

Warszawa, 16 sierpnia 2019 roku

Dr hab. inż. Andrzej Myśliński, prof. PAN
Instytut Badań Systemowych PAN
ul. Newelska 6
01-447 Warszawa
e-mail: myslinsk@ibspan.waw.pl

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej magistra inż. Macieja Wasilewskiego
pt. "Adaptive stabilization algorithms for engineering systems subjected to change of structural
parameters and excitations"**

Niniejsza recenzja została przygotowana na zlecenie Sekretarza Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN Pana dr hab. Zbigniewa Ranachowskiego, prof. PAN, wyrażone w piśmie z dnia 10 czerwca 2019 r.

1. Cel i teza rozprawy

Rozprawa doktorska mgra Macieja Wasilewskiego poświęcona jest opracowaniu, analizie i numerycznej weryfikacji adaptacyjnych metod aktywnego albo półaktywnego tłumienia drgań układów mechanicznych poddanych działaniu zakłóceń losowych nieopisywanych jako szum biały.

Zagadnienia tłumienia drgań systemów mechanicznych są od wielu lat przedmiotem intensywnych interdyscyplinarnych badań. Drgania maszyn i/lub konstrukcji wywoływane różnymi zakłóceniami wywierają szkodliwy wpływ na te układy prowadząc do obniżenia ich funkcjonalnej użyteczności, zniszczenia, generowania hałasu, obniżenia komfortu pracy użytkowników. Z tych powodów od wielu lat starano się zapobiegać przyczynom powstawania drgań lub rozwijać skuteczne metody ich tłumienia. Początkowo były to pasywne metody tłumienia drgań a ostatnio pół-aktywne albo aktywne realizowane jako zadania sterowania optymalnego.

Rozważane w rozprawie zadania tłumienia drgań są formułowane jako zadania sterowania optymalnego dla systemów opisywanych układami liniowych albo dwuliniowych równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu z addytywną funkcją zakłóceń albo ze współczynnikami zależnymi od czasu. Wskaźnikiem jakości jest funkcjonal kwadratowy zależny od stanu konstrukcji i/lub funkcji sterowania interpretowany jako energia drgającego układu. Wyznaczenie sterowania optymalnego minimalizującego energię drgań układu mechanicznego jest interpretowane jako jego stabilizowanie i zredukowanie amplitudy drgań. Oryginalne zadanie sterowania optymalnego, ze względu na nieznany charakter zakłóceń, praktycznie nie może być rozwiązane istniejącymi metodami. Jest ono aproksymowane ciągiem zadań sterowania optymalnego na poszczególnych odcinkach czasu. W punktach brzegowych tych odcinków czasu następuje identyfikacja sygnału zakłócającego przy użyciu metody autoregresji. Pozwala to określić parametry układu dynamicznego modelującego zakłócenie a jednocześnie prowadzi do rozszerzenia oryginalnego stanu układu i pojawienia się nowych macierzy opisujących dodatkowo stan zakłóceń. Aby zapewnić uzyskanie stabilnych rozwiązań zadań sterowania optymalnego Autor wykorzystuje także metodę alfa przesunięcia (ang. alpha-shift) pozwalającą kontrolować margines stabilności układu sterowania. Dla układów z nagłą zmianą ich parametrów w czasie w oparciu o chwilowy pomiar stanu układu wyznacza się macierz będącą rozwiązaniem pomocniczego algebraicznego równania Lapunowa, funkcję wartości oraz sterowanie optymalne. Dla sformułowanych zadań sterowania optymalnego aproksymujących zadanie oryginalne Autor dowodzi istnienia ich stabilnych

rozwiązań. Dodatkowo Autor podaje zapis proponowanych metod w postaci algorytmicznej i podaje oszacowanie złożoności obliczeniowej tych algorytmów. Opisane algorytmy zostały wdrożone i wykorzystane do rozwiązania czterech różnych zadań sterowania optymalnego drganiami dla systemów opisywanych liniowymi lub dwuliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi. Uzyskane wyniki Autor bardzo dokładnie przedyskutował i porównał z rozwiązaniami uzyskanymi z innymi metodami, w tym LQG oraz H_∞ . Zaproponowany przez niego adaptacyjny algorytm sterowania w każdym przypadku wyznaczał lepsze sterowanie optymalne w kategoriach wskaźnika jakości i szybciej tłumił drgania układu niż istniejące algorytmy.

