

Zielona Góra, 14.01.2022

*Dr hab. inż. Krzysztof Sozański, prof. UZ  
Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki  
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki  
Uniwersytet Zielonogórski*

## **Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Mirosława Sobaszka pt.**

*Sterowanie wzmacniaczem mocy klasy D z wykorzystaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego z wyjściowego filtra LC*

### **1. Podstawa formalna opracowania recenzji**

Formalną podstawą opracowania recenzji jest pismo *Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika prof. dr. hab. inż. Andrzeja Kolka* z dnia 9 listopada 2021r. wraz z umową.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest *Pan Profesor dr hab. inż. Leszek Trybus*.

Rozprawa mieści się w dziedzinie *nauk technicznych*, w dyscyplinie: *automatyka, elektronika i elektrotechnika*.

### **2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Przedstawiona rozprawa doktorska została napisana w języku polskim. Dostarczona została w formie książkowej i sygnowana jest logiem Politechniki Rzeszowskiej w Rzeszowie. Rozprawa ma sto dwadzieścia sześć (126) stron, zawiera dziesięć (10) rozdziałów oraz spis literatury obejmujący osiemdziesiąt (80) pozycji.

W pierwszym rozdziale Autor przedstawił stan obecnej wiedzy na temat wybranych zagadnień związanych analizą, projektowaniem i realizacją wzmacniaczy klasy D ze sprzężeniem zwrotnym. Na końcu rozdziału sformułowano cele pracy.

Rozdział drugi poświęcono krótkiemu wstępnemu opisowi opracowanego układu wzmacniacza. Autor zaprezentował w nim uproszczony schemat blokowy wzmacniacza oraz widok całego zmontowanego wzmacniacza. W układzie zastosowano trzy mikroprocesory dwa 16-bitowe (dsPIC33EP) do sterowania tranzystorami mocy zasilacza i wzmacniacza oraz 32-bitowy (PIC32MZ) do odbioru sygnałów audio przez interfejs USB.

Autor w swojej pracy zastosował odwrotną konwencję, najpierw pokazuje gotowy układ a w kolejnych rozdziałach pokazuje pewne szczegóły swojego projektu wraz z okazjonalnym uzasadnieniem zastosowanych rozwiązań.

Kolejny krótki rozdział opisuje modulator i stopień mocy wzmacniacza klasy D. W układzie zastosowano mikroprocesor 16-bitowy typu dsPIC33EP. W załączniku A

W PŁYNEŁO

1/6

20. STY. 2022



umieszczono schemat całego wzmacniacza. Szkoda, że Autor w treści pracy nie odwołuje się do elementów schematu umieszczonych w załączniku.

W bardzo krótkim rozdziale numer cztery Autor przeprowadza dyskusję na temat filtru wyjściowego. Natomiast kolejny rozdział opisuje obwód sprzężenia zwrotnego.

W rozdziale szóstym przedstawiona jest realizacja regulatora PID za pomocą mikroprocesora. Listing programu wyznaczającego odpowiedź regulatora umieszczono w załączniku B.

Dobór parametrów regulatora PID obszernie został opisany w rozdziale siódmym. Należy przyznać, że ten rozdział jest najlepszym w całej pracy.

W rozdziale ósmym znajdują się również wyniki badań modelu laboratoryjnego. Moim zdaniem w pracy przedstawiono tylko szczątkowe wyniki badań. Nie pokazano ani jednego wykresu czasowego napięcia na wyjściu wzmacniacza. Nie wyznaczono też podstawowych parametrów wzmacniaczy elektroakustycznych takich jak: *SNR*, *SINAD*, *IMD*. Moim zdaniem to znacznie zubaża rozprawę.

W rozdziale dziewiątym Autor przedstawił dyskusję na temat możliwości poprawy parametrów układu wzmacniacza. Jednak podobnie jak poprzednio odbyła się ona bez uwzględnienia wpływu ulepszeń na parametry napięcia wyjściowego.

Rozdział dziesiąty zwiiera podsumowanie rozprawy. Autor w posumowaniu napisał, że przedstawiony układ powstał w wyniku kilku iteracji, szkoda, że w pracy nie ma na ten temat, żadnego śladu, natomiast już w rozdziale 2 pojawia się gotowy układ.

W pracy zamieszczono wykaz literatury zawierający osiemdziesiąt pozycji, które moim zdaniem w miarę dobrze ilustrują wiedzę w zakresie rozpatrywanej w rozprawie tematyki. Autor odpowiednio stosuje odnośniki do dołączonego do pracy wykazu literatury.

