problematykę obróbki plazmowej. Wprowadził pojęcia określające te procesy, opisał budowę komór plazmowych, określił wymagania względem układów zasilających generatory plazmy, określając je dalej jako układy zasilania specjalnego przeznaczenia. Zaproponował blokowy model energoelektronicznego układu zasilającego wskazując, że układy te najczęściej mają budowę modułową. Podkreślił konieczność utrzymania przez przekształtniki określonych parametrów zasilania spełniających wymagania systemu generacji plazmy, t.j. zdolność do wytrzymywania i tłumienia łuku, podtrzymywanie bardzo wysokiej szybkości zmian napięcia (du/dt) przy zachowaniu ogólnych wymagań zasilania, zdolność do wytrzymywania wysokiego współczynnika fali stojącej itp.. W konkluzji tego rozdziału, uzasadniając wybór tematyki, Doktorant napisał, że jakakolwiek awaria lub niepożądane wyłączenie zasilacza układu generacji plazmy może spowodować pogorszenie jakości wytwarzanych warstw i powłok plazmowych, skutkując dużymi stratami finansowymi, związanymi z marnotrawstwem materiałów i czasu poświęconego na odtworzenie linii produkcyjnej. Z wymienionych względów wynikają wysokie wymagania dotyczące niezawodności i jakości wobec wszystkich urządzeń stosowanych w przemyśle obróbki plazmowej.

Fundamentalną częścią rozprawy jest rozdział drugi. Doktorant dokonał w niej wyboru sposobu realizacji badań. Zrezygnował z metody zwiększania nadmiarowości układu, argumentując to wzrostem kosztów jednostkowych wskaźników wielkości projektowanego

układu zasilania. Nie wybrał również monitorowania stanu sprawności układu w trybie on-line ze względu na dużą różnorodność wskaźników i wielkości krytycznych. Wybrał natomiast metodę projektowania zorientowanego (Design for Reliability DfR) określając ją jako metodę holistyczną, która umożliwia łatwą skalowalność w przypadku zastosowania urządzeń o strukturze modułowej. Dla metody tej zdefiniował podstawowe pojęcia, w tym funkcję gęstości prawdopodobieństwa, funkcję niezawodności oraz wskaźnika awaryjności, itp.. W oparciu o typowy kształt "bathtub" krzywej awaryjności w funkcji czasu, ograniczył poszukiwania parametrów niezawodności do informacji o poziomie wskaźnika awaryjności i czasu jego trwania na ustalonym niskim poziomie. Po przedstawieniu dalszej dyskusji i klarownej argumentacji, wykazał brak standaryzowanych łatwo dostępnych danych dla tej metody. Oznacza to, że należy przygotować wiele modeli niezawodności dla każdego komponentu, co wymusza realizację szeroko zakrojonych badań uzupełniających. Aby uniknąć takich prac Doktorant zaproponował nową zmodyfikowaną procedurę projektowania zorientowanego na niezawodność. Główną różnicą między podejściem klasycznym a zaproponowanym przez Doktoranta jest większa integracja nowej procedury DfR z procesem technologicznym. Zmodyfikowana procedura koncentruje się w większym stopniu na badaniach fizycznych niż na badaniach modelowych. Stąd, w dalszych badaniach, przy założonym kształcie charakterystyki awaryjności, ograniczył liczbę testów skupiając się na awariach spowodowanych elementami półprzewodników, a w badanym przypadku tranzystora MOSFET SiC w obudowie SOT-227B.

W rozdziale trzecim, z zakresu rozważań, wyłączył błędy "wieku niemowlęcego", gdyż są one ściśle związane z jakością procesu produkcyjnego. Uwagę skupił na zewnętrznych typach uszkodzeń, związanych z jakością złączy, ich zmęczeniem, rozwarstwianiem, pękaniem, itp.. Omówił techniczne aspekty modelowania niezawodności, począwszy od analizy strategii przyspieszonych testów czasu życia, przez zaprojektowanie dedykowanego stanowiska testowego, aż po identyfikację parametrów modelu matematycznego. Przeprowadził liczne badania eksperymentalne, zgodne z metodą cyklicznego obciążania. W próbach tych zidentyfikował parametry niezawodnościowe tranzystorów SOT-227B. Typy uszkodzeń potwierdził podczas obrazowania rentgenowskiego i mikroskopii akustycznej oraz dekapulacji.