We wstępie rozprawy Autor sformułował na str. 3 jej cel jako „*zaprojektowanie efektywnych metod stabilizacji systemów mechanicznych podlegających nagłym zakłóceniom zewnętrznym lub nagłym zmianom parametrów wewnętrznych*”. Teza rozprawy sformułowana na stronie 11 stwierdza, między innymi, że „*... adaptacyjne metody stabilizacji systemów mechanicznych zaproponowane w rozprawie znacznie przewyższają efektywnością nieadaptacyjne metody sterowania drganiami...*”. Tezę tę Autor uzasadnia w rozprawie.

Sformułowane w powyższy sposób cel oraz teza rozprawy wskazują, że przedmiotem rozprawy jest analiza i rozwiązanie złożonego problemu technicznego z zakresu adaptacyjnego sterowania drganiami konstrukcji wywołanych nagłymi zakłóceniami. Wybór tematyki rozprawy zmierzający do opracowania efektywnych algorytmów adaptacyjnego sterowania drganiami konstrukcji podlegających działaniu nagłych zakłóceń uważam za zasadny a rozważane w niej problemy są istotne i aktualne zarówno dla teorii jak i praktyki współczesnych metod tłumienia drgań konstrukcji. Rozważane problemy sterowania drganiami stanowią bez wątpienia istotne wyzwanie algorytmiczne gdyż ze względu na złożoność obliczeń wyznaczanie dokładnych rozwiązań w rozsądnym czasie jest praktycznie niemożliwe a istnieje potrzeba opracowania skutecznych algorytmów redukujących czas obliczeń. W tym celu Autor opracował oryginalną metodę adaptacyjnego sterowania takimi konstrukcjami w oparciu o technikę sterowania optymalnego i chwilowe pomiary stanu konstrukcji aby jak najszybciej zredukować wywołane drgania i przemieścić konstrukcję do stanu początkowego. Podjęte przez Autora wyzwania badawcze wpisują się we współczesne trendy rozwoju tej dziedziny, która rozszerza swój obszar zainteresowań z metod kontrolowania na metody sterowania drganiami. Zaproponowane w rozprawie metody i algorytmy sterowania drganiami mają zastosowanie praktyczne w tłumieniu drgań maszyn i ich części, budynków, mostów czy pojazdów mechanicznych.

2. Zawartość rozprawy

Tekst 142 stronicowej rozprawy napisanej w języku angielskim został podzielony na 6 rozdziałów, 1 załącznik oraz spis literatury. W rozdziale 1 Autor sformułował cele i tezę rozprawy a także dokonał przeglądu literatury z zakresu adaptacyjnego sterowania drgającymi konstrukcjami mechanicznymi.

Ogólne zadanie sterowania optymalnego dla zagadnienia dynamicznego opisywanego układem równań różniczkowych zwyczajnych sformułowano w rozdziale 2. Dla tego zadania sformułowano warunki konieczne i wystarczające optymalności wykorzystując metodę rachunku wariacyjnego, zasadę maksimum Pontriagina oraz zasadę optymalności Bellmana. Opisano suboptymalną metodę sterowania adaptacyjnego wykorzystaną w rozprawie. Sformułowano szczególne zadania aktywnego sterowania optymalnego dla zagadnień dynamicznych opisywanych liniowym układem równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu z 1) zaburzeniami powodowanymi działaniem zewnętrznych sił losowych 2) ze zmiennymi parametrami układu dynamicznego. Jako trzecie zadanie szczególne sformułowano zadanie półaktywnego sterowania optymalnego dla zagadnienia dynamicznego opisywanego dwuliniowym układem równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu z zaburzeniami powodowanymi działaniem zewnętrznych sił losowych.

