

Rzeszów, dn. 13 stycznia 2014 r.

dr hab. inż. Wojciech P. Rdzanek, prof. UR
Katedra Mechatroniki i Automatyki
Uniwersytet Rzeszowski
ul. Prof. St. Pigoń 1, 35-310 Rzeszów
tel.: 17-851-85-77, wprdzank@ur.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Krukowicza
pt. „Modele neuronowe w systemach aktywnej redukcji hałasu ze sprzężeniem
do przodu i nieliniową pierwotną ścieżką sygnału”.**

Oceniana praca doktorska została wykonana w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie pod kierunkiem prof. zw. dra hab. inż. Zbigniewa Engela. Promotorem pomocniczym w przewodzie doktorskim jest dr inż. Leszek Morzyński.

W pracy podjęto zagadnienie aktywnej redukcji hałasu wytwarzanego w obiekcie nieliniowym, jakim jest falowód krótki o przekroju kwadratowym bez przepływu, z umieszczoną w nim poprzecznie przegrodą w postaci płyty mosiężnej. W tym celu wykorzystano układ regulacji z siecią neuronową opartą o algorytm NARMAX (Non-Linear Autoregressive Moving Average with Exogeneous Input). Źródłem zaburzenia ośrodka był głośnik umieszczony na jednym końcu falowodu, a elementem wykonawczym reduktora hałasu głośnik umieszczony na przeciwległym końcu tego falowodu.

Ze struktury algorytmów opartych na sieciach neuronowych wynika, że są one nieliniowe i dlatego przy umiejętnym ich stosowaniu dobrze nadają się do sterowania obiektami o nieliniowych charakterystykach dynamicznych. Zaburzony ośrodek gazowy zamknięty w analizowanym układzie falowodu z przegrodą stanowi taki obiekt. Autor umiejętnie wykorzystał wiedzę dotyczącą sieci neuronowych oraz automatycznej regulacji do redukcji hałasu. Główne ograniczenia zastosowanej metody dotyczą mocy obliczeniowej urządzeń realizujących opracowane algorytmy oraz częstotliwości próbkowania sygnałów wielkości mierzonych. Daje to jednak możliwość stosowania ich w zakresie niskich częstotliwości.

Poprzez wprowadzenie zmiennego współczynnika szybkości uczenia sieci neuronowej autor uzyskał polepszenie zbieżności algorytmu strojenia wag sieci. Zrealizowano to w ten sposób, że w dużej odległości od minimum lokalnego funkcji błędu współczynnik uczenia sieci ma względnie dużą wartość, co powoduje przyspieszenie zbieżności. W małej natomiast odległości od minimum współczynnik ten jest zmniejszany, aby uniknąć przesterowania układu. W rezultacie pozwoliło to znacznie zwiększyć szybkość uczenia sieci.

Istotną zaletą wykorzystanego algorytmu NARMAX jest znacznie krótszy, nawet 20-krotnie, czas jego zbiegania się do wartości zadanej, w porównaniu do algorytmu FXBPNN. Ponadto, dla pewnych wartości częstotliwości podstawowych algorytm NARMAX pozwalał na redukcję nie tylko częstotliwości podstawowej, ale również kolejnych harmonicznych, choć w mniejszym stopniu.

Rozdz. 1 zawiera wstęp, w którym autor krótko wprowadza czytelnika w problematykę metod aktywnych redukcji hałasu. W rozdz. 2 dokonano przeglądu stanu badań na podstawie najnowszych publikacji naukowych, co prowadzi do wniosku, że jak dotąd nie podjęto badań dotyczących wykorzystania modelu układów dynamicznych NARMAX do aktywnej redukcji hałasu w przypadku występowania zjawisk nieliniowych w pierwotnej ścieżce sygnału. Autor podejmuje to zagadnienie, które jest celem pracy sformułowanym w rozdz. 3. Następnie formułuje tezę, która mówi, że: wykorzystanie modelu NARMAX pozwala na redukcję nie tylko częstotliwości podstawowej wytwarzanego hałasu, ale również jego wyższych harmonicznych, a zastosowanie metody Lapunowa do badania stabilności układu regulacji ze sprzężeniem do przodu poprawia ich skuteczność w przypadku sygnałów o charakterze stochastycznym. Rozdział 4 poświęcony jest omówieniu wykorzystania modelu NARMAX do redukcji hałasu układów dynamicznych z wykorzystaniem sieci neuronowych. W rozdz. 5 dokonano przeglądu metod badania stabilności w układach aktywnej redukcji hałasu ze szczególnym uwypukleniem metody Lapunowa w aspekcie uczenia sieci neuronowych radialnych.

