

Białystok, 22 stycznia 2022 r.

Prof. dr hab. inż. Andrzej Sikorski  
Katedra Elektrotechniki, Energoelektroniki i Elektroenergetyki  
Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej  
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok

*Ocena rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sebastiana Bąby pt.:*

***"Zwiększenie niezawodność przekształtników  
energoelektronicznych specjalnego przeznaczenia" (Reliability  
Improvement of High Performance Power Supplies)***

(zlecenie z dnia 24.11.2021 r., na podstawie Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej z dnia 23 listopada 2021 r.)

## **1. Ogólna charakterystyka rozprawy, przedmiot i cel rozprawy**

Przekształtniki energoelektroniczne znalazły zastosowanie praktycznie w każdej technicznej działalności człowieka. Obszary zastosowań energoelektroniki rozszerzają się nie tylko na w obszary decydujące o jakości życia, ale również na obszary decydujący o jego bezpieczeństwie. Stąd w naturalny sposób, zwłaszcza w ostatnim dziesięcioleciu, pojawiła się konieczność zadbania o niezawodność urządzeń energoelektronicznych. W niniejszej rozprawie doktorskiej skupiono się na niszowym, ale odpowiedzialnym za skomplikowany proces elektrochemiczny, zastosowaniem zasilaczy energoelektronicznych w systemach do obróbki plazmowej. W pracy przedstawiono główne typy procesów i systemów obróbki plazmowej, oraz topologie przekształtników, które mogą być stosowane w takich systemach. Technologia plazmowa wykorzystywana jest między innymi w produkcji układów scalonych, płaskich ekranów czy też paneli fotowoltaicznych. Praca zasilacza w systemie plazmowym wymaga między innymi zdolności do wytrzymywania i gaszenia łuku, odporności na bardzo wysokie  $du/dt$  w napięciu wyjściowym, zdolności do szybkiej regulacji mocy wyjściowej i wyłączania prądów zwarciovych. Każda usterka lub niepożądane wyłączenie zasilacza przekształtnikowego może pogorszyć jakość wytwarzanych warstw, powodując wysokie straty finansowe, związane z marnotrawstwem przetworzonych dóbr pośrednich i czasu przeznaczanego na przywrócenie pracy linii produkcyjnej. Wyjaśnia to wysokie wymagania dotyczące niezawodności i jakości dla wszystkich urządzeń stosowanych w przemyśle obróbki plazmowej - zwłaszcza zasilaczy przekształtnikowych.



Realizacja konstrukcji urządzenia zorientowanej na niezawodność wiąże się z szeregiem problemów takich jak: brak danych niezawodnościowych dostarczanych przez producentów, brak łatwo dostępnych modeli niezawodności lub danych niezawodnościowych dla krytycznych komponentów, które mogą być dalej wykorzystywane w ocenie niezawodności na poziomie komponentów lub kompletnego urządzenia, brak łatwo dostępnych modeli elektrycznych lub elektrotermicznych przyrządów półprzewodnikowych, które mogą być dalej wykorzystywane w badaniach symulacyjnych, dokładność i powtarzalność technik pomiarowych stosowanych do pomiaru poziomu przeciążeń krytycznych elementów pracujących w zmontowanym zasilaczu, brak przyjaznych dla przemysłu, uproszczonych procedur testowych dla testów porównawczych zorientowanych na niezawodność. Wyżej wymienione niedogodności muszą być rozwiązane, aby pomyślnie wdrożyć proponowaną przez Autora procedurę projektowania zorientowanego na niezawodność (*Design for Reliability* – DfR).

Autor uznał, że procedury DfR proponowane w literaturze, opierające się na kompleksowych badaniach symulacyjnych i modelowaniu elektrotermicznym, są drogie i czasochłonne. W związku z tym nie nadają się do projektów o krótkiej żywotności, zwłaszcza ze względu na krótki czas na przygotowanie prototypu. Doktorant zaproponował procedurę DfR, która składa się z następujących kroków: definicja warunków brzegowych, etap symulacji, etap projektowania i wstępna ocena niezawodności, badania laboratoryjne potwierdzające wybraną koncepcję, wzrost niezawodności, demonstracja niezawodności, utrzymanie niezawodności.