Dla realizacji badań przyspieszonego czasu życia Doktorant wykonał specjalizowane stanowisko badawcze, spełniające wymagania stabilności termicznej, dokładności wymuszania napięcia dren-źródło i niskiej dyspersji temperatury złącza pomiędzy sąsiednimi próbkami. Układ wyposażył w algorytm do wykrywania uszkodzeń, który pozwolił złagodzić skutki awarii zasilania tranzystorów MOSFET i zabezpieczał je przed całkowitym zniszczeniem, dzięki czemu można było później przeprowadzić analizę poawaryjną podzespołu.

Poszukując modelu niezawodności, do testów Doktorant wybrał model Weibulla, który porównywał z innymi modelami. Uzyskane wyniki wykazały, że zarówno dwu-, jak i trójparametrowy model Weibulla zapewnia zadowalającą projekcję zarejestrowanych danych. W rezultacie tych analiz stwierdził, że prezentowany model niezawodności dobrze odpowiada zdarzeniom określonym na podstawie testów zmęczeniowych, a zaproponowane podejście połączenia rozkładu dystrybucji Weibulla z modelem czasu życia CIPS2008,

pozwała określić funkcję gęstości prawdopodobieństwa dla różnych warunków pracy badanego tranzystora. Stwierdził zatem, że zaproponowany zmodyfikowany model jest odpowiedni do celów procedury DfR.

Ze względu na tajemnicę własności intelektualnej know-how firmy wdrożeniowej, testy sprawdzające miały charakter badań jakościowych, a Doktorant wykonał je dla modułowego przekształtnika mocy. Testy te przedstawione są w rozdziale czwartym nazwanym Studium przypadku. Zakres przeprowadzonych tam badań sprawdzających obejmuje określenie warunków brzegowych dla prowadzonych badań, badania symulacyjne, projektowanie jak i wstępne oszacowanie niezawodności oraz testy laboratoryjne potwierdzające poprawność metody. Przeprowadzone badania i dyskusja wyników potwierdziły konieczność wykonania dokładnych testów wg. procedur kwalifikacyjnych dla każdego komponentu. Aby rozwiązać problem opłacalnego procesu kwalifikacji komponentów elektronicznych, Doktorant wprowadził koncepcję testu porównawczego zorientowanego na niezawodność. Przedstawił wyniki badań dowodząc, że odpowiednik układu zasilania, zaproponowany po wykonaniu modelu niezawodnościowego, ma wyższą niezawodność niż wcześniej stosowany układ.

Uzyskane wyniki doświadczalne, na przykładzie studium przypadku, potwierdziły więc poprawność przyjętej metody projektowania zorientowanego i pozytywny wpływ na poprawę niezawodności projektowanych modułowych układów zasilania specjalnego przeznaczenia.

5. Praktyczne zastosowanie uzyskanych wyników oraz perspektywy dalszego doskonalenia metody

Oceniana praca doktorska realizowana była na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w ramach programu doktoraty wdrożeniowe przy współpracy firmy TRUMPF Huettinger Sp. z o.o.. Tematyka pracy jest więc ściśle związana z potrzebami ww. firmy. Taki sposób realizacja badań nad rozprawą doktorską wspierany jest w środowisku naukowym. Z dużą pewnością gwarantuje on, że wyniki prac będą implementowane, a w przypadku pozytywnych efektów, metodyka będzie stale rozwijana.

Doktorant opisał to obszernie, trafnie identyfikując w rozdziale 5.2 obszary spodziewanych przyszłych badań, a w rozdziale 5.3 przyszłe prace związane ze zmodyfikowaną procedurą projektowania niezawodności. Na uwagę zasługuje m.in. identyfikacja mechanizmów degradacji w nowych generacjach półprzewodników mocy i urządzeń optoelektronicznych, standaryzacja procesów starzenia i rozwój układów energoelektronicznych o strukturze modułowej. Doktorant przewiduje opracowanie modeli niezawodności dla krytycznych komponentów, wykonanie dedykowanych narzędzi i procedur pomiarowych do przeprowadzenia powtarzalnych testów oraz zaprojektowanie procedur dla testów porównawczych.

6. Uwagi problemowe i szczegółowe

Omawiany w rozprawie problem niezawodności, jest szczególnie istotny podczas realizacji prac wdrożeniowych, a zwłaszcza podczas uruchamiania produkcji urządzeń.

