

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: „Synteza układu sterującego systemu aktywnej redukcji hałasu w pojazdach uprzywilejowanych”

Autor rozprawy: mgr inż. Paweł Górski

Promotor: dr hab. inż. Marek Zawieska, prof. nadzw. CIOP-PIB

I. Cel, zakres i charakter rozprawy

Celem rozprawy, zdefiniowanym na stronie 45 jest „opracowanie algorytmu aktywnej redukcji hałasu o quazi-stałych parametrach ustalanych z wykorzystaniem algorytmu genetycznego do zastosowania w układzie sterującym zintegrowanego systemu realizującym jednocześnie emisję sygnału uprzywilejowania i redukcję poziomu ciśnienia akustycznego docierającego do kierowcy pojazdu uprzywilejowanego”.

Narażenie kierowców pojazdów uprzywilejowanych na hałas związany z generowanym sygnałem uprzywilejowania jest bezsporne, co Autor dowodzi przytaczając szereg własnych eksperymentów i powołując się na stosowne regulacje prawne oraz standardy. Inne metody ograniczenia hałasu w kabinie pojazdu, w tym umieszczenie źródła sygnału uprzywilejowania w komorze silnika, negatywnie wpływają na ostrzeżenie innych użytkowników ruchu drogowego, a tym samym bezpieczeństwo. Problem badawczy podejmowany przez Autora, polegający na zastosowaniu metod aktywnych do personalnej ochrony kierowcy przed hałasem jest zatem aktualny, interesujący, a zarazem ważny społecznie.

Autor formułuje na stronie 45 dwie tezy:

„Możliwe jest opracowanie algorytmu o stałych parametrach ustalanych z wykorzystaniem algorytmu genetycznego (qFPG – quasi-Fixed-Parameter with genetic algorithm) do zastosowania w systemie aktywnej redukcji hałasu jednocześnie emitującym sygnał uprzywilejowania oraz redukującym poziom ciśnienia akustycznego docierający do kierowcy pojazdu uprzywilejowanego.

System sterujący oparty na algorytmie qFPG umożliwi poprawę stabilności oraz skuteczności systemu ARH w pojazdach uprzywilejowanych”.

Rozprawa ujawnia naukowy charakter badań, ale także olbrzymi wkład pracy i kompetencje Autora w zakresie projektowania elektronicznych systemów sterowania, programowania oraz prowadzenia eksperymentów. Biorąc pod uwagę obecny stan literatury, przeprowadzone w rozprawie badania i proponowane rozwiązanie są oryginalne.

II. Zawartość i wyniki rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Górskiego zawiera wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, wstęp, wyczerpującą prezentację problemu nadmiernego hałasu w pojazdach uprzywilejowanych wraz z uzasadnieniem stosowania metod aktywnych, krótką prezentację metod aktywnych, wskazanie celu i tezy pracy, trzy rozdziały zasadnicze, analizę wyników badań, podsumowanie i wnioski końcowe, bibliografię, a także dwa załączniki. Liczy łącznie 154 strony, w tym kilka stron prowadzących.

We Wstępie Autor zwraca uwagę na uciążliwość pracy kierowców pojazdów uprzywilejowanych, związaną z długotrwałą ekspozycją na hałas o wysokim poziomie ciśnienia akustycznego w obliczu konieczności zachowania dużej koncentracji i potrzeby komunikowania się z personelem medycznym. Naświetla tematykę rozprawy, sygnalizuje stosowane algorytmy i zapowiada interesujące wyniki.

W rozdziale 2 Autor rozwija problem hałasu w pojazdach uprzywilejowanych. Odwołuje się do krajowych i międzynarodowych przepisów, sięga nawet do dokumentów przetargowych dotyczących zakupu pojazdów uprzywilejowanych, a także dowodzi braku stosownych regulacji prawnych. Charakteryzuje stosowane sygnały dźwiękowe uprzywilejowania. Prezentuje badania poziomów ciśnienia akustycznego wokół różnych typów pojazdów uprzywilejowanych, a także we wnętrzu pojazdu, dokonanych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy. Proponuje, że ze względu na szczególny charakter pracy, dopuszczalny równoważny poziom dźwięku przeskalowany krzywą A we wnętrzu pojazdu uprzywilejowanego nie powinien przekraczać wartości 65 dB.

