

Gdynia, 2021-08-26

prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki
Katedra Elektroniki Morskiej
Uniwersytet Morski w Gdyni

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEE

Wpłynęło dnia 26. 08. 2021
Zarejestrowano pod nr
Podpis gm

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Wojciecha Kołodziejewskiego

nt. „Optymalizacja parametrów cyfrowych linearyzowanych modulatorów szerokości impulsów LPWM dla akustycznych wzmacniaczy klasy D”

1. Uwagi ogólne

Niniejsza recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Wojciecha Kołodziejewskiego została przygotowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Rozprawa ta dotyczy cyfrowych linearyzowanych modulatorów PWM dla akustycznych wzmacniaczy mocy klasy D. Jej tematyka mieści się w dyscyplinie naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.

Doktorant zaimplementował hybrydowy linearyzowany modulator LBDD z kompensacją wstępną do sterowania stopnia wyjściowego wzmacniacza klasy BD ze zrównoważonym wyjściem dla sygnałów wspólnych o stałej wartości napięcia na wyjściu. W rozprawie opisane zostały zastosowane przez Doktoranta linearyzowane modulacje szerokości impulsów, hybrydowe konwertery cyfrowo-czasowe stosowane w cyfrowych modulatorach linearyzowanych PWM, sposoby implementacji hybrydowego modulatora PWM przy wykorzystaniu mikrokontrolera i programowalnej linii opóźniającej oraz wyniki badań symulacyjnych wzmacniaczy akustycznych klasy BD ze zrównoważonym wyjściem w trybie wspólnym. Doktorant wskazał znaczenie przeprowadzonych przez siebie badań na tle aktualnej literatury przedmiotu.

Poruszane w pracy zagadnienia są ważne z punktu widzenia badania właściwości wzmacniaczy klasy D pracujących przy sterowaniu cyfrowym. Wyniki uzyskane przez Doktoranta mogą być także przydatne dla projektantów nowoczesnych wzmacniaczy akustycznych cechujących się wysoką sprawnością energetyczną oraz niskim współczynnikiem zawartości harmoniczných.

Tematyka podjęta w ocenianej pracy doktorskiej jest aktualna i ważna, a cząstkowe problemy rozważane przez Doktoranta są również poruszane w licznych pracach innych

autorów, opublikowanych w ostatnich kilkunastu latach. Dowodzi to trafnego wyboru zagadnienia badawczego.

Doktorant wykazał, że zaproponowane przez Niego wzmacniacze akustyczne klasy BD cechują się korzystnymi wartościami parametrów eksploatacyjnych, a jednocześnie umożliwiają realizację bezfiltrowych wzmacniaczy klasy D o znacznie ograniczonym poziomie zakłóceń elektromagnetycznych. Przedstawione w rozprawie wyniki badań dowodzą wysokich kompetencji Doktoranta w zakresie cyfrowego przetwarzania sygnałów, analizy układów elektronicznych, projektowania wzmacniaczy akustycznych oraz planowania i realizacji badań naukowych.

2. Ocena merytoryczna pracy

Praca liczy łącznie 139 stron i zawiera 7 rozdziałów, 5 dodatków, wykaz cytowanej literatury, a także spis treści, listę skrótów, wykaz stosowanych symboli, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz podziękowania i oświadczenie o samodzielnym przygotowaniu rozprawy. Struktura rozprawy jest nietypowa, ponieważ zaraz po spisie treści Doktorant umieścił spis literatury.