Główną różnicą między podejściem klasycznym, a proponowanym przez Autora jest wyższa integracja procedury DfR z etapami pracy inżynierskiej, pozwalająca na uzyskanie potwierdzenia prawidłowości koncepcji lub w pełni funkcjonalny prototyp dostępny wcześniej. Tak więc zmodyfikowana procedura koncentruje się raczej na badaniach laboratoryjnych niż na rozszerzonej symulacji elektrotermicznej. Zaproponowany przez Autora model niezawodności może być dalej wykorzystany do oceny niezawodności w zmodyfikowanej procedurze DfR za pomocą m.in. oszacowania okresu użytkowania, wskaźnika awaryjności, średniego czasu między awariami lub średniego czasu do awarii.

Autor uzasadniał, że za większość awarii zasilaczy odpowiadają uszkodzenia półprzewodnikowych elementów mocy, a w odniesieniu do omawianego zasilacza plazmowego - tranzystory MOSFET SiC w obudowie SOT – 227B. Do wykonania przyspieszonego testu żywotności Autor zaproponował przeprowadzenie testu cyklicznego obciążania mocą wydzielaną w tranzystorze w obszarze jego pracy liniowej. Wyniki tak przeprowadzonego testu, zdaniem Autora, odpowiadają awarii tranzystora przypominającej zmęczenie. Zostało to potwierdzone obszerną analizą poawaryjną (obrazowanie RTG, mikroskopia skaningowa, dekapsulacja). Wyniki badań posłużyły do opracowania modelu niezawodnościowego, który umożliwił wyznaczenie rozkładu gęstości prawdopodobieństwa tranzystora SiC MOSFET w obudowie SOT - 227B, dla określonych warunków pracy. Na jego podstawie można określić użyteczny czas życia tranzystora, a co za tym idzie – okres, po którym należałoby przeprowadzić konserwację przekształtnika specjalnego przeznaczenia.

Można więc stwierdzić, że w recenzowanej rozprawie Autor podjął aktualny, niebanalny z poznawczego punktu widzenia problem badawczy, który ma istotne



znaczenie praktyczne i który nie został dotychczas rozwiązany w sposób ostateczny i jednoznaczny.

Rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Bąbła zawiera 153 strony i została zredagowana w 5 rozdziałach. Zdaniem recenzenta przyjęty przez Autora układ treści rozprawy jest wystarczająco jasny i klarowny, podział rozprawy na rozdziały - prawidłowy, a rozdział wstępny i końcowy zawierają właściwe treści. Na końcu rozprawy Autor zamieścił treści 8 artykułów (7 współautorskich i 1 autorski) opublikowanych w czasopiśmie i w materiałach konferencji międzynarodowych.

Rozdział 1 recenzowanej rozprawy („*Introduction*”), oprócz opisu motywacji do podjęcia badań i prezentacji tezy rozprawy doktorskiej, zawiera również przegląd tematyki badawczej, w której są umiejscowione problemy podjęte przez Autora i opisane w rozprawie. W tym rozdziale Autor szeroko przedstawił główne rodzaje procesów z wykorzystaniem plazmy oraz ich zastosowania we współczesnym przemyśle. Procesy generowania plazmy o różnych właściwościach mogą odbywać się z wykorzystaniem napięcia/prądu o różnym kształcie i częstotliwości przebiegu. Stąd zależnie od aplikacji różne topologie przekształtników są wykorzystywane. Ponadto Autor wskazuje, dlaczego wysoka niezawodność przekształtnika jest jednym z kluczowych wymagań jakie musi spełniać nowoczesny przekształtnik do zastosowań plazmowych.