Rozdział 3 służy umotywowaniu zastosowania aktywnych metod redukcji hałasu do przedstawionego problemu. Autor na podstawie skrupulatnych badań udowadnia, że inne metody, w tym umieszczenie źródła sygnału uprzywilejowania w komorze silnika, negatywnie wpływają na ostrzeżenie innych użytkowników ruchu drogowego, a tym samym bezpieczeństwo. Wprawnie posługuje się przy tym programem CadnA do obliczeń, oceny i prezentacji poziomów hałasu.

W obszernym rozdziale 4 Autor zagłębia się w metody aktywne. Rozpoczyna od przedstawienia podstawowych zasad rządzących aktywną redukcją, prezentuje historię

rozwoju metod aktywnych oraz podkreśla osiągnięcia polskich naukowców w tym zakresie. Odwołuje się do definicji współczynnika kompensacji oraz wyprowadza warunki wystąpienia kompensacji hałasu metodami aktywnymi w zależności od parametrów korelacyjnych sygnału zredukowanego i redukującego. Autor zdaje sobie sprawę z poczynionych uproszczeń, w szczególności pominięcia wpływu obiektu elektroakustycznego. Następnie, Autor odwołuje się do podstawowych zagadnień z teorii sterowania. W dalszej kolejności przechodzi do prezentacji podstawowych struktur wykorzystywanych w układach aktywnej redukcji hałasu – ze sprzężeniem zwrotnym, kompensacji równoległej oraz hybrydowej. Przedstawia najpopularniejszy algorytm adaptacji – LMS. Po tym, Autor zwraca uwagę na rozważania do problemu redukcji hałasu tonowego, co nie oznacza stacjonarnego, a także prezentuje dedykowany do tego celu algorytm oparty o wąskopasmowy filtr typu *notch*.

W krótkim, z kolei, rozdziale 5, wspomniane są rozwiązania do personalnej aktywnej redukcji hałasu. Autor zwraca uwagę na aktywne ochronniki słuchu najkorzystniejsze dla kierowców pojazdów uprzywilejowanych. Proponuje opracowanie nowych sygnałów uprzywilejowania, spełniających rolę informacyjną, zgodnych z obowiązującymi przepisami i normami, a jednocześnie korzystnych z punktu widzenia aktywnych metod redukcji. Modyfikuje w tym celu sygnały standardowe, bazując na sygnale typu *chirp*.

Rozdział 6 poświęcony jest wskazaniu celu oraz postawieniu dwóch tez rozprawy. Autor ujawnia również działania, jakie zostaną podjęte w dalszej części do osiągnięcia celu oraz udowodnienia tez.

Rozdział 7 jest jednym z rozdziałów zasadniczych rozprawy. Na początku Autor przedstawia wymagania stawiane systemowi aktywnej redukcji sygnału uprzywilejowania docierającego do uszu kierowcy, po czym prezentuje koncepcję samodzielnego, w pełni funkcjonalnego urządzenia. W dalszej części, przechodzi do prezentacji stosowanej struktury kompensacji równoległej z adaptacyjnym filtrem typu *notch* o współczynnikach aktualizowanych z zastosowaniem algorytmu genetycznego. Następnie, szczegółowo omawia algorytm genetyczny oraz jego parametryzację i stosowane operacje. Definiuje również funkcję przystosowania adekwatną do rozważanego problemu.

Rozdział 8 prezentuje badania symulacyjne, począwszy od szczegółowego opisu metodyki przeprowadzenia takich badań w odniesieniu do algorytmów genetycznych. Autor zamieszcza i komentuje kolejne fragmenty kodu programu w środowisku Matlab, ułatwiając czytelnikowi zrozumienie zastosowanego podejścia oraz umożliwiając powtórzenie badań. Weryfikuje kolejne parametryzacje i wybiera najodpowiedniejsze. Szczególne ważne są badania kluczowego algorytmu o quazi-stałych parametrach. Dla kolejnych typów sygnałów

Autor prezentuje skuteczność algorytmu aktywnej redukcji – około 70 dB w przypadku wersji bardziej złożonej obliczeniowo i około 40 dB w przypadku wersji o zwiększonej szybkości adaptacji, a na potwierdzenie przedstawia odpowiednie spektrogramy.

