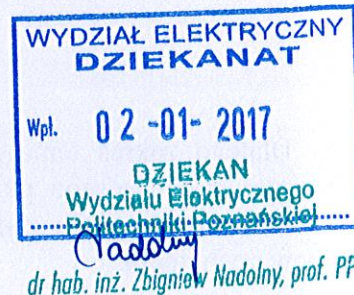


Dr hab. inż. Andrzej Dębowski, prof. nadzw. UTP
Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki
Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Macieja Gniadka
pt: "Kształtowanie sygnału zadanego w sterowaniu
elektromechanicznych układów drgających"
opracowana na zlecenie Rady Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej z dnia 27 października 2016 r.

1. Zakres tematyczny rozprawy

Rozprawa poświęcona jest problematyce sterowania układami drgającymi w warunkach przemysłowych, spełniającymi podwyższone wymagania dotyczące dokładności odtwarzania zadawanych wartości ich sygnałów wyjściowych, ze szczególnym uwzględnieniem stanów dynamicznych. Należy przez to rozumieć unikanie nadmiernych oscylacji w pracy pewnych urządzeń technologicznych, dla których budowa normalnych układów sterowania opartych na sprzężeniach zwrotnych od pomierzonych sygnałów wyjściowych jest bardzo utrudniona ze względów technicznych lub wręcz nieuzasadniona ze względów ekonomicznych. W ogólnym podejściu tematyka dotycząca syntezy układów sterowania dla obiektów wykazujących dużą skłonność do oscylacji jest bardzo szeroka. W przypadku wielu takich obiektów spotykanych w zastosowaniach przemysłowych występują jednak poważne trudności w dokonywaniu na bieżąco dokładnych pomiarów niektórych sygnałów wyjściowych, istotnych z punktu widzenia odtwarzania informacji o niedostępnych zmiennych stanu (np. odchylenia kąтового od pionu i jego pochodnych dla liny zawiesia w suwnicy lub dźwigu, albo położenia kąтового wału i jego pochodnych w różnych miejscach wielomasowego wału elastycznego). Konstruowanie typowych znanych w automatyce nadążnych układów sterowania o dużej dokładności jest zatem w takich przypadkach skomplikowane i kosztowne. Dlatego w przypadku posiadania pełnej informacji o obiekcie, sygnale zadającym oraz o występujących zakłóceniach, wystarcza na ogół ograniczenie się do właściwego zaprojektowania układów sterowania programowego działających w systemie otwartym. Tematyka ta jest ciągłym przedmiotem zainteresowania badaczy zajmujących się rozwijaniem i gromadzeniem wiedzy dotyczącej teorii i praktyki związanych ze sterowaniem urządzeń przemysłowych.

W recenzowanej rozprawie jej autor przy poszukiwaniu metody skutecznego tłumienia drgań w układach sterowania wybranymi obiektami skłonnymi do znacznych oscylacji zupełnie słusznie ograniczył się do poprawienia skuteczności kształtowania sygnału zadanego, czyli do projektowania części otwartych układów sterowania. Z teoretycznego punktu widzenia problem wydaje się być prosty, bowiem jeśli znany jest dokładny model matematyczny sterowanego obiektu, to jako układ zadawania, będący rodzajem kompensatora, mógłby być użyty po prostu układ stanowiący odwrócony, w sensie matematycznym, model tego obiektu. Po złożeniu opisu dwóch takich członów połączonych szeregowo otrzymalibyśmy po prostu tożsamość, a więc sygnał wyjściowy w takim układzie wypadkowym wiernie odtwarzałby sygnał zadający. Kłopot polega na tym, że nawet dla znanego dokładnego modelu matematycznego obiektu sterowania praktycznie niemożliwe jest wierne zrealizowanie (nawet na drodze numerycznej) jego modelu odwrotnego, a ponadto sygnał sterujący, pośredniczący fizycznie pomiędzy układem sterującym (czyli tym modelem odwrotnym) a obiektem sterowanym, podlega różnym rzeczywistym i umownym ograniczeniom, co uniemożliwia dokładne osiągnięcie tożsamości przy odtwarzaniu sygnału zadającego.