Poziom edytorski przedstawionej rozprawy należy uznać za dobry.

### **3. Ocena dorobku publikacyjnego Doktoranta**

Doktorant w dorobku naukowym posiada siedem publikacji naukowych i jeden patent. Można uznać, że bezpośrednio z rozprawą doktorską są związane cztery publikacje. Wszystkie te publikacje są napisane samodzielnie przez Doktoranta. Najbardziej z rozprawą jest związany artykuł opublikowany w czasopiśmie „*IEEE Transactions on Circuits and Systems*” indeksowanym przez JCR. Dwa artykuły opublikowane w czasopiśmie „*Computer Technology and Application*” oraz jeden w „*Zeszytach Naukowych Politechniki Rzeszowskiej*”.

Należy uznać dorobek publikacyjny za wystarczający do nadania tytułu doktora.

### **4. Ocena tematu i celu pracy**

Rozprawa pt. *Sterowanie wzmacniaczem mocy klasy D z wykorzystaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego z wyjściowego filtru LC* odnosi się do bieżących potrzeb przemysłu. Należy więc uznać tematykę pracy za słuszną i dostosowaną do bieżących trendów w układach elektronicznych i zgodną z dyscypliną automatyka, elektronika i elektrotechnika. Duża sprawność energetyczna wzmacniaczy klasy D jest zgodna z obecnym trendem do oszczędzania energii. Temat recenzowanej pracy w pokrywa się z jej zawartością.

Moim zdaniem w temacie rozprawy powinno być wskazane, że dotyczy ona wzmacniacza mocy klasy D sygnałów elektroakustycznych. Takie zastosowanie wzmacniacza podwyższa wielokrotnie wymagania odnośnie parametrów jakościowych sygnału wyjściowego w porównaniu do typowych aplikacji energoelektronicznych takich jak: zasilacze przemienniki częstotliwości, falowniki itp.

Dodatkowo w tytule powinna się znaleźć również informacja, że pętla sprzężenia zwrotnego realizowana jest cyfrowo. Moim zdaniem stosowanie cyfrowej pętli sprzężenia zwrotnego jest wielokrotnie bardziej złożone niż analogowej, szczególnie dla wzmacniaczy elektroakustycznych o wysokich parametrach jakościowych (np.:  $THD < 0,05\%$ ,  $SNR > 90$  dB). Komercyjne wzmacniacze elektroakustyczne klasy D z analogową pętlą sprzężenia zwrotnego osiągają obecnie bardzo wysokie wymagania jakościowe. Przykładowo wzmacniacz NC1200 firmy Hypex osiąga parametry  $THD < 0,004\%$ ,  $SNR > 103$  dB. Obserwowany jest obecnie trend odejścia od całkowicie cyfrowych wzmacniaczy w kierunku układów hybrydowych z analogową pętlą sprzężenia zwrotnego (np. TAS3251). Moim zdaniem pomimo dużego stopnia trudności w uzyskaniu wysokich parametrów sygnału wyjściowego dla wersji całkowicie cyfrowej, przyszłość należy jednak do rozwiązań cyfrowych.

Autor nie sformułował tezy pracy, opisał jedynie cele pracy:

1. Skonstruowanie wzmacniacza mocy klasy D sterowanego niskokosztowym mikrokontrolerem sygnałowym.
2. Dobór metody sterowania z ujemnym sprzężeniem zwrotnym z wyjściowego dolnoprzepustowego filtra LC.
3. Analiza możliwości praktycznego zastosowania wzmacniacza klasy D wykorzystującego do sterowania ujemne sprzężenie zwrotne z wyjściowego filtra dolnoprzepustowego.

Moim zdaniem cel nr 1 jest zbyt ogólny, nie określa bowiem podstawowych parametrów wzmacniacza takich jak:  $THD$ ,  $SNR$ ,  $SINAD$ ,  $IMD$ , moc wyjściowa itp. Inne bowiem rozwiązania należy zastosować jeśli zakładamy wartość współczynnika zniekształceń nieliniowych  $THD \leq 0,1\%$  a inne jeśli ma być to wartość  $THD \leq 0,005\%$ . Odnosząc się też do zastosowania niskokosztowego mikrokontrolera, to stosunek cen wzmacniaczy audio, w zależności od ich parametrów jakościowych, wynosi więcej niż kilkanaście razy.