W rozdziale 9 Autor prezentuje opracowany model laboratoryjny systemu aktywnej redukcji hałasu w pojazdach uprzywilejowanych, a także ujawnia jego szczegóły konstrukcyjne. Omawia także pracę systemu od strony programistycznej. Dyskutuje problem analizy statystycznej wyników, zwłaszcza obliczanie niepewności pomiarów. Przedstawia także proces kalibracji torów sygnałowych. W dalszej części skupia się na wynikach pomiarów. Szczególnie istotne znaczenie dla udowodnienia tez rozprawy mają badania układu sterującego, przeprowadzone dla kolejnych typów sygnał uprzywilejowania. Uzyskuje skuteczność około 30 dB. Kolejne badania, dotyczą systemu aktywnej redukcji hałasu w pełnej konfiguracji, wraz z generacją sygnału uprzywilejowania. Uzyskuje tym razem skuteczność sięgającą kilkunastu dB. Bada także skuteczność algorytmu w przypadku występowania szumu zakłócającego, potwierdzając w ten sposób praktyczne walory proponowanego rozwiązania.

Rozdział 10 zestawia przeprowadzone badania symulacyjne i laboratoryjne wykazując osiągnięcie postawionego celu oraz potwierdzenie tez rozprawy.

Podsumowanie w czytelny sposób oddaje zakres rozprawy, wskazuje elementy autorskie, a także ponownie prezentuje uzyskane wyniki.

Bibliografia zawiera 112 właściwie dobranych pozycji, w tym 6 indywidualnych oraz 9 zespołowych prac Autora.

III. Uwagi ogólne

Podczas studiowania rozprawy nasunęły się wymienione niżej uwagi natury ogólnej.

1. Zakres zmian współczynnik kompensacji podany na str. 28 zależnością (4.9) nie uwzględnia możliwości zwiększenia poziomu ciśnienia akustycznego w wyniku działania układu aktywnego.
2. Stwierdzenie, że sygnał $L(s)$ odpowiada transmitancji systemu aktywnej redukcji hałasu, podane wzorem (4.17) jest błędne. Stwierdzenie takie w przypadku transmitancji dyskretnych jest spotykane, choć przy dużym uproszczeniu wynikającym z utożsamiania zmiennej zespolonej w transmitancji z operatorem przesunięcia w czasie. Jednak, w przypadku układów ciągłych i przekształcenia Laplace'a jest to nieuprawnione.

