

Kraków, 14.01.2022

dr hab. inż. Paweł Piątek, prof. uczelni
Katedra Automatyki i Robotyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Akademia Górniczo Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
30-59 Kraków, Al. A. Mickiewicza 30
e-mail: ppi@agh.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Mirosława Sobaszka „Sterowanie wzmacniaczem mocy klasy D z wykorzystaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego z wyjściowego filtra LC”

Niniejsza recenzja została sporządzona na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Rzeszowskiej, pismo RE.530-31/2021 z dnia 3 listopada 2021 roku.

Tematyka i cele pracy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Mirosława Sobaszka dotyczy sterowania akustycznego wzmacniacza mocy klasy D z wykorzystaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego z wyjściowego filtra LC. Tematyka pracy doktorskiej mieści się w zakresie naukowym dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. Jako cele pracy doktorant wskazał:

- skonstruowanie wzmacniacza mocy klasy D sterowanego niskokosztowym mikrokontrolerem sygnałowym,
- dobór metody sterowania z ujemnym sprzężeniem zwrotnym z wyjściowego dolnoprzepustowego filtra LC,
- analiza możliwości praktycznego zastosowania wzmacniacza mocy klasy D wykorzystującego do sterowania ujemne sprzężenie zwrotne z wyjściowego filtra dolnoprzepustowego.

Cele pracy są sformułowane jasno i spójnie, a ich realizacja pozwala na otrzymanie działającego rozwiązania wzmacniacza akustycznego klasy D.

Tematyka pracy dotyczy sterowania pracą wzmacniacza akustycznego klasy D w taki sposób, aby możliwa była poprawa jego parametrów, a co za tym idzie jakości odtwarzanego dźwięku. Tematyka jest aktualna i wpisuje się w aktualne trendy w budowie wzmacniaczy akustycznych. Wzmacniacze klasy D są coraz chętniej stosowane ze względu na niskie koszty wytworzenia oraz dobrą sprawność energetyczną. Aktualne rozwiązania nie dorównują jednak parametrami i jakością dźwięku m.in. najlepszym konstrukcjom wzmacniaczy pracujących w klasie AB. Zastosowanie metod automatycznej regulacji może pozwolić na poprawę parametrów wzmacniaczy klasy D. Poprawę można zapewne osiągnąć poprzez wprowadzanie do konstrukcji pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego, zastosowanie różnego rodzaju regulatorów, odpowiednią identyfikację i dobór parametrów. Nie są to zadania proste ze względu na potrzebny krótki czas przetwarzania danych i związane z tym trudności numeryczne oraz implementacyjne. Sama budowa elektronicznych torów umożliwiających przetwarzanie danych z odpowiednią szybkością i jakością przy jednoczesnym zachowaniu akceptowalnego poziomu kosztów nie jest zagadnieniem prostym.

Poprawa parametrów wzmacniaczy klasy D jest zatem ciekawym zagadnieniem badawczym, jak również istotnym zagadnieniem praktycznym, którego rezultaty mogą być zostać wdrożone do praktyki przemysłowej.

Struktura pracy

Praca składa się z 10 rozdziałów, wraz ze wstępem, podsumowaniem, spisem literatury oraz załącznikami. Praca stanowi spójną tematycznie całość.

Rozdział pierwszy jest wprowadzeniem do tematyki poruszanej w pracy. Autor zawarł w nim m.in. informacje dotyczące historii konstrukcji akustycznych wzmacniaczy mocy oraz budowy i podstawowych parametrów współczesnych rozwiązań. Znaczący fragment wprowadzenia jest poświęcony budowie, parametrom oraz problemom towarzyszącym konstrukcji wzmacniaczy mocy klasy D. Wzmacniacze tego typu są w ostatnich latach przedmiotem intensywnych prac badawczych oraz konstrukcyjnych z uwagi na możliwą do osiągnięcia wysoką efektywność energetyczną. Jednocześnie impulsowy charakter pracy tego typu wzmacniaczy powoduje, że w czasie budowy tego typu urządzenia trzeba zmierzyć się z wieloma trudnościami projektowymi. Autor opisuje najistotniejsze trudności w konstrukcji wysokiej jakości akustycznych wzmacniaczy mocy klasy D. Są nimi np.: problemem doboru filtra wyjściowego, sposób modulacji sygnału mocy oraz jej wpływ na jakość dźwięku, czy też metody kompensacji zniekształceń mocy. Autor przytacza również najciekawsze konstrukcje opisane w literaturze. Następnie zamieszczono motywację doktoranta do podjęcia pracy oraz sformułowano cele pracy. Parafrazując, celem pracy jest skonstruowanie wzmacniacza mocy klasy D wyposażonego w sterowanie cyfrowe, obejmujące ujemnym sprzężeniem zwrotnym wyjściowy, dolnoprzepustowy filtr LC, opracowanie metod sterowania oraz analiza praktycznego wykorzystania tego typu konstrukcji.