W kluczowym, dla wyników o charakterze teoretycznym, rozdziale 2 wprowadzono definicję niezawodności i porównano strategie poprawy niezawodności nowoczesnych przekształtników energoelektronicznych. Analiza przedstawiona w tym rozdziale wskazuje, że projektowanie zorientowane na niezawodność (DfR) jest najbardziej odpowiednim podejściem do urządzeń energoelektronicznych o krótkim okresie użytkowania. Ponadto przedstawiono zmodyfikowaną procedurę DfR dla projektów o krótkiej żywotności, typową dla przemysłu z wykorzystaniem plazmy. Rozważania kończą się uzasadnieniem, dlaczego badanie niezawodności zasilacza koncentrują się na badaniach niezawodności tranzystorów MOSFET SiC.

Szczególne znaczenie praktyczne dla pracy posiada rozdział 3. Zawarto w nim szczegółowy opis metodologii wykonania testu niezawodności tranzystora MOSFET SiC w obudowie SOT – 227B pod kątem trybu awarii przypominającej zmęczenie. Rozdział ten zaczyna się od przygotowania przyspieszonego testu żywotności, następnie zawiera jego realizację i analizę wyników, a kończy się badaniami poawaryjnymi tranzystorów MOSFET SiC. Rozważania teoretyczne kończą się utworzeniem właściwego rozkładu matematycznego, który mógłby być dalej wykorzystywany jako model niezawodności dla testowanych tranzystorów MOSFET SiC (wybrano rozkład Weibulla). Na szczególną uwagę zasługuje szeroki zakres badań tranzystorów po awarii, przy czym ich przydatność w pracy Doktoranta jest niewielka (wyniki mogłyby być przydatne raczej dla producentów elementów półprzewodnikowych).

W rozdziale 4 przedstawiono analizę studium przypadku zmodyfikowanej procedury DfR. Jako przykład wykorzystano przekształtnik obniżający napięcie, na którym przetestowano kolejne etapy procedury: definicję warunków brzegowych, etap symulacji, etap projektowania i wstępnej oceny niezawodności oraz testy

laboratoryjne. Przykładowo wyznaczono użyteczną żywotności i awaryjności, a także koncepcję utrzymania niezawodności.

Wnioski i podsumowanie do tej pracy znajdują się w rozdziale 5. Jako załączniki I - VIII dołączono artykuły i referaty konferencyjne, w których opublikowano prezentowane badania.

## 2. Ocena merytoryczna i wykaz najważniejszych osiągnięć Autora

Rozprawa stanowi oryginalne i kompletne rozwiązanie zagadnień badawczych, projektowych i konstrukcyjnych związanych z realizacją procedury zwiększenia niezawodności przekształtników energoelektronicznych pracujących jako zasilacze systemów do obróbki plazmowej. Należy podkreślić, że praca została wykonana w pełnym cyklu badawczym, tj. od opracowania teoretycznego, poprzez analizę i testy symulacyjne do zbudowania stanowiska laboratoryjnego. Autor zaproponował weryfikację następującej hipotezy badawczej:

„możliwe jest opracowanie modelu probabilistycznego, opisującego prawdopodobieństwo awarii tranzystora MOSFET z węgliku krzemu (SiC), który umożliwi ocenę niezawodności nowo opracowanego zasilacza o wysokiej wydajności do obróbki plazmowej, zgodnie ze zmodyfikowaną procedurą projektowania DfR (Resigne for Reliability)”.

Sformułowana teza, jakkolwiek bardzo szczegółowa, obejmująca tylko jeden element systemu, oddaje bardzo szeroki zakres wykonanych pracy o charakterze naukowym i praktycznym. Aby udowodnić tę tezę, zdefiniowano następujące cele:

- 1) analiza warunków pracy zasilaczy w systemach plazmowych i topologii przekształtników używane w takich aplikacjach,
- 2) propozycja zmodyfikowanej procedury DfR, odpowiedniej do opracowania nowych zasilaczy,
- 3) zaprojektowanie i uruchomienie przyspieszonego testu żywotności (Accelerated Lifetime Test - ALT) SiC MOSFET w obudowie SOT - 227B,
- 4) identyfikacja modelu niezawodnościowego na podstawie wyników przyspieszonego testu żywotności.