Dlatego zakres tematyczny recenzowanej rozprawy uważam więc za nadal aktualny i ważny z naukowego punktu widzenia, a nowe propozycje jej autora dotyczące sposobu kształtowania sygnału zadanego uważam za wartościowe i nadające się do praktycznego upowszechnienia.

2. Charakterystyka rozprawy i omówienie uzyskanych wyników

Recenzowana rozprawa liczy łącznie 196 stron i obejmuje: spis oznaczeń głównych i pomocniczych, zasadniczą treść podzieloną na 9 rozdziałów, wykaz literatury zawierający 148 pozycji, oraz załącznik w postaci płyty CD.

W rozdziale pierwszym, stanowiącym wprowadzenie do rozprawy, autor zawarł swój komentarz do aktualnego stanu wiedzy dotyczącej tematyki swojej pracy, scharakteryzował jej cel naukowy i sformułował tezę rozwinętą do postaci trzech podpunktów. W końcowej części tego rozdziału zwięźle przedstawił uzasadnienie celowości zastosowania modelowania matematycznego i symulacji komputerowych jako wybranej przez siebie metody dowiedzenia ich prawdziwości. Takie podejście pozwala bowiem łatwo dokonywać modyfikacji w badanych algorytmach sterowania, bez konieczności kłopotliwej (lub często wręcz niemożliwej) ingerencji w trudno dostępne elementy funkcjonalne w typowych sterownikach programowalnych, spotykanych na ogół w zastosowaniach przemysłowych.

Początkowa część rozprawy, obejmująca rozdziały od drugiego do piątego poświęcona została omówieniu układów sterowania stacjonarnymi obiektami drgającymi, czyli obiektami w których parametry opisujące modele matematyczne tych obiektów można uznać za stałe w czasie. Uściślenia klasy rozważanych obiektów sterowania dokonano w rozdziałach drugim i trzecim. Poświęcone one zostały opisowi modeli matematycznych dwóch typów obiektów sterowania wykazujących drgania, jakimi są elektromechaniczny napęd układu wielomasowego (występującego w takich urządzeniach jak ramiona robotów, transportery czy serwomechanizmy) oraz napęd typowej suwnicy, zaimplementowanych w programie Matlab-Simulink. Dalszy ciąg tej części można potraktować jako bardziej szczegółową prezentację zakresu badań przeprowadzonych przez doktoranta oraz przedstawienia związanego z tym wyborem aktualnego stanu wiedzy. Rozdziały czwarty i piąty stanowią wynik zastosowania wiedzy zdobytej przez doktoranta dotyczącej proponowanych dotychczas w literaturze metod sterowania obiektami o dużej skłonności do drgań w przypadku obu wymienionych wyżej typów obiektów, rozważanych w pracy. W rozdziale czwartym zaprezentowano przyjęte przez autora kryteria oceny jakości badanych układów, zaś w rozdziale piątym wyniki badań symulacyjnych dla wybranych na podstawie literatury klasycznych algorytmów sterowania wybranymi dwoma typami obiektów drgających, czyli napędem wielomasowym i napędem suwnicy, bez wykorzystywania możliwości kształtowania sygnału zadanego.

Rozdział szósty rozpoczyna główną część ocenianej rozprawy poświęconą kształtowaniu sygnału zadanego, czyli zasadniczemu przedmiotowi rozważań autora. W tym rozdziale skupił się on na omówieniu wybranych algorytmów dotyczących kształtowania sygnału zadanego jako podstawowego sposobu rozwiązania rozważanego problemu w przypadku stacjonarnych obiektów drgających. Omówiono tu szereg często spotykanych w dotychczasowej praktyce inżynierskiej metod, takich jak: sterowanie z ograniczeniem zrywu, kształtowanie sygnału wielomianowymi funkcjami sklejanymi, czy też użycie odpowiednich układów filtracji wartości zadanej, takich jak filtry pasmowo-zaporowe. Omówiono tu także istotę rozważanego w rozprawie podejścia do sterowania obiektami drgającymi nazywanym w literaturze metodą IS (z ang. *input shaping*). Rozważania teoretyczne oraz wyniki pomocniczych symulacji opisane w tym rozdziale mogą stanowić odniesienie dla porównania efektywności działania autorskich układów sterowania zaproponowanych w dalszej części rozprawy.