Zastosowana metodyka i uzyskane rezultaty są bardzo inspirujące, stąd nasuwają się różne ogólniejsze pytania, dla których sugestią były przyjęte w treści rozprawy rozważania a przykładowe pytania są następujące:

1. W jaki sposób firmy radzą sobie z pokonaniem problemów towarzyszących tzw. wiekowi niemowlęcemu. Jak można oszacować czas trwania takiego okresu dla układów zasilania specjalnego przeznaczenia?
2. W układach przekształtnikowych stosuje się różne metody kontroli zmiennych stanu i parametrów sterowania. W jakim stopniu są one wykorzystywane w układach bieżącej oceny niezawodności i jakie krytyczne wielkości są obserwowane a układach zasilania specjalnego przeznaczenia?
3. W jakim stopniu nieliniowy charakter obciążenia generatorów plazmy wpływa destrukcyjnie na niezawodność układów zasilania specjalnego przeznaczenia?
4. Czy dysponuje Pan szacowaniem współczynnika λ dla transformatora średniej częstotliwości (rys. 47, str. 108).

Pod względem redakcyjnym praca przygotowana jest bardzo starannie. Dzięki logicznemu układowi treści studiuję się ją z zaciekawieniem. Trochę zakłóca to pewna maniera stosowania bardzo dużej liczby skrótów, która utrudnia czytanie i wymaga stałego sprawdzania znaczenia skrótów.

Inne uwagi mają cechy uchybień, których zgłoszenie ma charakter drobnych uwag edycyjnych. Do takich uwag należą:

- str.47, rysunek 14 - brak oznaczeń na osiach;
- str.54, rys.16 opisy rysunków a) i b) są odwrotnie przyporządkowane;
- str. 80, Wzór 13 określa raczej symulator temperatury a nie estymator;
- str. 97, rys.42, brak interpretacji rysunków.

7. Ocena rozprawy

Oceniana praca spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Opisane osiągnięcia stanowią dużą wartość merytoryczną. Za szczególnie istotne uznaję między innymi:

- Opracowanie zmodyfikowanej procedury projektowania zorientowanego na niezawodność, charakteryzującej się zwiększoną integracją z procesem technologicznym, a w konsekwencji pozwalającej na ograniczenie liczby testów;
- Potwierdzenie słuszności opracowanej metodyki projektowanie niezawodnościowego poprzez opracowanie modeli probabilistycznych i identyfikację parametrów tych modeli dla badanego układu;
- Opracowanie i wykonanie specjalistycznego stanowiska do badań przyspieszonego czasu życia tranzystora MOSFET SiC w obudowie SOT-227B wraz z jego oprogramowaniem;
- Opracowanie metodyki testów porównawczych projektowania zorientowanego na niezawodność;
- Zaproponowanie sprzętowo programowego rozwiązania pozwalającego na zwiększenie niezawodności przekształtnika specjalnego przeznaczenia;

- Wprowadzenie koncepcji zorientowanego na niezawodność testu porównawczego, umożliwiającego zastosowanie efektywnego kosztowo procesu kwalifikacji komponentów elektronicznych.

Wysoko oceniam biegłość Doktoranta w realizacji badań niezawodnościowych testów laboratoryjnych, które wykonał On w specjalizowanym laboratorium firmy TRUMPF Huettinger Sp. z o.o.. Podczas ich realizacji wykazał się umiejętnością przygotowania stanowisk do badań, opracowania metodyki testów, ich przeprowadzenia i wykonania prac analitycznych.

Uwzględniając oceniane aspekty rozprawy i biorąc pod uwagę wymienione najważniejsze osiągnięcia uznaję, że teza rozprawy została w zupełności uzasadniona a cele pracy zostały spełnione.

8. Podsumowanie i wniosek końcowy

Na podstawie przedstawionej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Bąby stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w **dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika** oraz szczegółową wiedzą w zakresie zwiększania niezawodności przekształtników energoelektronicznych specjalnego przeznaczenia. Dowiódł posiadania umiejętności stosowania różnych metod badawczych. Wykazał, że potrafi poprawnie formułować problem badawczy i twórczo prowadzić badania, interpretować uzyskane wyniki i formułować własne wnioski. Świadczy to o posiadaniu wysokich kwalifikacji i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgr inż. Sebastiana Bąby uznać za istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Bąby do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej.