W rozdziałach 3 i 4 opisano metody rozwiązywania szczególnych zadań sterowania optymalnego sformułowanych w rozdziale 2. Metodę rozwiązania zadania sterowania aktywnego albo półaktywnego dla układów z losowym zakłóceniem opisano w rozdziale 3. Zmienny w czasie sygnał zakłócający aproksymowano w przedziale $[t_i, t_{i+1})$, $i=0, \dots, N-1$, liniowym równaniem różniczkowym zwyczajnym z takimi stałymi współczynnikami, że generowany sygnał wyjściowy jest w przybliżeniu równy sygnałowi zakłócającemu. Powoduje to rozszerzenie oryginalnego wektora stanu układu o wektor opisujący zakłócenia. Autor wprowadza dwie metody identyfikacji parametrów uogólnionego układu: metodę autoregresji oraz metodę parametryczną oparte na pomiarze zakłóceń w chwilach t_i . Zakładając liniową zależność funkcji sterowania od stanu układu Autor wyznacza z równania Riccatiego macierz proporcjonalności dla zadania ze skończonym horyzontem czasowym. Stosując powyższe metody oraz technikę alfa przesunięcia Autor wyznacza sterowanie dla zadania z nieskończonym horyzontem czasowym. Wprowadzając założenia dotyczące stabilizowalności i wykrywalności macierzy zmodyfikowanego równania stanu oraz wykorzystując z literatury twierdzenia o stabilności rozwiązań równań różniczkowych zwyczajnych, nakładając dodatkowe warunki na parametr przesunięcia alfa, Autor dowodzi, że dla sformułowanych zadań sterowania optymalnego istnieją stabilne rozwiązania tj. sterowania zapewniające tłumienie oscylacji stanu układu. W sekcji 3.4 Autor udowadnia stabilność asymptotyczną półaktywnego układu sterowania drganiami z zaburzeniem zewnętrznym wykorzystując technikę funkcji Lapunowa.

W rozdziale 4 opisano metodę rozwiązania zadania sterowania optymalnego z kwadratowym funkcjonalem jakości dla układu dynamicznego z parametrami zmiennymi w czasie. Układ ten jest aproksymowany na podprzedziale czasu $[t_i, t_{i+1})$, $i=0, \dots, N-1$, ciągiem układów liniowych ze stałymi parametrami a rozwiązanie oryginalnego zadania sterowania polega na rozwiązaniu ciągu zadań sterowania na poszczególnych podprzedziałach ze wskaźnikiem jakości na przedziale $[t_i, \infty)$. Wykorzystując technikę funkcji wartości Bellmana, liniową zależność sterowania od stanu oraz równanie Lapunowa Autor podał formułę sterowania optymalnego i pokazał, że zapewnia ono asymptotyczną stabilność oryginalnego układu. W sekcji 4.2 Autor opisał metodę szacowania funkcji wartości w oparciu o pomiary stanu układu w momentach czasu t_i . Algorytmy opisane w rozdziałach 3 i 4 wykorzystano do rozwiązania czterech zadań sterowania optymalnego.

W rozdziale 5 zaprezentowano wyniki numeryczne uzyskane przy użyciu metod opisanych w rozdziałach 3 i 4. Rozwiązano zadania aktywnego tłumienia drgań maszyny wiertniczej oraz 20 piętrowego budynku, zadanie półaktywnego tłumienia drgań belki obciążonej przesuwającym się obciążeniem, zadanie aktywnego tłumienia drgań konstrukcji ze zmienną macierzą sztywności. Każde zadanie sterowania rozwiązano metodą adaptacyjną opracowaną przez Autora oraz co najmniej jedną metodą z pośród: H_∞ , LQG, LQR. Otrzymane wyniki wskazują, że najlepsze wyniki tłumienia drgań rozważanych konstrukcji mechanicznych zapewnia metoda adaptacyjna Autora.

W rozdziale 6 omówiono najważniejsze wyniki uzyskane w rozprawie i wskazano kierunki dalszych prac badawczych. W załączniku 1 opisano metodę identyfikacji parametrów uproszczonego modelu (5.33) 20 piętrowego budynku w oparciu o pomiary jego przemieszczenia.

Rozprawę zamyka spis literatury składający się ze 118 pozycji obejmujący zarówno monografie jak i artykuły publikowane w czasopismach oraz materiałach konferencyjnych o zasięgu międzynarodowym dotyczące matematycznej teorii sterowania optymalnego, programowania dynamicznego, metody H_∞ , sterowania stochastycznego, aktywnego i półaktywnego tłumienia drgań, metod numerycznych.