W rozdziale drugim doktorant przedstawił opis opracowanego wzmacniacza mocy w klasie D. Autor przedstawił architekturę zaprojektowanego urządzenia z podziałem na bloki funkcjonalne: układ sterująco-zarządzający, stabilizowany i sterowany zasilacz dużej mocy, obwód końcówki mocy wraz układem sprzężenia zwrotnego i filtrem wyjściowym. Opisał zasadę działania poszczególnych bloków (z wyjątkiem samej końcówki mocy) oraz przepływy informacji pomiędzy poszczególnymi elementami urządzenia. Dokładniej przedstawił opis działania zasilacza stabilizowanego oraz układu sterująco-zarządzającego.

W rozdziale trzecim autor opisał budowę oraz sposób sterowania samą końcówką mocy budowanego wzmacniacza. Przedstawił budowę wielofazowej końcówki oraz sposoby sterowania w konfiguracji czterofazowej oraz ośmiofazowej. Dokonał analizy możliwości zastosowania przedstawionych konfiguracji w odniesieniu do tłumienia pierwszej harmonicznej sygnału wyjściowego przez filtr wyjściowy. Przeanalizowana została też możliwość powiększenia efektywnej rozdzielczości wielofazowej końcówki mocy poprzez wprowadzanie przesunięć pomiędzy fazami sygnału PWM.

Rozdział czwarty dotyczy filtra wyjściowego, który jest niezbędny we wzmacniaczu klasy D do tłumienia wysokoczęstotliwościowych składowych sygnału mocy. Autor przeprowadził rozważania dotyczące zależności parametrów filtra wyjściowego od obciążenia. W rozdziale została zamieszczona analiza dotycząca doboru parametrów filtra.

Rozdział piąty dotyczy obwodu sprzężenia zwrotnego zaawansowanego w budowanym wzmacniaczu. Doktorant opisał budowę obwodu sprzężenia zwrotnego. Przedstawił zasady doboru poszczególnych elementów tego obwodu, takich jak: wzmacniacze operacyjne, filtry, czy przetworniki analogowo-cyfrowe.

W rozdziale szóstym autor przedstawił opis mikroprocesorowego układu sterowania wzmacniacza mocy. Właściwa konstrukcja tego elementu systemu była trudnym zadaniem z uwagi na konieczność minimalizacji opóźnień wprowadzanych w cyfrowym torze przetwarzania sygnału obwodu ujemnego sprzężenia zwrotnego. Autor opisał zastosowany algorytm PID, jego dyskretyzację oraz schemat funkcjonalny. Przedstawił najważniejsze zagadnienia implementacji oraz uzyskane parametry czasowe algorytmu. Doktorant przeanalizował również problemy numeryczne związane z bardzo krótkim czasem próbkowania oraz zaproponował rozwiązanie minimalizujące wpływ długości słowa na precyzję obliczeń. Rozdział zawiera także analizę wpływu szumu przetwornika oraz opis sposobów synchronizacji procesu przetwarzania analogowo-cyfrowego z procesem wykonywania algorytmu i formowania sygnału PWM.

W rozdziale siódmym autor przedstawił proces doboru nastaw dla zastosowanego kompensatora PID. Na początku zamieścił model układu sterowania, opisał go z wykorzystaniem transmitancji i przedstawił analizę jego elementów składowych. Następnie przedstawił analizę wykorzystania metody eliminacji zer i biegunów do doboru nastaw kompensatora. Przeprowadził dyskusję wpływu opóźnienia wprowadzanego przez cyfrowy tor przetwarzania na parametry wzmacniacza. Znaczna część rozdziału jest poświęcona analizie odporności układu sterowania na zmiany parametrów obiektu regulacji. Doktorant zamieścił również w rozdziale opis metody pomiaru charakterystyk częstotliwościowych obiektu sterowania, estymacji parametrów obiektu sterowania na podstawie zmierzonych charakterystyk oraz propozycję opracowanej metody automatycznego doboru nastaw parametrów kompensatora.