3. Rozważania na str. 32 i części str. 33, dane zależnościami (4.17) – (4.22) są zbędne w niniejszej rozprawie i zawierają wiele usterek, prawdopodobnie wynikających z nieuwagi przy wpisywaniu formuł matematycznych.
4. Autor znacznie ograniczył rolę układów sterowania ze sprzężeniem zwrotnym, twierdząc na str. 33, że „ich zastosowanie ogranicza się do sygnałów o znanych przebiegach czasowych, np.: do sygnałów okresowych”. Należy pamiętać, że układy ze sprzężeniem zwrotnym mają duże zastosowanie w przypadku kompensacji nieliniowości oraz w sytuacji nieprecyzyjnego modelowania obiektu. Ponadto w wielu zastosowaniach są jedynym rozwiązaniem, gdy jest brak możliwości pozyskania sygnału referencyjnego z wystarczającym wyprzedzeniem w celu zapewnienia przyczynowej pracy układu kompensacji równoległej. W literaturze bardzo szeroko dyskutowana jest np. struktura sterowania z modelem wewnętrznym, będąca w istocie strukturą ze sprzężeniem zwrotnym, w której dokonuje się estymacji sygnału referencyjnego (zakłócenia), a następnie dopiero stosuje algorytmy znane z układów kompensacji. Przykładowo, w aktywnych ochronnikach słuchu przeznaczonych do redukcji hałasu szerokopasmowego, choć często z wyraźnymi składowymi tonowymi, układy ze sprzężeniem zwrotnym dominują w literaturze. Są one również często elementem układów hybrydowych, co Autor zauważa w dalszej części.
5. Autor utożsamia algorytmy gradientowe z algorytmami minimalizującymi jedynie chwilowy kwadrat sygnału błędu. Jest to jednak wyłącznie szczególny przypadek algorytmów gradientowych. Mają one szersze zastosowanie.
6. Na str. 35 na rys. 4.6 Autor poprawnie prezentuje strukturę kompensacji równoległej dla aktywnej redukcji hałasu. Jednak następujące po tym rozważania zawierają nadmierne uproszczenia. We wzorze (4.26) podaje zależność z pominięciem obecności toru P_2 z tegoż rysunku. Tak też wyprowadza równanie korekcji dla algorytmu LMS. W tej postaci nie jest to jednak algorytm aktywnej redukcji hałasu. Jest to algorytm redukcji szumu z sygnału, np. z sygnału mowy itp., w którym nie występuje obiekt sterowania, bądź algorytm służący do modelowania obiektu. Autor nadmienia również, że w algorytmie podanym zależnością (4.32) krok adaptacji jest znormalizowany i zawiera się w przedziale od 0 do 1. W rzeczywistości nie podaje algorytmu z normalizacją, ale nawet gdyby, to w obydwu przypadkach cytowany przedział nie jest poprawny.
7. Autor z nadużyciem traktuje algorytm FXLMS, a zwłaszcza RLS jako odmiany algorytmu LMS. Algorytm LMS jest algorytmem estymacji parametrów modelu

obiektu / procesu lub algorytmem przetwarzania sygnałów, np. w celu redukcji szumu z sygnału, bądź rozdziału składowych. Algorytm FXLMS jest zaś algorytmem sterowania, działającym w obecności obiektu. Z kolei, algorytm RLS jest znów algorytmem estymacji, ale wyprowadzonym w wyniku minimalizacji zupełnie innego wskaźnika jakości, niż algorytm LMS.

8. Autor na początku rozprawy przedstawia struktury układów aktywnej redukcji hałasu, uwzględniające obecność obiektu - ścieżki wtórnej, czyli toru elektroakustycznego zdefiniowanego pomiędzy sygnałem sterującym, a sygnałem błędu. Na wielu schematach brakuje jednak tego obiektu. Czytając pracę trudno ocenić, czy jest to zamierzone. Szkoda, że Autor o tym nie wspomina jawnie, gdyż w istocie projektuje interesujący algorytm, który umożliwia poprawną pracę dla sygnałów quazi-tonowych (z punktu widzenia algorytmu sterowania) bez znajomości modelu tego obiektu. Jest to bez wątpienia godny docenienia wkład w rozwój algorytmów niezależnych od modelu. Czy główną rolą algorytmu genetycznego jest właśnie kompensacja wpływu obecności obiektu?
9. Funkcja przystosowania zaproponowana zależnością (7.3) wymaga zdefiniowania stałej C_2 , co jest kłopotliwe np. ze względu na jej zależność od parametryzacji toru przetwarzania sygnału. Dlaczego jako funkcję przystosowania nie zastosowano odwrotności błędu średniokwadratowego danego wzorem (7.2), co uwolniłoby od potrzeby tego typu parametryzacji?
10. W rozprawie zacierają się relacje pomiędzy algorytmem genetycznym, a algorytmem LMS w strukturze kompensacji z filtrami typu *notch*. Szczegółowe omówienie tego związku, w tym zależności czasowych, powinno nastąpić podczas publicznej obrony rozprawy.
11. Brakuje porównania lub chociażby odniesienia zastosowanego podejścia z wykorzystaniem algorytmu genetycznego do innych podejść. Przydałoby się również szersze uzasadnienie, dlaczego Autor wybrał algorytm genetycznych.

