

prof. dr hab. inż. Ryszard Strzelecki



## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**pt. „Analiza pracy przekształtnika DC/DC o topologii DAB z filtrem prądu oraz synteza układu regulacji w przypadku modulacji z pojedynczym przesunięciem fazowym”**

autorstwa mgr inż. **Michała Gierczyńskiego**

wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Michała Malinowskiego z dnia 07.10.2020 r.

### 1. UMIEJSCOWIENIE, AKTUALNOŚĆ, TEZA, CEL I ZAKRES ROZPRAWY

Zagadnienia związane z budową (osiąganie dużych gęstości mocy kW/kg lub kW/dcm<sup>3</sup>), sterowaniem (wysoka dynamika, sprawność, techniki przełączania, regulacja napięć w szerokim zakresie, łączenie szeregowo i równoległe), różnymi rozwiązaniami (jedno-, trój- lub wielofazowymi, wielopoziomowymi), a także licznymi aplikacjami (np. ładowarki, inteligentne transformatory, mikro-sieci DC) sprawiają, że szeroka tematyka układów DAB jest nadal bardzo aktualna i silnie eksponowana w publikacjach specjalistycznych. W tym kontekście, poszukiwania uproszczonych metod projektowania układów regulacji oraz algorytmów poprawiających właściwości przekształtników DAB, stanowią ważny obszar i kierunek ich rozwoju. Inżynierskie metod analizy i syntezy, wykorzystujące względnie prosty aparat matematyczny i podstawową wiedzę z zakresu teorii regulacji, znacząco ułatwiają i przyspieszają wdrożenie układów DAB. **Tej aktualnej i ważnej problematyki dotyczy również recenzowana rozprawa doktorska, w której autor w pełni udowodnił tezę**, że „Zaproponowana metoda projektowania układu regulacji, z autorskim algorytmem kompensacji składowej przejściowej w prądzie transformatora, dla przekształtnika DC/DC o topologii DAB z filtrem prądu zapewnia uzyskanie pożądaných właściwości regulacyjnych w każdych warunkach pracy, także w przypadku ograniczonej dokładności identyfikacji obiektu sterowania”. Dowód tej tezy Autor przeprowadził poprzez realizację celu i zadań szczegółowych rozprawy przedstawionych w podrozdziale 1.3 (s.17).

**Sformułowany i następnie zrealizowany przez Autora cel rozprawy uważam za bardzo ważny zarówno ze względów poznawczych jak i aplikacyjnych.** Mam jednak wątpliwości dotyczące trybu dokonanego poszczególnych zadań prowadzących do realizacji celu ogólnego. Ponadto, wybór „a priori” konkretnych typów tranzystorów SiC MOSFET i kontrolera DSP do realizacji zadania związanego eksperymentem laboratoryjnym (str.18) jest przede wszystkim działaniem konstrukcyjno-projektowym. Wskazanie na konkretne elementy, których właściwości nie są przedmiotem badań w żaden sposób, trudno powiązać z naukowym charakterem rozprawy doktorskiej.

Rozprawa licząca 123 strony zawiera 6 rozdziałów łącznie ze wstępem (rozdział 1) i podsumowaniem (rozdział 6), obszerną bibliografię zawierającą 75 pozycji, spis symboli i skrótów, streszczenie w językach polskim i angielskim, a także spis rysunków i tablic. W materiale zawartym w rozdziale 2 przedstawiono podstawowe informacje dotyczące pracy przekształtnika DAB w stanie ustalonym oraz wyjaśniono zasadność dodatkowych, wejściowego i wyjściowego filtrów prądu. Omówiono również charakterystyki zaprojektowanych filtrów i zweryfikowano poprawność przedstawionej metody analizy za pomocą modelu symulacyjnego. Rozdział 3 poświęcono z kolei autorskiej modyfikacji algorytmu modulacji z przesunięciem fa-