W rozdziale ósmym autor zamieścił wyniki pomiarów parametrów zbudowanego wzmacniacza mocy. Przeprowadził pomiary charakterystyk częstotliwościowych układu otwartego i porównał je z charakterystykami modelu. Zgodność porównywanych charakterystyk okazała się wysoka. Przedstawił również zmierzone charakterystyki układu zamkniętego dla różnych typów głośników. Zamieścił wyniki pomiaru widma sygnału wyjściowego oraz obliczone wartości współczynnika THD reprezentującego zawartość harmoniczną w sygnale. Jako ostatni wynik autor zamieścił wynik pomiaru impedancji wyjściowej.

Rozdział dziewiąty zawiera dyskusję na temat możliwości poprawy parametrów budowanego wzmacniacza klasy D. Autor skupił się na dwóch potencjonalnych rozwiązaniach: wykorzystaniu transmitancji rezonansowych do powiększenia wzmocnienia układu otwartego w górnym zakresie pasma akustycznego oraz wykorzystania predyktora Smitha w dodatkowej pętli sprzężenia zwrotnego. Przeprowadzone badania wskazują, że oba rozwiązania dają obiecujące wyniki.

Rozdział dziesiąty to podsumowanie pracy. Autor odnosi się w nim do otrzymanych wyników oraz formułuje wnioski. Doktorant podsumował również swoje oryginalne osiągnięcia zaprezentowane w pracy.

Oprócz wymienionych rozdziałów praca zawiera także spis literatury oraz załączniki. W załącznikach autor zamieścił schematy zaprojektowanego i zbudowanego urządzenia, program sterujący wzmacniaczem w wersji bez oraz z predyktorem Smitha, streszczenie rozprawy w języku angielskim oraz podsumowanie informacji o dorobku naukowo-dydaktycznym i popularyzatorskim.

Praca jest napisana spójnie i konsekwentnie. Jest zrozumiała i dobrze się ją czyta. Miejscami zawiera drobne niedociągnięcia stylistyczne, które jednak nie wpływają na ogólny odbiór. Kolejność rozdziałów jest prawidłowa.

Wykaz literatury zawiera 80 pozycji. Doktorant zawarł w nim odwołania do artykułów naukowych, pozycji książkowych oraz dokumentów technicznych. Tematyka cytowanych prac jest zgodna z tematem rozprawy doktorskiej. Dobór pozycji literaturowych należy uznać za odpowiedni.

Ocena merytoryczna pracy

Dobór metod badawczych należy uznać za prawidłowy. Doktorant dokonał przeglądu istniejących rozwiązań, zidentyfikował problem badawczy i jasno postawił cele pracy. Zaprojektował architekturę budowanego wzmacniacza akustycznego oraz jego poszczególne elementy składowe w postaci układu sterująco-zarządzającego, sterowanego zasilacza stabilizowanego dużej mocy, stopnia mocy, filtru wyjściowego oraz obwodów kompensatora. Zaprojektowane obwody elektroniczne zostały zbudowane i uruchomione. Elementy wzmacniacza zostały zidentyfikowane, a dobór parametrów został dokonany na podstawie obliczeń, badań symulacyjnych i eksperymentów praktycznych. Jakość zbudowanego wzmacniacza z obwodem sprzężenia zwrotnego została przetestowana poprzez wykonanie odpowiednich pomiarów. Na koniec autor zaproponował istotne modyfikacje, w postaci zastosowania transmitancji rezonansowych oraz dodatkowego sprzężenia z predyktorem Smitha, których przydatność zweryfikował praktycznie.

W podsumowaniu pracy doktorant zaprezentował wnioski podsumowujące wyniki prac i eksperymentów. Wnioski są sformułowane logicznie i zrozumiale. Zbudowany wzmacniacz nie pozwala na osiągnięcie parametrów wzmacniaczy zaprezentowanych w cytowanych publikacjach. Doktorant wskazał najważniejsze przyczyny takiej sytuacji. Należy zgodzić się, że wykorzystanie procesora sygnałowego o lepszych parametrach, lecz droższego może poprawić parametry wzmacniacza. Dotyczy to głównie szybkości wykonywania obliczeń oraz rozdzielczości zastosowanych przetworników analogowo-cyfrowych.