IV. Uwagi szczegółowe

W rozprawie wychwycono następujące potknięcia natury szczegółowej:

1. Nazywanie na str. 31 stabilności układu aktywnej redukcji hałasu parametrem nie jest przyjęte.
2. s. 32-33, wzory (4.19)-(4.22) – zmienna czasu „ t ” zapisana jest błędnie jako indeks górny;

3. s. 37, wzory (4.33) i (4.34) – zamiast $y(n)$ powinno być raczej $y'(n)$;
4. Na str. 39 Autor nadmiernie ogranicza zastosowanie metod aktywnych do hałasów o częstotliwościach składowych poniżej 500 Hz, podczas gdy sam stosuje je dla częstotliwości znacznie wyższych, nawet do 2 kHz.
5. s. 45 – w tezie pierwszej przypuszczalnie chodziło o opracowanie algorytmu o quasi-stałych, a nie stałych parametrach.
6. s. 100, linie 17 i 18 – na odwrót odwołano się do przetworników A/C i C/A w kontekście wspomnianych procedur obsługi;
7. niektóre informacje niepotrzebnie podawane są w rozprawie wielokrotnie, np. własności sygnałów uprzywilejowania;
8. na str. 96 Autor pisze, że wybrane słuchawki Sennheiser zapewniają emisję sygnału kompensującego w przedziale częstotliwości od 50 do 1000 Hz. Sygnały uprzywilejowania rozpatrywane w rozprawie sięgają 2 kHz. Czy podany zakres jest prawidłowy?

V. Uwagi redakcyjne

Rozprawa napisana jest stylistycznie poprawnie, starannym i eleganckim językiem, z dużą dbałością o styl i formę wypowiedzi, na wysokim poziomie naukowym. Pozytywne wrażenie i płynność czytania zakłócają nieco wymienione poniżej dosyć liczne usterki redakcyjne natury ogólnej i szczegółowej:

1. przecinki stosowane są zbyt oszczędnie;
2. po zależnościach matematycznych powinno się stosować ogólne zasady interpunkcji;
3. numerowanie zależności matematycznych nie jest konsekwentne – zwykle numery podawane są w nawiasach, choć spacja pomiędzy numerem rozdziału jest wówczas zbędna, a czasami, np. w (7.8) i (7.9) brak jest nawiasów;
4. po wielu zależnościach matematycznych następuje wcięcie tekstu, co powinno być zarezerwowane dla nowego paragrafu;
5. rozmieszczenie tabel na stronach jest dosyć przypadkowe, a w niektórych przypadkach część tabel nawet przechodzi na kolejną stronę, jak np. tabela 8.1;
6. na wielu wykresach, na których obecnych jest kilka linii w różnych kolorach, brakuje legend; znaczenie linii można wyczytać z tekstu, ale utrudnia to analizę wykresów i osiągniętych rezultatów;
7. nazwa firmy „Tektronix” pisana jest błędnie jako „Tektronics”;

8. strona 4, linia 15 - powinno być „poziom ekspozycji odniesiony”;
9. strona 8, linia 10 – powinno być „analizę”;
10. strona 16, linia 11 – powinno być „dźwiękowym”;
11. strona 16, linia 3 od dołu – powinno być „każdy”;
12. strona 19, linia 2 – powinno być „Realizację”;
13. strona 22, linia 8 od dołu – powinno być „40 m”;
14. strona 25, linia 14 – styl utrudniający zrozumienie;
15. strona 27, linia 2 po (4.2) – 1 i 2 powinny być indeksami;
16. strona 28, linia 2 od dołu – brak spacji po „Przyjmując”;
17. strona 32, linia 2 od dołu – powinno być „ p_i ”;
18. strona 45 – byłoby lepiej, gdyby cel pracy miał formę zdania;
19. rozdziały 5 i 6 długością nie przystają do innych rozdziałów; można było zastosować inną redakcję;
20. strona 60, linia 6 – powinno być „8 sekund”;
21. strona 60, 2 linia po (7.8) – powinno być „do obliczenia” ;
22. strona 62, linia 9 – zastosowany styl utrudnia zrozumienie;
23. strona 99, linia 1 – powinno być „systemu”;
24. strona 100, linia 7 – przypuszczalnie powinno być „uruchomienia głównej pętli”;
25. strona 100, linia 11 – brakuje przecinka po „przerwania”, co utrudnia czytanie;
26. strona 100, linia 22 – powinno być „dokonywane”;
27. strona 105, linia 18 – powinno być „układ sterujący”;
28. strona 106, linia 8 – powinno być „podobnie jak”;
29. strona 106, linia 10 – powinno być „odbiegające”;
30. strona 107, linia 2 – powinno być „podobnie jak”;
31. strona 130, linia 7 – przypuszczalnie powinno być „określające wpływ szumów”;
32. strona 131, linia 4 – powinno być „negatywnie”;
33. strona 134, linia 5 – powinno być „których współczynniki”.