3. Ocena merytoryczna

Rozprawa zawiera obszerny przegląd literatury przedmiotu dotyczący teorii regulacji oraz teorii sterowania optymalnego układów o parametrach skupionych ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania tych metod w tłumieniu drgań różnych systemów mechanicznych oraz metod numerycznych. Wskazuje to na rozległą wiedzę Autora z zakresu przedmiotu rozprawy. Pewną

słabością przedmiotowego przeglądu jest mały krytycyzm Autora w stosunku do cytowanych źródeł literatury.

Rozprawa zawiera wiele oryginalnych wyników Autora w dziedzinie metod sterowania adaptacyjnego mechanicznymi układami drgającymi. Stanowi ona oryginalne zastosowanie znanych z literatury metod sterowania optymalnego oraz identyfikacji. Zaproponowana przez Autora metoda adaptacyjnego sterowania wykorzystująca technikę autoregresji lub technikę pomiaru stanu do identyfikacji nieznanymi parametrów układu drgającego oraz technikę alfa przesunięcia, metodę Lapunowa lub metodę funkcji wartości czyni z niej faktycznie nową metodę sterowania adaptacyjnego o zwiększonej skuteczności w stosunku do metod znanych w literaturze lub o możliwości zastosowania w praktyce przemysłowej w czasie rzeczywistym. Rozprawa ma przede wszystkim charakter pracy numerycznej, w której główny nacisk położono na numeryczną weryfikację zaproponowanej metody sterowania. W implementowanych algorytmach numerycznych zawartych jest wiele oryginalnych idei Autora wynikających z jego obserwacji przeprowadzanych symulacji komputerowych. Numeryczny charakter rozprawy powoduje, że mieści się ona w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Należy też podkreślić znaczny wysiłek Autora aby oprócz numerycznej weryfikacji teoretycznie uzasadnić poprawność zaproponowanej metody sterowania adaptacyjnego poprzez sformułowanie i udowodnienie twierdzeń o istnieniu rozwiązań optymalnych stabilizujących drgający układ mechaniczny. Realizacja rozprawy wymagała od Autora dużego wysiłku w zakresie wykorzystania z literatury wyników dotyczących stabilności układów liniowych oraz wysiłku programistycznego jak i systematyczności w przeprowadzaniu dużej liczby symulacji komputerowych. Oryginalne osiągnięcia Autora prezentowane w rozprawie obejmują:

- Zaproponowanie oryginalnej metody adaptacyjnego sterowania optymalnego układami drgającymi opartej na pomiarze stanu systemu lub identyfikacji sygnału zakłócającego metodą autoregresji:
 - dla systemów opisywanych liniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi z addytywnym zakłóceniem wykorzystującej technikę alfa przesunięcia (str. 44),
 - dla systemów opisywanych dwuliniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi z addytywnym zakłóceniem wykorzystującej metodę Lapunowa i technikę alfa przesunięcia (str. 56),
 - dla systemów opisywanych liniowymi równaniami różniczkowymi zwyczajnymi ze zmiennymi parametrami wykorzystującej metodę funkcji wartości (str. 65).
- Udowodnienie istnienia sterowania stabilizującego dla rozważanych zadań sterowania układów drgających z zakłóceniami natury stochastycznej (str. 42, 47, 54, 62),
- Numeryczne zweryfikowanie skuteczności zaproponowanych metod sterowania poprzez rozwiązanie czterech zadań sterowania optymalnego dla układów opisujących drgania maszyny wiertniczej, 20 piętrowego budynku, toru pojazdu mechanicznego po którym przesuwa się siła skupiona, systemu mas i sprężyn ze zmieniającą się nagle sztywnością jednej ze sprężyn i przedyskutowanie wyników numerycznych (str. 72-86, 98-105, 114-119, 122-124).