Za oryginalne i cenne własne osiągnięcia o charakterze naukowym uważam następujące wyniki rozprawy:

- 1) opracowanie metodologii przyspieszonego testu żywotności (ALT) i cyklicznych zmian mocy obciążenia (PC) tranzystorów MOSFET SiC w obudowie SOT - 227B,
- 2) opracowanie testu porównawczego zorientowanego na niezawodność dla układów elektronicznych (sterowniki MOSFET),
- 3) opracowanie wieloparametrowego modelu niezawodnościowego MOSFET-u mocy SiC w obudowie SOT-227B.
- 4) opracowanie zmodyfikowanej procedury projektowania zorientowanego na niezawodność (DfR), zoptymalizowanej pod projekty układów energoelektronicznych o krótkiej żywotności,

- 5) koncepcja utrzymania niezawodności, jako kluczowy aspekt metodologii DfR,
- 6) opracowanie algorytmu sterowania zorientowanego na niezawodność i projekt obwodu elektronicznego wsparcie proponowanego algorytmu.

Dopełnienie osiągnięć o charakterze naukowy stanowią osiągnięcia o charakterze inżyniersko- technicznym:

- 1) realizacja stanowiska testowego na dużą skalę do cyklicznych zmian obciążenia mocą tranzystorów MOSFET SiC,
- 2) sposób wykrywania awarii tranzystorów MOSFET SiC, odpowiedni do zastosowania w przyspieszonym teście żywotności,
- 3) opracowanie układu sterowników bramkowych tranzystorów MOSFET SiC poddanych testowi cyklicznych obciążeń mocą.

Należy z uznaniem podkreślić, że Autor zaproponował modyfikację algorytmu projektowania zorientowanego na niezawodność urządzeń energoelektronicznych o krótkim okresie użytkowania. Zmodernizował i przeprowadził złożone testy niezawodności tranzystora MOSFET SiC w obudowie SOT – 227B w celu wymuszenia awarii przypominającej zmęczenie. Uruchomienie takiego układu, przeprowadzenie badań symulacyjnych i doświadczalnych, a także opracowanie teoretyczne badanych zagadnień dowodzi, że Autor posiadał ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika. Autor rozwiązał samodzielnie trudne zagadnienie naukowe, odpowiednio sformułował założenia, wybrał i zastosował właściwe metody teoretyczne i doświadczalne oraz udokumentował to wynikami zamieszczonymi w rozprawie.

Doktorant podjął problem o niewątpliwie istotnym znaczeniu praktycznym i wniósł oryginalny wkład intelektualny w postaci zmodyfikowanego algorytmu projektowania zorientowanego na niezawodność urządzeń energoelektronicznych o krótkim okresie użytkowania. Szczególne znaczenie praktyczne posiada zaprezentowany szczegółowy opis metodologii i wykonanie testu niezawodności tranzystora MOSFET SiC w obudowie SOT – 227B w celu wymuszenia awarii przypominającej zmęczenie. Przeprowadził przykładowe studium przypadku z wykorzystaniem przekształtnika obniżającego napięcie, na którym przetestował kolejne etapy zaproponowanej procedury oceny niezawodności oraz testy laboratoryjne. Ponadto wyznaczył użyteczną żywotność i awaryjność, a także koncepcję utrzymania niezawodności testowanego przekształtnika.

W pracy można wyróżnić następujące obszary badawcze, które niestety są rozłączne. Główny obszar dotyczy prac teoretyczno-doświadczalnych wykonanych na bazie przekształtnika – zasilacza systemu plazmowego, produktu firmy TRUMPF Huettinger. Nie podano żadnych wyników działania opracowanego algorytmu i awaryjności określonej na podstawie zaproponowanej procedury i rzeczywistego zasilacza. Przykład zastosowania opracowanego algorytmu (studium przypadku) przeprowadzono na prostym zasilaczu DC/DC obniżającym napięcie, który nie ma nic wspólnego z realnym produktem, dla którego zbudowano algorytm określania niezawodności oraz podano uzyskane wyniki działania algorytmu. W obu przypadkach brak jakiegokolwiek walidacji uzyskanych wyników rzeczywistymi danymi

dotyczącymi awaryjności tych przekształtników w zastosowaniach praktycznych. Budzi to pewien niedosyt i niepokój, czy przyjęte daleko idące uproszczenie przy budowie algorytmu są słuszne, a uzyskane wyniki adekwatne do rzeczywistości.