VI. Podsumowanie i wnioski końcowe

Doktorant dokonał wielokryterialnej analizy problemu hałasu oddziałującego na kierowcę pojazdu uprzywilejowanego, związanego z generacją sygnału uprzywilejowania, a także uzasadnił zastosowanie metod aktywnych do jego redukcji. Wybrał odpowiednią strukturę układu sterowania, zaproponował zastosowanie algorytmu genetycznego do adaptacji parametrów kompensatora, zbudował elektroniczny układ sterowania, przygotował

oprogramowanie wraz z optymalizacją kodu, zestawił stanowisko laboratoryjne, dokonał wielu badań symulacyjnych oraz eksperymentów laboratoryjnych, rzetelnie opracował wyniki, poprawnie wyciągnął wnioski. Bez wątplenia osiągnął postawiony w rozprawie cel oraz udowodnił obydwie tezy. Wskazał również możliwości dalszego rozwoju układu. Zrealizował badania wymagające dużej wiedzy i doświadczenia z zakresu akustyki, teorii sterowania, przetwarzania sygnałów, matematyki, statystyki, metod sztucznej inteligencji, elektroniki, informatyki oraz systemów pomiarowych.

W rozprawie nie znalazłem żadnych istotnych uchybień merytorycznych, które podważałyby postawione tezy lub uzyskane wyniki. Wymienione w punkcie III i IV recenzji usterki nie dotyczą najważniejszych elementów rozprawy, a jedynie zagadnień pobocznych, bez kluczowego znaczenia dla osiągnięcia celu i udowodnienia tez. Tekst rozprawy napisany jest stylistycznie poprawnie. Jednak znaczna liczba potknięć redakcyjnych zaburza ogólne pozytywne wrażenie.

Dorobek publikacyjny Doktoranta jest znaczący. W rozprawie odwołuje się do swych sześciu prac indywidualnych oraz dziewięciu prac zespołowych. Wśród nich znajduje się jedna w czasopiśmie Archives of Acoustics (z listy JCR), jedna w czasopiśmie Przegląd Komunikacyjny, dwie w czasopiśmie Bezpieczeństwo Pracy, a także wiele w materiałach znanych konferencji międzynarodowych. Dowodzi to, że Doktorant wielokrotnie zmierzył się już z recenzentami i znalazł uznanie dla wyników swych badań. Ponadto uczestniczył w realizacji wielu prac badawczych, jako pracownik jednostki o ugruntowanej tradycji, dbającej o rzetelność i profesjonalizm.

Reasumując, uważam, że dorobek bibliometryczny oraz badawczo-rozwojowy mgr inż. Pawła Górskiego jest znaczący, a przedstawiona do recenzji rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę. W związku z powyższym, wnoszę o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Górskiego do publicznej obrony**. Dodatkowo, biorąc pod uwagę znaczący wkład badawczy, ale również projektowy i programistyczny, osiągnięte rezultaty, a także dorobek publikacyjny, stawiam **warunkowy wniosek o wyróżnienie rozprawy**, którego ostateczne poparcie uzależniam od całości przebiegu obrony, w tym dyskusji dotyczącej zgłoszonych w recenzji uwag ogólnych.