Uzyskane wyniki zostały opublikowane w języku angielskim w sześciu pracach powstałych w latach 2016-2019 we współpracy z Promotorem, Promotorem Pomocniczym oraz członkami zespołu projektowego. Dwie z tych prac zostały opublikowane w czasopiśmie międzynarodowych o wysokiej renomie, jedna w czasopiśmie specjalistycznym a pozostałe trzy w materiałach reprezentatywnych konferencji międzynarodowych. Oznacza to, że proponowane rozwiązania zostały poddane weryfikacji międzynarodowej społeczności akademickiej co znacząco wzmacnia przedstawione w rozprawie idee i wyniki. Autor jest pierwszym współautorem wszystkich tych prac.

Autor prawidłowo i we właściwy sposób sformułował zagadnienie badawcze. Wykorzystując istniejące algorytmy i techniki sterowania oraz metody identyfikacji zaproponował on nową metodę sterowania adaptacyjnego układami drgającymi. Ponadto wykorzystał on nowoczesne narzędzia

modelowania komputerowego uzyskując oryginalne wyniki numeryczne potwierdzające przydatność i efektywność zaproponowanej metody do tłumienia drgań układów mechanicznych. Przeprowadzona analiza teoretyczna oraz wykonane prace programistyczne i wdrożeniowe a także uzyskane wyniki numeryczne pozwoliły Autorowi na udokumentowanie słuszności poczynionych założeń, udaną realizację założonych celów rozprawy i tym samym potwierdzenie oraz udowodnienie sformułowanej tezy rozprawy. Przedstawiona rozprawa posiada również walory aplikacyjne. Zaproponowana metoda może być wykorzystana w tłumieniu drgań maszyn lub ich części, pojazdów mechanicznych oraz budynków.

4. Ocena redakcyjna i językowa rozprawy

Rozprawa jest zredagowana bardzo starannie. Układ treści rozprawy jest logiczny i prawidłowy oraz podporządkowany uzasadnieniu tezy rozprawy. Rozprawa napisana jest poprawnym językiem angielskim. Problem badawczy, metoda jego rozwiązania oraz uzyskane wyniki numeryczne są najczęściej opisane w zrozumiały sposób. Większość pozycji literatury zawiera numer DOI lub ISBN. Zamieszczone tabele i rysunki są czytelne, starannie opisane w tekście i zrozumiałe. Znaczna część rysunków jest różnokolorowa, co tym bardziej ułatwia czytelnikowi ich analizowanie.

5. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Recenzowana praca obok wymienionych zalet ma również pewne słabe strony. Należą do nich między innymi:

Uwagi ogólne:

- 1) Autor nie zdefiniował w pracy w ścisły sposób używanych pojęć takich jak stabilność, sterowalność, zupełna sterowalność, stabilizowalność, obserwowalność, wykrywalność układu sterowania. Pojęcie stabilności, kluczowe w pracy, jest opisane pośrednio jako minimalizacja energii układu drgającego.
- 2) W sekcji 2.3 Autor mógłby podać założenia dotyczące macierzy **M**, **C**, **K**, **D**. Już w (2.34) użyta jest macierz odwrotna \mathbf{M}^{-1} macierzy **M** co wymaga co najmniej założenia o nieosobliwości macierzy **M**.
- 3) Na str. 26-27 oraz 30-31 Autor wprowadza dyskretyzacje (3.8) oraz (3.21) układów ciągłych, odpowiednio, (3.4) oraz (3.1). W tym celu Autor używa indeksów i , k czy i_T nie definiując ani ich znaczenia ani zakresu. Przedstawione opisy są niejasne.
- 4) W rozdziałach 3.3 i 3.4 Autor wprowadza i stosuje technikę alfa przesunięcia, odpowiednio, w wersji dyskretnej i ciągłej. Powołuje się przy tym na pracę 12 ze spisu literatury.
 - a. Na str. 37, pierwszy akapit od góry, Autor stosuje tą technikę w odniesieniu do dyskretnego zadania sterowania i zamiast funkcji wykładniczej wykorzystuje funkcję potęgową z podstawą $\alpha_i < 1$. W zestawieniu z pracą 12 założenie to wydaje się niewystarczające - $\alpha_i \in (0, 1)$?
 - b. Tą samą technikę Autor stosuje na str. 47 w odniesieniu do ciągłego zadania sterowania (3.79). Twierdzenie 3.3 jest niejasne zarówno jeśli chodzi o założenia jak i tezę. Domyślam się, że niezdefiniowany symbol $\Re(\lambda_{n_z,i})$ oznacza część rzeczywistą wartości własnej $\lambda_{n_z,i}$ macierzy $A_{z,i}$? Dla wszystkich części rzeczywistych wartości własnych wykładnik $\alpha_i < 0$ co przeczy wynikowi w pracy 12 gdzie $\alpha > 0$? Teza twierdzenia stwierdza, że „*istnieje zmodyfikowany wskaźnik jakości (3.79)*”? Czy chodzi o istnienie wskaźnika jakości czy rozwiązania zadania (3.79)?
- 5) W rozdziałach 5.1-5.4 Autor porównuje działanie dwóch lub trzech algorytmów sterowania wskazując, że algorytm adaptacyjny daje najlepsze wyniki w sensie wartości funkcjonału jakości czy szybkości tłumienia wzbudzonych drgań. Czy Autor mógłby podać w postaci