Moim zdaniem, praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Autor samodzielnie zaprojektował urządzenie, zbudował oraz przeprowadził odpowiednie eksperymenty. Po dokonaniu pomiarów weryfikacyjnych zaproponował i sprawdził możliwe ulepszenia. Rozprawa prezentuje ogólną wiedzę doktoranta w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika oraz świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej.

Uwagi ogólne

Podczas obrony pracy chciałbym poznać zdanie doktoranta na wymienione poniżej tematy.

1. Jakie były wytyczne i założenia do doboru procesora sygnałowego oraz mikrokontrolerów sterujących poszczególnymi częściami budowanego wzmacniacza?
2. Dlaczego do transmisji sygnału dźwiękowego wewnątrz urządzenia wykorzystano interfejsy komunikacyjne ogólnego przeznaczenia (SPI) zamiast jednego z dedykowanych do przesyłania dźwięku cyfrowego interfejsów takich jak np. I2S?
3. Sposób wykorzystania układu U22 (TAS5614) jako zasilacza stabilizowanego jest interesujący. Autor nie podaje jednak, jakie są częstotliwości sygnałów wyjściowych. Czy sposób pracy zasilacza przekłada się na końcowe parametry wzmacniacza oraz na subiektywnie ocenianą jakość sygnału akustycznego?
4. Czy, a jeżeli tak, to jaki jest wpływ zakłóceń pochodzących z pozostałych elementów układu zasilającego na jakość sygnału audio w zaprojektowanym wzmacniaczu?
5. W rozdziale 4 doktorant nie przedstawił końcowego wyliczenia parametrów filtra wyjściowego. Rozdział kończy się podaniem zasad doboru tych parametrów.

Uwagi szczegółowe

Praca napisana jest czytelnie i przejrzysto. Autor jednak nie ustrzegł się drobnych błędów. Nie wpływają one jednak istotnie na pozytywną ocenę pracy. Wybrane uchybienia zamieszczono poniżej.

1. Na schemacie rys. A.3. nie są naniesione wszystkie sygnały zasilające dla układu U27. Na schematach w dość nieczytelny sposób oznaczono podłączenie sygnałów zasilających. Z treści pracy można wywnioskować, że układy końcówki mocy U27 oraz U32 są zasilane z wyjścia układu U22, ale nie jest to czytelnie oznaczone na schemacie.
2. Na stronie 57 zamieszczono odwołanie do rysunku rys. 6.2, a powinno być do rys. 6.1.
3. Na stronie 59 i 60 zamieszczono odwołanie do rysunku rys. 6.3, a powinno być do rys. 6.2.
4. Na stronie 62 autor odwołuje się do nieistniejącego rysunku rys. 6.4. Powinno być zapewne rys. 6.3.
5. Autor niekonsekwentnie stosuje znaki interpunkcyjne w połączeniu z wzorami.
6. Autor niekonsekwentnie stosuje we wzorach oznaczenia pochodzące z języka polskiego i angielskiego. Przykładowo wzór 7.4: $T_{otw}(s) = T_{PID}(s) \cdot T_{Loop}(s)$.
7. Autor w pracy używa skrótu T do oznaczania transmitancji. Stosowanie oznaczenia G byłoby bardziej uzasadnione ze względu na fakt, że większość wykorzystywanych oznaczeń skrótowych pochodzi z języka angielskiego.

Należy podkreślić, że wymienione powyżej uwagi mają charakter edycyjny i nie obniżają wartości pracy oraz jej pozytywnej oceny.

Wnioski końcowe

Pozostały dorobek doktoranta obejmuje 7 artykułów w czasopismach naukowych. Doktorant jest ponadto autorem jednego patentu. Wykazywał się działalnością popularyzatorską oraz organizacyjną. Sprawował opieką nad 63 pracami badawczo-rozwojowymi realizowanymi w ramach prac inżynierskich i magisterskich.

Pomysły, rozwiązania i wyniki eksperymentów przedstawione w pracy są oryginalne i wnoszą istotny wkład w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika. W mojej ocenie praca Pana mgr inż. Mirosława Sobaszka spełnia wymagania stawiane przez obowiązujące przepisy prawa pracom doktorskim. **Zgłaszam zatem wniosek do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza o dopuszczenie Pana mgr inż. Mirosława Sobaszka do publicznej obrony.**

Paweł Pigoń