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił ogólną charakterystykę wzmacniaczy klasy D i kierunki rozwoju ich konstrukcji oraz opisał stosowane techniki modulacji PWM. Następnie sformułował cele badawcze i 4 tezy rozprawy doktorskiej oraz zapowiedział strukturę rozprawy. Tezy rozprawy są sformułowane w sposób rozwlekły, a niektóre sformułowania mają charakter żargonowy, np. „implementacja cyfrowych modulatorów LPWM z kompensacją wstępna *jest nieco trudniejsza* niż modulatorów DPWM ...”. W kolejnych rozdziałach Doktorant przedstawił wyniki badań dowodzących słuszności postawionych tez.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił porównanie cyfrowych modulacji PWM z równomiernym próbkowaniem z naturalnymi modulacjami PWM. Zdefiniowano 4 rodzaje cyfrowych modulacji PWM i wyznaczono widma częstotliwościowe sygnałów uzyskanych za pomocą rozważanych modulacji. Stwierdzono, że w widmach tych oprócz składowej podstawowej sygnału modulującego występują jej wyższe harmoniczne, składowa podstawowa częstotliwości kluczowania i jej harmoniczne oraz liczne składowe intermodulacyjne, które nie mogą być skutecznie odfiltrowane. W rozdziale tym występują liczne rysunki i wzory, które są w większości pozbawione komentarza. Przez to są mało użyteczne dla czytelnika. Doktorant nie uwypuklił istotnych różnic między uzyskanymi widmami częstotliwościowymi sygnałów z modulacją NPWM. Na rysunkach prezentowane są wykresy licznych sygnałów, ale Doktorant nie podaje objaśnienia, co oznaczają

poszczególne kolory linii, ani co jest na poszczególnych wykresach. Doktorant też pokazał wyniki przeprowadzonych przez siebie obliczeń w programie MATLAB. Wyniki tych obliczeń nie zostały jednak jasno skomentowane.

W rozdziale 3 Doktorant opisuje metody linearyzacji cyfrowych modulatorów PWM. W szczególności przedstawiono algorytmy wyznaczania początków i końców impulsów PWM w kolejnych okresach przełączania. Opisano sposób realizacji rekwantyzacji oraz przedstawiono wyniki analiz spektralnych, które przeprowadzono dla wszystkich rozważanych odmian cyfrowej modulacji PWM. Wykazano, że współczynnik zawartości harmonicznych jest rosnącą funkcją indeksu modulacji oraz ilorazu częstotliwości sygnału modulującego i częstotliwości próbkowania. Wykazano też, że do uzyskania zadawalającej wartości THD wystarczające jest przyjęcie współczynnika nadpróbkowania równego 3.

Rozdział czwarty prezentuje rozwiązania układowe cyfrowych modulatorów PWM realizujących konwersję cyfrowo-czasową. Opisano układy realizujące tzw. metodę licznikową oraz układy wykorzystujące programowaną linię opóźniającą z odczepami PTDL. Doktorant zaproponował zastosowanie hybrydowych modulatorów PWM wykorzystujących zalety obu wymienionych powyżej układów. Przedstawił także projekt hybrydowego konwertera cyfrowo-czasowego z pętlą synchronizacji opóźnienia dla cyfrowego modulatora.

Rozdział piąty prezentuje opracowaną przez Doktoranta architekturę zlinearyzowanego modulatora PWM dla wzmacniacza klasy BD realizującą metodę hybrydową przy wykorzystaniu mikrokontrolera STM32 i dwóch programowanych linii opóźniających z odczepami. Doktorant przedstawił wyniki badań symulacyjnych wykonanych za pomocą programu MATLAB oraz wyniki pomiarów. Wyniki te dowodzą poprawnej pracy opracowanego modulatora PWM.

Rozdział szósty prezentuje nowe rozwiązania układowe wzmacniaczy akustycznych klasy BD ze zrównoważonym wyjściem w trybie wspólnym. Każde z tych rozwiązań zawiera mostek H z 4 tranzystorami MOS mocy oraz 4 dodatkowe tranzystory MOS mocy utrzymujące stałą wartość sygnału wyjściowego w trybie wspólnym. Dzięki temu nie ma potrzeby stosowania filtracji sygnałów wspólnych. Prezentowane układy zostały zasymulowane w programie SPICE oraz wykonano pomiary czasowych przebiegów napięć w tym układzie. Wyniki te potwierdzają poprawność działania rozważanych układów.

Rozdział 7 zawiera wnioski z pracy. Doktorant wymienił swoje najważniejsze osiągnięcia naukowe opisane w rozprawie. Z treści rozdziału wynika, że cel pracy został osiągnięty, a tezy zostały wykazane.