tabelarycznej i porównać nakład pracy w jednostkach czasu czy ilości iteracji niezbędny do uzyskania rozwiązania zadania sterowania przy użyciu każdej z tych metod? W obecnym zapisie te informacje rozrzucone są w tekście pracy np. str. 36, wiersze 1-6 od góry. Jakie wartości parametru przesunięcia α_i wykorzystano w algorytmie aby zapewnić stabilność rozwiązań?

Uwagi szczegółowe:

- 1) Str. 15 – symbole T_f oraz T nie są zdefiniowane (definicja T pojawia się na str. 16 w (2.3)),
- 2) Str. 18 – czy warunek (2.20) jest sformułowany dla zadania (2.3)?
- 3) Str. 20, (2.26) - czas $t \in [t_i, t_{i+1})$? Funkcja f_i pośrednio zależy od czasu t ?
- 4) Str. 29, (3.19) - R_{LSE} jest funkcją rzędu j ? Czy w (3.12) nie można minimalizować dodatkowo względem rzędu j ?
- 5) Str. 32, pierwszy akapit od góry - komentarz zbędny. Sugeruje, że macierz R jest tak dobierana aby nie było ograniczeń na sterowanie? Macierz ta w (3.25) regularyzuje zadanie (3.26).
- 6) Str. 36 – pojęcia stabilizowalności oraz wykrywalności układu liniowego powinny być zdefiniowane przed podaniem założeń 3.1 i 3.2. Pojęcia te są pośrednio wyjaśnione w akapicie poniżej założenia 3.2 ale nieprecyzyjnie. Do opisu wprowadzono niezdefiniowaną macierz C – chodzi zapewne nie o macierz tłumienia ale o macierz wyjścia układu, która nie występuje w zapisie (3.24)?
- 7) Str. 37, (3.40) – brakuje założenia o odwracalności macierzy M .
- 8) Str. 41, (3.56) – macierze Z_i , $i=1, \dots, 4$, są nie zdefiniowane.
- 9) Str. 42, Lemat 3.2 – w jaki sposób wykorzystuje się w dowodzie tego lematu założenie 3.4? Macierz (3.62) nie zależy od macierzy Q ?
- 10) Str. 52, wiersz 8 od góry – (3.109) wynika zarówno z (3.99) jak i (3.100)?
- 11) Str. 58, wiersze 9-10 od góry – dlaczego zadanie (4.3) nie zależy od czasu? W tym zadaniu $t \in [t_i, t_{i+1})$ a wektor stanu i wektor sterowania zależą od czasu t ? Tylko macierze są stałe w czasie.
- 12) Str. 59, (4.7) – co oznacza tutaj symbol t ?
- 13) Str. 59, (4.11) – skąd wynika wykładnicza stabilność rozwiązań zagadnienia (4.11)?
- 14) Str. 61, wiersz pierwszy od góry – czy definicja macierzy K_{i+1} , odmienna od (4.14), nie powinna być wyeksponowana i umieszczona w założeniach Lematu 4.1? Dlaczego (4.21) wynika z (4.20)?
- 15) Str. 76, Rys. 5.4b i opis pod rysunkiem – skąd wynika taki przebieg sterowania u dla $t \sim 0$?
- 16) Str. 77, Rys. 5.8 a, b – wydaje się, że wielkość g nie ma wpływu na wyznaczanie prędkości kątowej?
- 17) Str. 78, Rys. 5.9 – czy $\omega=10$ 1/s odpowiada $t=1$ s?
- 18) Str. 84, Rys. 5.17 i jego opis w tekście jest niejasny – ad a) legenda w prawym górnym rogu dotyczy h ? Dla $T_S=0.003$ s układu nie można stabilizować? ad b) dlaczego zakres h jest znacznie większy niż na rysunku a)?
- 19) Str. 85, Rys. 5.18 - skoro wystarczy ustalić $T_{horizon}=1$ to po co przyjęto $T_f=8$ s? czy $n=3$ jest optymalnym rzędem aproksymacji AR w (3.10)?
- 20) Str. 95, wiersz 6 od dołu – skąd wynika przyjęta wartość siły 897 kN? Czy macierz (5.50) nie dominuje członem z macierzą Q ?
- 21) Str. 107, Tabela 5.12 – pozycje podpór a_j , $j=1, \dots, 4$, są podane błędnie.
- 22) Str. 121, 3 wiersz od dołu – skąd wynika to założenie? Czy stanem początkowym nie powinien być ostatni stan systemu przed zmianą parametrów?
- 23) Str. 123, Rys. 5.51 – sterowanie adaptacyjne wydaje się być bardzo zmienne dla $0 < t < 10$ s. Czy podane wartości tego sterowania są uśrednione?