W rozdziale siódmym, na przykładzie wybranej suwnicy bramowej opisanej jako przykład w bibliotece programu Matlab, autor przedstawia wyniki swoich rozważań dotyczących niestacjonarnych drgających obiektów sterowania. Silna niestacjonarność obiektu sterowania wynika tu ze zmiennej długości liny zawiesia. Rozwiązania problemu przedstawione w tym rozdziale obejmują strojenie parametrów bloku kształtowania sygnału poprzez dobieranie ich wartości wybranymi metodami. Po przeanalizowaniu możliwości kształtowania sygnału zadawanego wynikających z zastosowania znanych w tej dziedzinie metod tzw. sterowania odpornego i super-odpornego dotyczącego przypadku obiektów stacjonarnych, autor omówił wyniki badań modelu obiektu niestacjonarnego sterowanego za pośrednictwem filtra sygnału zadającego strojonego według własnych autorskich algorytmów opartych na metodach samo-strojenia (z ang. *autotuning*), harmonogramowania, czyli programowej zmiany parametrów filtra w zależności od aktualnego punktu pracy obiektu (z ang. *gain scheduling*), adaptacji w oparciu o identyfikację obiektu opartą na wykrywaniu częstotliwości drgań własnych z użyciem transformacji FFT (z ang. *fast Fourier transform*), oraz strojonego metodą wykorzystującą optymalizację PSO (z ang. *particle swarm optimization*).

W rozdziale ósmym zostały omówione wyniki weryfikacji eksperymentalnej wybranych autorskich metod kształtowania sygnału zadanego przeprowadzone w warunkach przemysłowych. Obiektem sterowania był rzeczywisty transporter przemysłowy podwieszany zainstalowany w hali produkcyjnej fabryki Amica S.A. Obiekt ten łączył w sobie naturę obu rozważanych w pracy typów obiektów drgających (układu wielomasowego – od strony połączenia maszyny napędowej i łańcucha transportującego detale oraz wahadła – od strony zawieszek do transportowanych detali). Transporter ten sterowany był za pomocą urządzeń firmy SIMENS: napędzany dwoma napędami Sinamics G120 sterowanymi przy użyciu sterownika programowalnego serii Simatic S7-1200 i obsługiwany za pośrednictwem prostych paneli serii KT Basic.

Rozdział dziewiąty zawiera podsumowanie prac badawczych przeprowadzonych przez autora w trakcie przygotowywania rozprawy, jego ocenę możliwości praktycznej implementacji omawianych układów kształtowania sygnału zadanego oraz uwagi dotyczące kierunków dalszych badań. Co warto podkreślić, rozdział ten kończy analiza SWOT, ważna z punktu widzenia marketingowego, dotycząca możliwości upowszechnienia zastosowania układów kształtowania sygnału zadanego układach automatyki przemysłowej.

Układ ocenianej rozprawy i jej redakcja są poprawne. Praca zawiera właściwie sformułowane tezy, których prawdziwość w pełni wykazano, zarówno od strony teoretycznej (obejmującej także symulacje komputerowe) jak i praktycznej – w rzeczywistych warunkach przemysłowych. Rozprawa związana jest ściśle z dotychczasowymi doświadczeniami zawodowymi autora i dowodzi jego dobrej orientacji w zagadnieniach sterowania obiektami wykazującymi dużą skłonność do drgań.

3. Oryginalne osiągnięcia

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnień badawczych związanych z syntezą układów sterowania obiektami drgającymi. Zainteresowanie autora tą tematyką zostało zainspirowane potrzebami praktycznymi wynikającymi z jego doświadczeń zawodowych. W fabryce sprzętu AGD Amica Wronki S.A., jego miejscu pracy, transporter detali używany na lakierniczej linii produkcyjnej co pewien czas był raptownie zatrzymywany z różnych powodów (awarie, przerwy technologiczne, brak odbioru detali w wyniku zakłóceń procesu produkcyjnego, zadziałania układów bezpieczeństwa). Każdorazowe zatrzymanie i uruchomienie transportera powodowało szkodliwe oscylacje detali na nim zawieszanych, a w wyniku tego ich uszkodzenia, spowodowane obijaniem się o siebie lub znajdujące się w pobliżu elementy linii technologicznej, bądź wręcz ich zniszczenie po spadnięciu z zawieszek.