## 5. Zalety pracy

Autor podjął trud analizy, projektowania, i realizacji cyfrowego wzmacniacza klasy D z cyfrową pętlą sprzężenia zwrotnego. Z moich osobistych doświadczeń wynika, że realizacja takiego układu jest jednym z trudniejszych zadań w elektronice. Do realizacji zadania konieczne jest posiadane wiedzy i umiejętności w zakresie: elektrotechniki, elektroniki, energoelektroniki, cyfrowego przetwarzania sygnałów, automatyki i programowania. Autor wykazał się zdolnościami do analizy i syntezy metod i układów sterowania układami elektronicznymi.

Autor w podsumowaniu przedstawił swoje główne osiągnięcia, można je podzielić na dobrze udokumentowane oraz na takie, o których jedynie w pracy wspomniano. Przykładowo Autor opracował system komunikacji o dużej prędkości pomiędzy 32-bitowym procesorem nadrzędnym (PIC32MZ) a 16-bitowym mikrokontrolerem sygnałowym (dsPIC33EP).

Właściwe sprzężenie takich mikroprocesorów jest podstawowym warunkiem poprawnego działania układu wzmacniacza. Szkoda, że Autor nie przedstawił w pracy szczegółów opracowanego rozwiązania. Podobnie jest z projektem obwodu drukowanego, który dla układu wzmacniacza klasy D nie jest rozwiązaniem trywialnym.

Spośród udokumentowanych w pracy osiągnięć autora można wymienić:

- projekt i realizacja modelu laboratoryjnego wzmacniacza klasy D,
- opracowanie algorytmu automatycznego doboru nastaw regulatora PID w układzie wzmacniacza mocy klasy D,
- analiza stabilności układu i dobór nastaw regulatora PID,
- opracowanie wielofazowego wzmacniacza klasy D,
- opracowanie układu cyfrowego sprzężenia zwrotnego umożliwiającego różnicowy pomiar napięcia wyjściowego,
- częściowa weryfikacja eksperymentalna opracowanych algorytmów z analizą otrzymanych wyników,
- efektywne czasowo implementacje regulatora PID i predyktora Smitha dla procesora dsPIC33EP w języku asemblera.

Do głównych zalet pracy Autora należy zaliczyć to, że zaproponowane układy zostały zweryfikowane i potwierdzone przez badania eksperymentalne.

## 6. Uwagi krytyczne i pytania do Doktoranta

1. W pracy brak jest wykazu oznaczeń i widać, że Autor nie przemyślał zastosowanych symboli. Mocno to utrudnia czytanie pracy. Przykładowo na stronie 40 (ani wcześniej) nie można znaleźć opisu co oznacza  $f_N$ ? Autor używa oznaczenia  $P$  do określania liczby faz stopnia mocy, natomiast na stronie 48  $P_s$  służy do oznaczania strat mocy. W naukach elektrycznych przejęło się używać symbolu  $P$  do oznaczania mocy. Można oczywiście to wszystko pomieszać ale jaki jest cel takiego postępowania? Moim zdaniem gdyby Autor zbudował solidny spis oznaczeń to sam by doszedł to takiego wniosku.
2. Cała praca opisuje zrealizowany układ wzmacniacza ale brak jest w niej głębszej dyskusji nad alternatywnymi rozwiązaniami. Moim zdaniem takie dyskusje znacząco podniosłyby walory pracy i zwiększyły jej naukowy charakter. Przykładowo brak jest dyskusji na temat jakie rozwiązanie jest dokładniejsze czy zastosować w torze pomiaru napięcia wyjściowego wzmacniacza dwa przetworniki A/D i różnicę wyliczać cyfrowo (rys. 5.1), czy zastosować bardzo dobry wzmacniacz i wyznaczać ją analogowo a następnie przetworzyć ją na postać cyfrową?
3. W punkcie 8.3 przedstawione zostały wyniki pomiarów dla sygnału sinusoidalnego 1 kHz. Dla elektroakustycznego wzmacniacza mocy są to wyniki kluczowe. Autor jednak bardzo szczątkowo opisał elementy układu pomiarowego. Nie wiadomo co było, źródłem sygnału sinusoidalnego, jakich użyto sond pomiarowych. Wątpliwości moje budzi zastosowanie jako głównego przyrządu pomiarowego 8-bitowego oscyloskopu typu MSO-X 3014T. Moim zdaniem rozdzielczość tego oscyloskopu, pomimo zastosowania programowego trybu rozszerzenia jego rozdzielczości do 12 bitów, jest niewystarczająca do pełnej oceny parametrów wzmacniacza. Na podstawie pomiarów wyznaczono jedynie wartość

współczynnika  $THD$  dla napięcia wyjściowego a moim zdaniem należałoby również wyznaczyć wartości parametrów  $SNR$ ,  $IMD$  i  $SINAD$ .