6. Uwagi redakcyjne i językowe

Mimo dużej staranności w opracowaniu rozprawy pewne mankamenty występują również w jej redakcji. Wiele używanych symboli jest niezdefiniowanych albo zdefiniowanych w innych miejscach pracy po ich pierwszym użyciu. Symbole t i h czy P_i są używane często w różnych znaczeniach. Autor mógłby wprowadzić spis oznaczeń aby ułatwić czytelnikowi studiowanie rozprawy. W rozdziale 6 zamiast powtórzenia opisu zawartości pracy Autor mógłby sformułować bardziej syntetyczne wnioski. W tekście rozprawy zauważyłem kilka błędów literowych. Wydaje mi się, że stylistyka niektórych zdań mogłaby lepiej odzwierciedlać gramatykę języka angielskiego (np. str. 1, wiersze 9-10 od dołu, str. 2 wiersz 10 od góry, str. 50, wiersz 9 od dołu).

7. Podsumowanie

Powyższe uwagi krytyczne i dyskusyjne nie mają zasadniczego wpływu na moją bardzo pozytywną opinię o rozprawie. Autor poprawnie sformułował nietrywialny problem badawczy tłumienia drgań układu mechanicznego poddanego losowym zakłóceniom mający duże znaczenie praktyczne. Problem ten Autor samodzielnie i w oryginalny sposób rozwiązał stosując zaproponowaną przez siebie metodologię opartą na wykorzystaniu adaptacyjnej metody sterowania. Wykazał się bardzo dobrą znajomością metod aktywnego lub półaktywnego tłumienia drgań, metod wyznaczania sterowania optymalnego, metod identyfikacji układów mechanicznych oraz nowoczesnych metod obliczeniowych jak również pomysłowością, systematycznością i pracowitością w przygotowaniu oraz przeprowadzeniu znacznej liczby symulacji komputerowych. Wykazuje cechy predysponujące go do pracy naukowej.

Uważam, że rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez przepisy określone w art. 13 ust. 1 -2 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku z późn. zm. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wnioskuje o dopuszczenie Pana Macieja Wasilewskiego do jej publicznej obrony celem uzyskania stopnia doktora w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Przedkładam również wniosek o wyróżnienie tej rozprawy ze względu na jej wysoką wartość merytoryczną, oryginalność ujęcia tematu, teoretyczne i numeryczne uzasadnienie skuteczności zaproponowanej metody, szeroki różnorodny zakres zrealizowanego programu badań numerycznych oraz uzyskane interesujące wyniki, które już zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym: *Automation in Construction* oraz *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*.

A. Myśliński

Andrzej Myśliński