zowym, polegającej na określonej zmianie chwil przełączeń tranzystorów mostków układu DAB, pozwalającej wyeliminować w stanach dynamicznych składową przejściową prądu transformatora. Szczególną zaletą opracowanej modyfikacji względem analogicznych rozwiązań jest prostota i odporność na błędy pomiarowe. Uwzględniając rezultaty rozdziałów 2 i 3, w następnym rozdziale 4 zaproponowano analityczną – częstotliwościową metodę modelowania dynamiki pętli regulacji prądu i napięcia. Na podstawie opracowanych modeli przeanalizowano przede wszystkim wpływ nastaw na właściwości dynamiczne regulatorów. Szczególną uwagę zwrócono przy tym na zachowanie odpowiednich zapasów wzmocnienia oraz fazy. Zasadność i adekwatność takiego modelowania potwierdzono odpowiednimi symulacjami. Potwierdziły to także wyniki badań eksperymentalnych przedstawione w rozdziale 5

**Całą rozprawę można podsumować jako udaną próbę całościowego podejścia do praktycznego projektowania i doboru nastaw układu regulacji i kształtowania procesów przejściowych w izolowanym przekształtniku DC/DC o topologii DAB.**

## **2. OCENA OGÓLNA ROZPRAWY**

Rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań teoretycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych układu DAB z filtrami wejściowymi i wyjściowymi, obejmujące w szczególności analizę oraz weryfikację działania układu z opracowaną modyfikacją algorytmu sterowania w stanach dynamicznych zmian wartości zadanej, a także dobór nastaw regulatorów prostą metodą częstotliwościową. Do jej najważniejszych rezultatów oraz istotnych osiągnięć jej autora zaliczam przy tym:

- Opracowanie bardzo prostego w implementacji i odpornego na zakłócenia algorytmu kompensacji składowej przejściowej prądu transformatora, pozwalającego na eliminację negatywnych zjawisk zachodzących w stanach dynamicznych.
- Opracowanie spójnego i prostego sposobu opisu układu, pozwalającego na analizę oraz strojenie regulatorów w dziedzinie częstotliwościowej dzięki wprowadzeniu liniowego członu opóźniającego związanego z impulsowym charakterem obiektu regulacji – przekształtnikiem DAB
- Propozycję metodologii wyznaczania nastaw regulatorów prądu i napięcia z wykorzystaniem prostych narzędzi teorii regulacji, pozwalającej na obliczenie nastaw na podstawie wartości nominalnych zastosowanych elementów dzięki zapewnieniu odpowiedniej krzepkości pętli regulacji,
- Opracowanie modeli symulacyjnych oraz wykonanie wszechstronnych testów, pozwalających na wstępną weryfikację poszczególnych etapów analizy teoretycznej.
- Implementacja proponowanych algorytmów na platformie mikroprocesorowej oraz wykonanie badań eksperymentalnych potwierdzających wyniki teoretyczne i skuteczność zaproponowanych rozwiązań

W pewnych fragmentach rozprawa jest jednak zbyt drobiazgową. Niektóre z fragmentów, bez szkody dla treści zasadniczej, można pominąć lub skrócić. W szczególności dotyczy to rozdziału 5, który jednocześnie zyskałby na przedstawieniu większej liczby wyników badań eksperymentalnych lub/i schematu stanowiska badawczego. Również niektóre symbole stosowane w rozprawie nie są od razu jasne. Te drobne uwagi, ani też uwagi merytoryczne przedstawione w kolejnym punkcie recenzji, nie deprecjonują wartości naukowej rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Gierczyńskiego, wnoszącej cenny wkład w rozwój teorii i praktyki współczesnej energoelektroniki.

**Podsumowując stwierdzam, że przyjęte przez doktoranta teza rozprawy została całkowicie potwierdzona, a wynikające z niej zadania w pełni zrealizowane. Uzasadnione są również wnioski z badań. Praca została zredagowana w sposób poprawny, zawiera istotne wyniki badań i osiągnięcia aplikacyjne, uzyskane właściwymi metodami i narzędziami badawczymi. Autor wykazał się przy tym bardzo dobrą znajomością problematyki rozprawy.**

### 3. UWAGI KRYTYCZNE

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Michała Gierczyńskiego pt. „Analiza pracy przekształtnika DC/DC o topologii DAB z filtrem prądu oraz synteza układu regulacji w przypadku modulacji z pojedynczym przesunięciem fazowym”, oprócz ogólnych zastrzeżeń, nasuwają się następujące uwagi krytyczne:

#### **Uwagi merytoryczne**

1. Trudno zgodzić się z autorem, że opracowany model w dziedzinie częstotliwości, w który wprowadzono liniowy obiekt regulacji zawierający opóźnienie, ma w pełni charakter nowatorski. Podobne modele stosowano np. w latach 60-70 XX w. do analizy dynamiki i doboru nastaw regulatorów napędów DC z przekształtnikami tyrystorowymi. Istotną kwestią jest oczywiście wartość opóźnienia, którą autor wyznaczył w sposób właściwy jako równą  $1,75$
2. Transformata biliniowa (4.1) polega na aproksymacji Padé funkcji eksponencjalnej  $z=\exp(-sT_s)$ . Im czas próbkowania  $T_s$  jest mniejszy oraz rozdzielczość przetworników A/D większa, tym ta aproksymacja jest dokładniejsza. W związku z tym powstają pytania:
  - czy były analizowane modele z czasem próbkowania innym (mniejszym) niż okres przełączania tranzystorów mostków DAB i jeśli tak to z jakim rezultatem?
  - dlaczego nie przeprowadzono syntezy układów regulacji w dziedzinie impulsowej za pomocą transformaty Z lub (co jeszcze lepiej) zmodyfikowanej transformaty  $Z(k,\varepsilon)$  (z uwagi na charakter impulsowo-ciągły układu DAB i jego sterownika)
  - czy analizowano wpływ rozdzielczości przetwarzania A/D na dokładność modelowania i oraz realizację sterownika układu DAB odniesioną do wymaganej precyzji sterowania
3. Teoretyczny wzór (3.6) dotyczy eliminacji procesu przejściowego w transformatorze poprzez przesunięcie korekcyjne dwóch zbczy napięcia w przypadku gdy rezystancja jest pomijalna. W związku z powyższym powstają dwa pytania:
  - czy jest możliwa eliminacja procesu przejściowego poprzez odpowiednie przesunięcie korekcyjne tylko jednego zbcza
  - jak znaczący jest wpływ rezystancji szeregowej na dokładność wzoru (3.6) w warunkach praktycznych z uwzględnieniem efektu naskórkowości (czy np. ustalono wymagania co do stosowanej licy)
4. Z tekstu rozprawy nie wynika czy zaproponowana eliminacja procesu przejściowego w transformatorze jest możliwa do zastosowania w przypadkach stosowania techniki ZVS dla tranzystorów układu DAB. Wskazany byłby również komentarz co do możliwości eliminacji procesów przejściowych w transformatorze w układach rezonansowych podobnych do typowych DAB.
5. W rozdziale 5 wskazane było przedstawienie stanowiska laboratoryjnego z wykonanym układem DAB (np. w postaci fotografii) oraz wyszczególnienie osiągniętych parametrów energetycznych, głównie sprawności dla różnych mocy oraz różnych współczynników dopasowania napięciowego  $ku$
6. Aprobata rezultatów rozprawy poprzez publikację wyników w specjalistycznych czasopismach i materiałach konferencyjnych jest połowiczna. W bibliografii rozprawy brakuje publikacji autora, mimo że dorobek ([https://www.isep.pw.edu.pl/index.php/zne/Sklad-osobowy/Pracownicy/\(prac\)/32053](https://www.isep.pw.edu.pl/index.php/zne/Sklad-osobowy/Pracownicy/(prac)/32053)) zawiera odpowiednie pozycje tematyczne.
7. Na str.13 autor pisze, że przekształtnik DC/DC w topologii DAB po raz pierwszy opisano w artykule prof. De Doncera w 1991 r. Wydaje się, że w tym miejscu rozprawy należało również wspomnieć o nieco wcześniejszym patencie USA 5,027,264 prof. De Doncera, a przede wszystkim wcześniejszych pracach i patentach prof. McMurray'a (1968 – patent USA 3,517,300 oraz 1971 – publikacja IEEE Tran. on IGA, vol.7, No.4) stanowiących podwaliny mostkowej topologii DAB