Pojawiające się w wyniku tego dodatkowe koszty produkcji skłoniły autora do podjęcia działania umożliwiającego ich uniknięcie, bądź choćby tylko odczuwalne ograniczenie. Według mojej oceny podejście takie należy ocenić bardzo pozytywnie, zwłaszcza, że zakończyło się ono sukcesem.

Autor mając na względzie potrzebę praktycznego rozwiązania wyżej wymienionego problemu technicznego pokusił się o sformułowanie zadania tak, by stanowiło ono pewien problem naukowy. Wspólnie z promotorem zdecydował, by podstawą rozważań był pomysł polegający na kształtowaniu sygnału zadającego w oparciu o wspomnianą już wyżej metodę IS (z ang. *input shaping*). Metoda ta wywodzi się z tzw. sterowania POSICAST, opatentowanego przez O. Smtha w 1957 roku, pozwalającego na uniknięcie niepożądanych oscylacji w liniowym układzie drgającym drugiego rzędu poprzez podzielenie zmiany sygnału zadającego na dwie odpowiednio dobrane skokowe zmiany. W późniejszych publikacjach na ten temat (także tych z udziałem doktoranta jako współautora) wykazano, że uogólnienie tego podejścia na układy dynamiczne wyższego rzędu może być osiągnięte dzięki wprowadzeniu filtracji sygnału zadającego polegającej na wykonywaniu w czasie rzeczywistym operacji splotu tego sygnału z dodatkowymi impulsami dobranymi odpowiednio do częstotliwości rezonansowych obiektu. Ponadto wykazano, że znaczący wpływ na skuteczność tłumienia oscylacji na wyjściu obiektu może mieć nie tylko kształtowanie sygnału zadanego metodą IS, ale i połączone z tym kształtowanie w podobny sposób sygnału sterującego obiektem.

Doktorant przygotowując swoją rozprawę wykazał się rozległą wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością prowadzenia samodzielnych badań naukowych. Samodzielnie wdrożenie do praktyki w warunkach przemysłowych uzyskanych w tej rozprawie oryginalnych wyników wykonanej pracy badawczej, wykorzystane tu jako dodatkowe potwierdzenie (poza symulacjami komputerowymi) poprawności zaproponowanych algorytmów sterowania, stanowi doskonały przykład autentycznego działania innowacyjnego, pożądanego w naszych obecnych krajowych warunkach.

Dążąc do wykazania słuszności tez sformułowanych w rozprawie, wynikających z uogólnienia wspomnianego wyżej problemu technicznego, autor rozprawy uzyskał kilka oryginalnych wyników naukowych, między którymi chciałbym wyróżnić opracowanie:

- modelu matematycznego dla rozważanego rzeczywistego obiektu sterowania,
- algorytmu identyfikacji częstotliwości rezonansowych obiektu sterowania,
- algorytmów strojenia parametrów układów kształtowania sygnału zadanego metodą samostrojenia, metodą IS (*input shaping*), metodą adaptacyjną, oraz metodą PSO (*particle swarm optimization*) opartą na inteligencji roju.

W modelowaniu matematycznym proponowanych rozwiązań autor rozprawy posłużył się gotowymi procedurami i procedurami bibliotecznymi oferowanymi w programie Matlab-Simulink.

4. Uwagi dyskusyjne i szczegółowe

W trakcie czytania rozprawy zauważyłem także szereg drobnych błędów o charakterze redakcyjnym i edytorskim na które zwróciłem uwagę autorowi w czasie osobistej rozmowy. Uwagi te nie wymagały wprowadzania zmian lub uzupełnień w przedstawionym do recenzji tekście.