Rozdział 6 zawiera wyniki szeregu analiz numerycznych aktywnej redukcji hałasu z wykorzystaniem regulatora z neuronowym modelem NARMAX oraz z wykorzystaniem algorytmu FXBPNN. Realizacja takich symulacji wymagała wcześniejszego zaprojektowania odpowiednich układów automatycznej regulacji oraz ułożenia programu. Dokonano analizy porównawczej skuteczności obu algorytmów, która pozwoliła stwierdzić teoretyczną wyższość algorytmu NARMAX. W rozdziale 7 przedstawiono stanowisko laboratoryjne oraz wyniki badań doświadczalnych. Otrzymane wyniki stanowią potwierdzenie wcześniejszych rezultatów teoretycznych. Algorytm NARMAX okazał się szybko zbieżny dla częstotliwości podstawowej zredukowanego hałasu oraz pozwalał, z nielicznymi wyjątkami, na redukcję wyższych harmonicznych. Zawsze był stabilny. Algorytm FXBPNN okazał się natomiast znacznie wolniej zbieżny, a w niektórych przypadkach również niestabilny. Rozdziały 6 i 7 zawierają oryginalne wyniki autora, potwierdzające tezę, że algorytm NARMAX dobrze nadaje się do redukcji hałasu obiektów nieliniowych. Wyniki te mają znaczenie użytkowe i wskazują na możliwość praktycznego zastosowania w redukcji hałasu układów wentylacji i klimatyzacji.

Oceniana rozprawa doktorska składa się z wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, ośmiu rozdziałów, 62 rysunków, 8 tabel i 96 pozycji bibliograficznych. Język pracy jest przejrzysty, a treść zrozumiała, układ zaś logiczny.

Ogólna pozytywna ocena recenzowanej pracy nie zwalnia recenzenta z obowiązku wypunktowania uchybień zawartych w jej tekście oraz wątpliwości wymagających dodatkowego objaśnienia:

- Str. iii „Ważniejsze oznaczenia i skróty”: Czym się różni sygnał kompensowany $d(n)$ od wektora sygnału kompensowanego \vec{d} , podobnie czym różni się $x(n)$ od \vec{x} oraz $y(n)$ od \vec{y} .
- W opisie symbolu N powinno być „w warstwie” lub „warstwy” zamiast „w warstwy”.
- W opisie okresu próbkowania T_p nie podano jednostki.
- Str. 4, 3 linia od końca: Stwierdzenie „Detektor sygnału odniesienia ... przetwarza dźwięk na postać elektryczną.” jest nieprecyzyjne. Należy wskazać wielkość fizyczną lub wielkości fizyczne, które są przetwarzane na postać elektryczną.
- Str. 9, 3 akapit: Należy sprecyzować, co autor rozumie przez „warunki pola swobodnego”?
- Str. 9, przedostatnia linia: Powinno być „Recursive” zamiast „Revursive”.
- Str. 10, wzór (2.1): Brak objaśnienia symboli „ K ” i „ M ” oraz wskazówek jak dobrać ich wartości.
- Str. 12, 3 akapit: Co autor rozumie przez rząd równania (2.1)?
- Str. 12, przedostatni akapit: Ostatnie dwa zdania wymagają przereformulowania np. następująco: „Zapewnienie... badań, których istotą jest...”. I dalej podobnie wszędzie tam, gdzie występują powtórzenia, których można uniknąć.
- Str. 13, 4 akapit: Wyraz „nonlinear” jest napisany niepoprawnie. Ostatnie zdanie należy zacząć „Autorzy wraz z wykorzystaniem...” lub „Autorzy wykorzystując opracowane algorytmy...” zamiast „Autorzy z wykorzystaniem opracowanych algorytmów osiągnęli...”. Dalszy tekst również wymaga podobnej korekty stylistycznej. Np. ostatnie zdanie, przedostatniego akapitu na str. 13. Jeśli użyto wyrazu „zarówno”, to później należy w tym samym zdaniu użyć wyrazu „jak” itd.
- Str. 14, 3 akapit: Skrót „NARMAX” należy rozwinąć po pierwszym jego użyciu. Należało go również umieścić w spisie ważniejszych oznaczeń i skrótów, gdyż jest on wielokrotnie używany w części zasadniczej pracy oraz występuje w jednej z tez. Podobnie skrót „FXBPNN” występujący na stronie nr 39.
- Str. 16, Teza 1: Czy w przypadku wyższych harmonicznym wykorzystanie metod biernych redukcji drgań i hałasu nie byłoby bardziej efektywne?
- Str. 18, ostatni akapit: Wspomniano, że falowód akustyczny z przegrodą jest źródłem zjawisk nieliniowych. Jakże to są zjawiska?
- Str. 20, 6 linia od góry: Powołano się na szeregi Volterry i Wienera. Należy powołać się na teksty źródłowe.
- Przed wzorem (4.8): Powołanie na nr wzoru w tym samym zdaniu, którego jest częścią, jest bezcelowe. Podobnie w zdaniach, w których występują wzory (4.10), (4.26),

- (4.27) i dalej.
- Równania (4.12)–(4.16), (4.28)–(4.35): Jeśli równania przedstawiają macierze Jacobiego lub wektory gradientów, to umieszczenie takiej informacji w tekście ułatwiłoby jego czytanie. Dodatkowo ostatni wyraz po prawej stronie równania (4.13) wygląda tak, jakby w mianowniku brakowało symbolu różniczki.
 - Wzór (4.35): Brak wielkości, na którą działa operator gradientu.
 - Wzory (5.1) i (5.3): Skoro prawe strony równań przedstawiają wielkości wektorowe, to lewe strony tych równań również powinny być wektorami.
 - Wzór (5.13): Użycie daszka nad symbolem „ $\hat{y}(n)$ ” wymaga wyjaśnienia.
 - W spisie oznaczeń i skrótów nie przedstawiono znaczenia symboli „BP”, „SN”, „LMS” i „C” użytych w rysunkach 4.3, 6.1 i innych.
 - Rys. 6.6–6.9: Rozmiar czcionki użytej na rysunkach powinien być porównywalny z rozmiarem czcionki użytej w tekście. Zaś czcionka użyta do opisu osi jest zbyt mała. To samo dotyczy również części kolejnych rysunków.
 - Tab. 6.1: W kolumnie zatytułowanej „Przesunięcie fazowe” nie przedstawiono jednostki.
 - Rys. 6.14–6.15: Krzywe łatwiej jest porównywać, jeśli osie na dwu rysunkach mają jednakowe zakresy. To samo dotyczy rys. 6.16–6.39.
 - Rys. 6.16–6.39: Zamieszczono względnie dużą liczbę przebiegów czasowych sygnałów regulatora. Należałoby przedstawić szerszą dyskusję otrzymanych wyników symulacji numerycznych.
 - Tab. 6.3 i 6.4: Ostatnie kolumny obu tabel przedstawiają „skuteczność” wyrażoną w decybelach. Jakiej wielkości fizycznej dotyczy omawiana „skuteczność”? Jaka wielkość fizyczna jest mierzona?
 - Str. 59, opis stanowiska laboratoryjnego: W falowodzie zamontowano przegrodę z blachy mosiężnej. Jaka była grubość blachy i jak została zamocowana (jakie były warunki brzegowe płyty)?
 - Brak powołania w tekście na rys. 7.2–7.5, co utrudnia czytanie wniosków cząstkowych.
 - Rys. 7.9–7.15: Siatki złożone z linii pionowych i poziomych utrudniają odczyt wykresów widmowych.
 - Str. 70, 1 akapit: Stwierdzono, że wyniki badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych były zbieżne. Interesująca byłaby analiza ilościowa tej zbieżności.
 - Uzyskano dobrą skuteczność algorytmu redukcji hałasu w falowodzie krótkim bez przepływu ośrodka. Pojawia się pytanie czy w przypadku falowodu z przepływem ośrodka wyniki byłyby równie dobre?
 - Pozycja bibliografii nr 58: Powinno być „Lyapunov” zamiast „lyapunow” oraz „RBF” zamiast „rbf”. Imię pierwszego autora powinno być „Sene”, a nie „Seng”, choć wy-