Ogólna ocena sposobu i jakości rozwiązania sformułowanych zadań badawczych jest niewątpliwie pozytywna. Na uwagę zasługuje również fakt, że analizy teoretyczne i zaproponowany algorytm zostały poparte wszechstronnymi, dobrze udokumentowanymi w rozprawie testami laboratoryjnymi. Jednakże, jak w każdej pracy naukowej, niektóre problemy i wątki nie zostały w rozprawie opisane w sposób dostatecznie dogłębny, przejrzysty i wyczerpujący. Bardziej szczegółowa lista elementów, które budzą pewne wątpliwości i komentarze recenzenta, została przedstawiona w kolejnym rozdziale recenzji.

### 3. Uwagi dyskusyjne i komentarze do rozprawy

Lektura rozprawy nasunęła szereg wątpliwości nie umniejszającym osiągnięciom Autora, przedstawionych poniżej i wymagających ustosunkowania się do nich Autora.

1. Ostatnim etapem zmodyfikowanej procedury DfR jest demonstracja niezawodności produktu końcowego. Z tekstu rozprawy wynika, że jest to zweryfikowane na podstawie przyspieszonego testu żywotności (ALT) tranzystora MOSFET, który wykonano w niedokładnie symulowanych warunkach jego pracy. Czy takie podejście jest wystarczające, aby pozytywnie zaopiniować niezawodność skomplikowanego produktu? Podobna wątpliwość dotyczy realizacja części procedury określonej jako „utrzymania niezawodności” (reliability maintenance).
2. Autor podaje, że łączniki półprzewodnikowe są przyczyną ponad 41,2% awarii urządzeń z grupy zasilaczy plazmowych. W związku z tym, prowadził badania nad opracowaniem modelu niezawodności na podstawie badania MOSFET SiC w obudowie SOT – 227B. Jednakże nawet uszkodzenia tranzystora mogą nastąpić ze względu na szereg przeciążeń opisanych m.i. w tabeli 1 (str.52). Jak Autor uzasadni, że zaproponowany sposób przeprowadzenia przyspieszonego testu żywotności (ALT), jest reprezentatywny dla testowania tranzystora i dalej całego urządzenia oraz wydania opinii o jego niezawodności?
3. Autor rozważa 3 rodzaje cyklicznej pracy tranzystorów podczas przyspieszonego testu żywotności: cykliczne zmiany temperatury (TC), mocy (PC) i prądu (CC). W rzeczywistych warunkach występują wszystkie wymienione zmiany w tym również przy różnych wypełnieniach ( $t_{ON}/T$ ). Jak Autor wyjaśni wybór testu PC jako reprezentatywną metodę wydzielenia strat podczas pracy (w zakresie liniowym działania tranzystora) w trakcie testów i oceny tranzystorów?
4. Autor eliminuje niektóre sposoby testowania uszkodzeń ze względu na chęć uproszczenia, cenę i czas wykonania testów. W ten sposób nie posiada wiedzy o rzeczywistych wynikach. Nadrzędnym celem powinno być uzyskanie bliskich rzeczywistości wyników i to powinno decydować o wyborze sposobu testowania. Czym Autor uzasadnia taki tok postępowania?