Dodatek A.1 opisuje sposób wyznaczania przebiegów czasowych sygnałów z modulacją NPWM. Dodatki A.2 – A.4 zawierają kody programów w języku MATLAB lub C opisujących różne rodzaje modulacji. Dodatek A.5 zawiera kod programu generującego rekwantyzowane czasy początkowe i końcowe dla 4 kanałów PWM.

Wykaz literatury zawiera łącznie 83 pozycje, w tym 10 prac, których współautorem jest Doktorant. Cytowane prace są w większości wydane w ostatnich 15 latach, a zatem są one aktualne. Dobór cytowanych prac świadczy o dobrej orientacji Doktoranta we współczesnej wiedzy z zakresu wzmacniaczy akustycznych klasy D oraz cyfrowej modulacji PWM.

3. Uwagi ogólne

Praca jest napisana w języku polskim, w sposób na ogół zrozumiały, ale widoczne jest dążenie Autora do nadmiernego skracania myśli. Dlatego w wielu miejscach brakuje odpowiednich komentarzy, co utrudnia śledzenie wywodu Autora. W tekście występuje dużo skrótów, które nie są powszechnie używane, co wymaga od czytelnika częstego zaglądania do spisu skrótów. W tekście występują drobne błędy gramatyczne związane z niewłaściwą odmianą pojedynczych słów. Brakuje również objaśnienia skrótów w języku polskim.

Zamieszczone w pracy rysunki i zdjęcia są dobrze dobrane i zwykle ułatwiają zrozumienie zagadnień poruszanych przez Autora. Niektóre rysunki zawierają opisy w języku angielskim (np. rys. 3.1), pomimo tego, że praca napisana jest po polsku. Zestawy wykresów prezentowane w wielu miejscach rozdziałów 2 i 3 nie są właściwie opisane w podpisie pod rysunkami, ani nie są odpowiednio oznaczone wielkości na osi pionowej. Autor też nie podaje znaczenia poszczególnych krzywych umieszczonych na wspólnym wykresie, np. rys. 2.1, rys. 2.2, rys. 2.7, rys. 2.8, rys. 3.13, rys. 3.14.

W pracy przedstawiono wyniki badań Autora dotyczące wzmacniaczy akustycznych klasy D przy wykorzystaniu cyfrowych modulatorów PWM. Do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta, przedstawionych w recenzowanej rozprawie, można zaliczyć:

- Opracowanie teoretyczne oraz implementacja cyfrowego linearyzowanego modulatora PWM z kompensacją wstępną do sterowania wzmacniaczy akustycznych klasy BD ze zrównoważonym wyjściem dla sygnałów wspólnych;
- Zaprojektowanie i weryfikacja symulacyjna w programie MATLAB algorytmów kompensacji wstępnej,
- Implementacja wymienionych algorytmów w oparciu o metodę hybrydową z wykorzystaniem mikrokontrolera i programowanych linii opóźniających,

- Opracowanie oryginalnej architektury zlinearyzowanego modulatora LBDD PWM dla cyfrowego wzmacniacza mocy klasy BD oraz jej implementacja,
- Opracowanie nowych układów wzmacniaczy akustycznych klasy BD,
- Przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych opracowanych układów.

Osiągnięcia te dowodzą, że Doktorant opanował umiejętność formułowania problemów badawczych i ich rozwiązywania przy zastosowaniu nowoczesnych metod naukowych. Oceniana rozprawa dowodzi, że Doktorant opanował zaawansowaną wiedzę z zakresu przetwarzania sygnałów, układów elektronicznych, metod cyfrowej modulacji PWM, symulacji komputerowych oraz potrafi twórczo ją wzbogacać.

Podczas lektury tej interesującej pracy nasunęło mi się kilka uwag:

- a) Doktorant przy opisie wyników badań symulacyjnych i doświadczalnych wzmacniaczy mocy nie podał informacji o typach zastosowanych tranzystorów. Czy to oznacza, że dobór tranzystorów nie ma wpływu na uzyskiwane wyniki badań?
- b) Jakie modele tranzystorów MOS mocy zastosowano podczas obliczeń prowadzonych za pomocą programu SPICE?
- c) Czy Doktorant próbował porównywać wyniki obliczeń wykonanych w programie SPICE z wynikami pomiarów? Jeżeli tak, jakie rozbieżności między nimi zaobserwowano?
- d) Czy Doktorant porównał parametry autorskiego wzmacniacza ze wzmacniaczem klasy D wykorzystującym analogową modulację PWM? Jeżeli tak, to w jakiej relacji są parametry techniczne tych urządzeń oraz ich ceny?