4. Autor w swojej pracy analizuje wyłącznie właściwości częstotliwościowe, natomiast wzmacniacz działa w dziedzinie czasu. Moim zdaniem należałoby przedstawić przebiegi czasowe napięcia wyjściowego wzmacniacza. W pracy nie ma żadnych informacji na temat poziomu tętnień wyjściowych. Pokazanie napięcia wyjściowego dla wymuszenia sygnałem prostokątnym i określenie parametrów impulsowych napięcia wyjściowego byłoby pomocne w ocenie wzmacniacza.
5. W pracy dużo miejsca poświęcono doborowi nastaw regulatora PID, jednak bez analizy jaki wpływ mają one na parametry sygnału wyjściowego. Dyskusja jest tak prowadzona jakby regulator PID był jedynym celem tej pracy. Moim zadaniem dla pokazanych przypadków nastrojenia regulatora PID powinny być też wyznaczone podstawowe parametry sygnału wyjściowego wzmacniacza takie jak:  $THD$ ,  $SNR$  i  $SINAD$ .
6. Dla mnie nie jasne jest jak działa układ przełączania dzielnika na wejściu obwodu sprzężenia zwrotnego wzmacniacza (rys. 5.1). Czy służy on tylko do wyboru zakresu pomiarowego?
7. Do wyjścia wzmacniaczy mocy można podłączyć pojedynczy głośnik ale częściej są podłączane zespoły głośnikowe, które zawierają zwrotnice. Czy był badany wpływ takich obciążeń na układ regulacji?
8. Czy było badane zjawisko jitteru zegara sygnału audio i jego wpływ na parametry sygnału wyjściowego wzmacniacza?
9. W pracy nie opisano w jaki sposób jest przetwarzany sygnał audio od źródła do wyjścia wzmacniacza. Szczególnie jest istotne jak jest realizowana synchronizacja zegarów.
10. W rozprawie brak jest dyskusji na temat rodzaju błędów jakie występują w układzie wzmacniacza i ich wpływu na parametry sygnału wyjściowego. Ciekawe byłoby zbadanie wzmacniacza w układzie otwartym i porównanie z układem zamkniętym.
11. Czy wybór mikrokontrolerów typu  $dsPIC33EP$  do realizacji modulatora PWM, zamiast na przykład mikrokontrolerów typu  $TMS320F2000$  firmy Texas Instruments, które mają rozdzielczość sygnału PWM rzędu 100...200 ps był słuszny?

## 7. Wybrane uwagi szczegółowe

W modelu filtra  $LC$  z rys. 1.5 filtr jest obciążony rezystorem a w odpowiadającym mu równaniu (1.1) impedancją  $Z_{load}$ .

Na rys. 8.3 Autor przedstawił widmo napięcia na wyjściu wzmacniacza a w opisie jest charakterystyka Bodego.

Wykresy na rys. 1.5 są ledwo widoczne.

Autor we wzorach matematycznych swobodnie podchodzi do stosowania kursywy do oznaczania zmiennych np. wzór (1.2). Takie swobodne podejście trochę dziwi, szczególnie, że w pracy wzorów nie ma aż tak dużo.

Na stronie 15 jest odwołanie do wzoru (2.2), którego nie ma w pracy.

## 8. Podsumowanie

Pomimo wymienionych uwag krytycznych, wartość dodana pracy znacznie je przewyższa. Recenzowana praca zawiera oryginalne rozwiązania autorskie. Zaprezentowane rozwiązania mogą być przydatne dla projektantów układów elektronicznych.

Na podstawie analizy przedstawionej pracy mogę jednak stwierdzić, że Pan mgr inż. Mirosław Sobaszek wykazał się: odpowiednią wiedzą w zakresie: projektowania zaawansowanych układów elektronicznych, umiejętnościami w zakresie: implementacji algorytmów sterowania, wraz z ich dyskretnymi układami sterowania oraz zdolnością do twórczej analizy otrzymanych wyników.

W świetle obowiązujących obecnie przepisów o stopniach naukowych, zgodnie z warunkami określonymi w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce*, należy uznać, że przedłożona rozprawa spełnia stawiane w nich kryteria dla dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika. Niniejszym wnioskuję więc o przeprowadzenie publicznej obrony rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Mirosława Sobaszka na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej w Rzeszowie.

*Krzysztof Sozański*

Krzysztof Sozański