5. Niepokój, co do wartości wyników, budzą stwierdzenia „Producent MOSFET-ów zasugerował, że strategia testowania jest nieprawidłowa”, „...praca w trybie liniowym może skrócić rzeczywisty czas użytkowania testowanych urządzeń”, „...jednak producent sklasyfikowali swój ALT jako poufny, w związku z czym ich procedura testowa ani wyniki testów nie będą omawiane w tej pracy”. Rodzi się pytanie jak zweryfikować wyniki uzyskane przez Autora?
6. Wydaje się, że ciągły pomiar (estymacja) temperatury złącza  $T_j$  ma kluczowe znaczenie dla oceny niezawodności podczas testu ALT. Jak jest to dokładnie zrealizowane w proponowanej procedurze?
7. Jak wyglądają przebiegi podczas jednego cyklu obciążenia w czasie przyspieszonego cyklu żywotności (ALT) ( $u_{STER}$ ,  $I_{DS}$ ,  $u_{DS}$ ,  $T_{jMIN}$ ,  $T_{jMAX}$ , wypełnienie, czas cyklu).
8. Jaki jest powód, że w analizowanym w rozdziale 4 studium przypadku w przekształtniku obniżającym napięcie łącznik półprzewodnikowy FET1 (z którego wykorzystywany jest tranzystor) ma dłuższy czas przewidywanej pracy (ok. 48 lat) niż łącznik półprzewodnikowy FET2 (z którego wykorzystywana jest dioda) z przewidywanym czasem pracy ok. 6 lat?

Ponadto tekst rozprawy zawiera niżej przedstawione drobne uchybienia.

1. Nieczytelne skale na osiach w oscylogramach zamieszczonych w pracy.
2. Nagminne używanie przez Autora skrótów (92 skróty) zdecydowanie utrudnia i wydłuża czytanie pracy ze względu na konieczność odszukiwania znaczenia kolejnych oznaczeń. Część z tych skrótów można by pominąć gdyż są bardzo rzadko używane np. w pracy użyto 39 (z 92) skrótów tylko 1 lub 2 razy.

#### 4. Podsumowanie oceny rozprawy doktorskiej

Doktorant podjął problem o niewątpliwie istotnym znaczeniu praktycznym i wnosi oryginalny wkład intelektualny w postaci zmodyfikowanego algorytmu projektowania zorientowanego na niezawodność urządzeń energoelektronicznych o krótkim okresie użytkowania. Szczególne znaczenie praktyczne posiada zaprezentowany szczegółowy opis metodologii i wykonanie testu niezawodności tranzystora MOSFET SiC w obudowie SOT – 227B w celu wymuszenia awarii przypominającej zmęczenie. Przeprowadził przykładowe studium przypadku z wykorzystaniem przekształtnika obniżającego napięcie, na którym przetestował kolejne etapy zaproponowanej procedury oceny niezawodności oraz testy laboratoryjne. Ponadto wyznaczył użyteczną żywotności i awaryjności, a także koncepcję utrzymania niezawodności testowanego przekształtnika.

Zdaniem recenzenta, Autor udowodnił sformułowaną na str. 13 tezę rozprawy. Z dużą starannością przeprowadził proces analizy i syntezy niezawodności skomplikowanej struktury zasilacza systemu plazmowego.

Opiniowana rozprawa mgr. inż. Sebastiana Bąbla pt.: "Zwiększenie niezawodność przekształtników energoelektronicznych specjalnego przeznaczenia" (Reliability Improvement of High Performance Power Supplies) stanowi oryginalne

rozwiązanie technicznie nietrywialnego problemu badawczego. Świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Autora w zakresie energoelektroniki i sterowania. Znaczna część wyników zaprezentowanych w pracy, była referowana na krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych oraz publikowana w recenzowanych materiałach konferencyjnych; zostały więc pozytywnie zweryfikowane przez szerokie grono specjalistów, reprezentujących kilka dyscyplin nauk inżynierjno-technicznych. Autor w załącznikach do pracy zamieścił teksty 8 artykułów opublikowanych w czasopiśmie o bardzo wysokich współczynnikach wpływu (IF), oraz materiałach znaczących konferencjach międzynarodowych. W pracy doktorskiej znajdują się praktycznie wszystkie najważniejsze merytoryczne treści pochodzące z artykułów współautorskich i jednego artykułu autorskiego, gdzie jako współautorzy występują promotor i promotor pomocniczy, a także 7 innych osób w tym z Politechniki Warszawskiej, firmy Triumf i z zagranicy. W dokumentacji znajdują się oświadczenia współautorów o ich wkładzie w tych 7 artykułów.

Stwierdzam, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.).

**Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Bąby do publicznej obrony przed Radą Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej.**