8. Na str. 27 , ostatni akapit, autor stwierdza, „...że otrzymane zależności spełniają zasadę zachowania energii, ...” . Po pierwsze trudno mówić, że równania matematyczne spełniają zasadę zachowania energii, która jest związana z procesami fizycznymi. Po drugie, równość prawej i lewej strony równania (2.17) tylko potwierdza, że w rozważaniach analitycznych przeprowadzono prawidłowo
9. Brak wystarczającego uzasadnienia przyjętej struktury biernego filtra wejściowego/wyjściowego (str. 32). W tym kontekście przyjęcie układu opisanego w rozprawie [6] i podręczniku [65] jest mało przekonujące. Np. znane są również rozwiązania w których w gałęzi poprzecznej dodaje się szeregowy obwód rezonansowy dostrojony do eliminowanej częstotliwości.
10. Z materiału rozdziału 4 w sposób jasny nie wynika, w jaki sposób i w którym miejscu odpowiednie modele uwzględniają szeregową indukcyjność zastępczą separującego transformatora w.cz. Niejasny jest również wpływ lub brak korekcji (3.6) na dynamikę modelowanego układu. Ponadto, rozdział 4 „przysłacza” ilością szczegółowych charakterystyk częstotliwościowych

#### **Uwagi szczegółowe (wybrane)**

1. Do oznaczania wartości średnich i skutecznych autor używa małych liter. Jest to nieco mylące choć zasadniczo nie utrudniające zrozumienia materiału rozprawy.
2. Korzystniejsze byłoby rozmieszczenie rys.2.4 i rys.2.5 w ten sposób, aby zapewnić możliwość jednoczesnego porównywania rysunków.
3. Rozprawa została napisana nieco rozwlekłe, choć przejrzyste, właściwym stylem i językiem.
4. Dla łatwiejszej interpretacji , na Rys.4.4 oraz Rys.4.5 należałoby zaznaczyć przyrosty  $\Delta_{1,2,3}$  występujące w zależnościach (3.5)
5. Na str. 46, drugi akapit jest „ ...na Rys.3.2b,d oraz Rys.3.2b,d.” Zdaniem recenzenta powinno być na Rys.3.4a,c oraz Rys.3.5a,c
6. Tabela 2.2 i Tabela 5.1 zasadniczo (z małymi wyjątkami) dublują informacje o parametrach badanego układu
7. W tytule pracy użyto frazy „... przekształtnika DC/DC o topologii DAB ...”, natomiast w tekście w różnych odmianach używane jest „... przekształtnik DC/DC w topologii DAB...” . Wydaje się, że właściwie jest „... o topologii ...”

#### **WNIOSEK KOŃCOWY**

- 1) Doktorant wykazał się dużą wiedzą i dobrym merytorycznym przygotowaniem do pracy badawczej oraz odpowiednimi umiejętnościami analitycznymi i eksperymentalnymi.
- 2) Rozprawa charakteryzuje się dobrym poziomem merytorycznym i należytych poziomem edytorskim.
- 3) Uzyskane w rozprawie wyniki, w przeważającej mierze zweryfikowane eksperymentalnie mają bardzo dużą wartość poznawczą, praktyczną i inspirującą do dalszych badań.

**Stwierdzam, że rozprawa doktorska magistra inżyniera Michała Gierczyńskiego** pt. „Analiza pracy przekształtnika DC/DC o topologii DAB z filtrem prądu oraz synteza układu regulacji w przypadku modulacji z pojedynczym przesunięciem fazowym” **spełnia kryteria i wymagania stawiane pracom doktorskim** w obowiązującej Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z dnia 21.06.2016, poz. 882) w zakresie dyscypliny elektrotechnika, zawartej całkowicie w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika wyszczególnianej w najnowszej klasyfikacji. **Tym samym wnoszę o przyjęcie i dopuszczenie w/w rozprawy do publicznej obrony.**

Uwzględniając wysoki poziom merytoryczny oraz znaczenie przedstawionych osiągnięć autora w obszarze energoelektroniki, **wnioskuję także o wyróżnienie rozprawy.**