starczyłyby same inicjały imion. Należało umieścić nr „DOI” publikacji, gdyż jest on dostępny.

Należy wyraźnie stwierdzić, że wymienione uchybienia nie umniejszają wartości merytorycznej ocenianej rozprawy doktorskiej. W pracy rozwiązano oryginalne, nie publikowane wcześniej w literaturze, zagadnienie naukowe polegające na wykorzystaniu neuronowego modelu układu dynamicznego NARMAX do aktywnej redukcji hałasu z uwzględnieniem zjawisk nieliniowych w pierwotnej ścieżce sygnału. Przeprowadzone badania teoretyczne i doświadczalne potwierdziły słuszność postawionej tezy mówiącej, że wykorzystanie modelu układu dynamicznego NARMAX, zrealizowanego w oparciu o sieć neuronową dobrze nadaje się do redukcji hałasu w przypadku nieliniowej ścieżki pierwotnej. Przedstawione konkluzje bogato udokumentowano wynikami pomiarowymi i analizami numerycznymi. Cel pracy został osiągnięty, a postawione tezy udowodnione.

Podjęte w pracy zagadnienie jest istotne z punktu widzenia ochrony środowiska przed hałasem. Jego rozwiązanie wymagało ono od autora nie tylko zgłębienia problematyki hałasu i propagacji fal akustycznych, ale również złożonego aparatu matematycznego niezbędnego do opisu i syntezy algorytmu sieci neuronowej z modelem układu dynamicznego NARMAX. Należy podkreślić szeroki zakres pracy, który obejmuje analizę teoretyczną układów regulacji pod kątem zastosowania sieci neuronowej do redukcji hałasu obiektu nieliniowego, jakim jest falowód krótki z przegrodą, syntezę układu regulacji, symulacje numeryczne oraz badania eksperymentalne. Uzyskano dobrą zgodność wyników symulacji oraz serii eksperymentów, co wskazuje na poprawność przyjętych założeń i przeprowadzonych badań. Uzyskane rezultaty stanowią rozwiązanie oryginalnego, nie udokumentowanego wcześniej w literaturze, zagadnienia redukcji hałasu falowodu krótkiego bez przepływu z wykorzystaniem sieci neuronowej z modelem NARMAX do realizacji regulatora ze sprzężeniem do przodu i nieliniową pierwotną ścieżką sygnału. Wyniki te, a w szczególności umiejętność wykorzystania wiedzy i umiejętności dotyczących sieci neuronowych w problematyce automatycznej regulacji, a następnie do rozwiązania problemu z zakresu wibroakustyki, tj. aktywnej redukcji hałasu obiektu nieliniowego, świadczą o posiadaniu przez kandydata wymaganej ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie naukowej inżynieria środowiska i zdolności do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej w tej dziedzinie.

Oceniana praca doktorska zawiera oryginalne osiągnięcia autora o istotnej wartości naukowej oraz użytecznej i spełnia wymogi Ustawy o stopniach i tytułach naukowych. *W związku z tym zwracam się do Rady Naukowej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytut Badawczego z prośbą o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie do jej publicznej obrony.*