Uwagi powyższe mają charakter dyskusyjny i w żadnym stopniu nie obniżają pozytywnej oceny pracy.

4. Uwagi szczegółowe

Oceniana praca jest zredagowana starannie, ale Autor nie ustrzegł się drobnych uchybień, które jednak nie wpływają w istotny sposób na jednoznacznie pozytywną ocenę pracy. Wybrane z tych uchybień zebrano poniżej.

- a) Nie widzę powodu do wyodrębniania podrozdziału 4.3.1, jeżeli nie ma podrozdziału 4.3.2.
- b) W spisie literatury, nie wskazano gdzie złożono do druku pracę nr 10, a przy pracach Autora dodano niepotrzebnie informację o jego afiliacji.
- c) Lista skrótów nie zawiera polskich tłumaczeń skrótów.

- d) W Wykazie stosowanych symboli objaśnienie symbolu Q budzi moje wątpliwości.
- e) Nie znalazłem wyjaśnienia symbolu K występującego we wzorze (2.14).
- f) Wzór (5.17) przywołany na s. 55 nie występuje w ocenianej pracy.
- g) Na s. 63 podano, że częstotliwość próbkowania wynosi $F_C = 352,8$. Należało podać jednostkę (kHz).
- h) Opisy na rys. 4.8 są w języku angielskim.
- i) Na s. 83 zamiast „spróbowanego” powinno być „spróbkowanego” oraz zamiast „tranzmitancji” powinno być „transmitancji”.
- j) Ostatni akapit na stronie 93 jest dla mnie niezrozumiały.
- k) W tekście występują błędy gramatyczne związane z niepoprawną odmianą poszczególnych słów oraz błędy związane z łącznym lub rozłącznym pisaniem pewnych słów, np. zamiast „z powodowane” powinno być „spowodowane” (s. 51), a zamiast „z synchronizowanego” powinno być „zsynchronizowanego” (s. 90).
- l) Niektóre frazy nie pasują do tekstu technicznego, np. „stosunkowo niezbyt dużym stopniem skomplikowania” (s. 93).
- m) W rozdziale 6 występuje wiele nieprawidłowych odwołań do nieistniejących rysunków, np. rys. 4 (s.98), rys. 4, rys. 5, rys. 7 (s. 101), rys. 4, rys. 5 (s. 102), rys. 5 i rys. 9 (s. 106).
- n) Na rys. 6.7 i na rys. 6.8 występują niepotrzebne opisy w języku angielskim ze wskazaniami do rysunków nieistniejących w ocenianej pracy.
- o) Czasy opóźnień Doktorant oznacza symbolami t_{on}/t_{off} , t_r/t_f (s. 104), które powszechnie oznaczają odpowiednio czas włączania, czas wyłączenia, czas narastania i czas opadania.
- p) Przy opisie skali na osi napięć w oscylogramach typowo używa się jednostki V/dz lub V/div, a nie div/V, jak w podpisie pod rys. 6.9.

5. Wniosek końcowy

Oceniana praca zawiera oryginalne i wartościowe wyniki stanowiące istotny wkład Doktoranta w badania właściwości cyfrowych modulatorów PWM dla akustycznych wzmacniaczy klasy D. Doktorant samodzielnie rozwiązał ważne zagadnienie badawcze z zakresu dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika oraz wykazał się znajomością aktualnej literatury naukowej w zakresie tematyki pracy. Przedstawione wyniki badań dowodzą słuszności sformułowanych przez Doktoranta tez pracy oraz Jego przygotowania do prowadzenia badań naukowych.

Uwagi sformułowane w punkcie 3 mają charakter dyskusyjny i wymagają ustosunkowania się do nich Doktoranta w czasie obrony.

W mojej opinii praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy prawa. W związku z tym zgłaszam wniosek do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o dopuszczenie mgr inż. Wojciecha Kołodziejskiego do publicznej obrony.

G. Reda