Z ogólnego punktu widzenia koncentrowanie się wyłącznie na kształtowaniu sygnału zadającego jako metodzie tłumienia oscylacji można uważać za dyskusyjne, ponieważ takie podejście jest mocno ograniczone co do swojej skuteczności. W ocenianej rozprawie zostało ono jednak usankcjonowane poprzez wybór tematu rozprawy, co z kolei pozostawało w ścisłym związku z potrzebami zawodowymi jej autora. Rzeczywiście, w przypadku transportera przemysłowego z licznymi oddzielnymi zawieszami i dwoma napędami obciążonymi

luzami w przekładniach, trudno jest postulować instalowanie w normalnych warunkach pracy (bez wyraźnego celu badawczego), dodatkowego oprzyrządowania. Dopiero takie oprzyrządowanie, pozwalające na niezawodne pozyskiwanie na bieżąco wiarygodnych danych pomiarowych o aktualnym położeniu kątowym zarówno wybranych elementów pośredniczących w przeniesieniu napędu, jak i chwilowym wychyleniu każdego z tych zawiesi pozwoliłoby na skuteczne całkowite wyeliminowanie oscylacji w rozważanym obiekcie. Sądzę jednak, że we wprowadzeniu do rozprawy zamiast rozważań na temat możliwych odmian modyfikacji układu zadawania należałoby raczej wspomnieć, że zdecydowana poprawa jakości tłumienia oscylacji na wyjściu rozważanych obiektów może być osiągnięta choćby przez częściowe dodanie sprzężeń zwrotnych od pewnych sygnałów wewnętrznych dostępnych pomiarowo w takich obiektach.

Wiadomo bowiem, że zautomatyzowane układy sterowania obiektami spotykanymi w technice wywodzą się z dwóch podstawowych struktur: są to otwarte układy sterowania, z tzw. sprzężeniem „w przód” (z ang. *feedforward control system*), gdy sygnał wejściowy jest szeregowo przetwarzany przez blok sterujący tym obiektem i działa na jego sygnał wyjściowy bez uwzględniania oddziaływania wstecznego (taki blok sterujący może być nazwany wówczas *kompensatorem*), oraz zamknięte układy sterowania, czyli układy regulacji (z ang. *feedback control system*), gdy blok sterujący tym obiektem działa na jego sygnał wyjściowy w oparciu o uchyb regulacji stanowiący efekt ujemnego sprzężenia zwrotnego (taki blok sterujący jest tradycyjnie nazwany wówczas *regulatorem*). Ponieważ układy regulacji wykorzystujące ujemne sprzężenie zwrotne od regulowanego sygnału wyjściowego obiektu wykazują zdecydowanie mniejszą wrażliwość na wszelkie zakłócenia zewnętrzne oddziałujące na obiekt regulacji (rozumiane także jako zmiana jego parametrów), to ta struktura stała się najważniejszą częścią wszelkich układów automatycznego sterowania procesami ciągłymi.

Kombinacją tych dwóch struktur są tzw. zamknięto-otwarte układy sterowania, pozwalające na połączenie zalet obu wyżej wymienionych podejść, i na pewne ograniczenie ich wad. Poszukiwanie nowych, bardziej efektywnych sposobów projektowania kompensatorów i regulatorów oraz sposobów połączenia ich do jednoczesnej współpracy jest nadal przedmiotem badań opartych na współczesnych technikach optymalizacji wykorzystujących logikę rozmytą, sieci neuronowe czy algorytmy bio-inspirowane. Na temat doboru regulatorów w części zamkniętej takich mieszanych układów sterowania zgromadzono już dosyć bogatą wiedzę. W przypadku obiektów wielowymiarowych korzysta się w tym celu często z ich opisu w przestrzeni stanów. W przypadku trudności w dostępie do informacji o pewnych zmiennych stanu zaleca się wówczas konstruowanie odpowiednich obserwatorów. Komplikuje to jednak algorytm sterowania i zwiększa ilość obliczeń. Kłopotów takich unika się dodając równolegle do tradycyjnego układu regulacji część otwartą zawierającą kompensator spełniający w pewnym zakresie odpowiednio dobieranego filtra sygnału zadającego (patrz: Dębowski A. *Automatyka – technika regulacji*. Wyd. WNT, Warszawa 2013, str. 116 – 123).

Układy zautomatyzowane, w których dopuszcza się bardziej złożoną zmienność w czasie sygnału zadającego (a nie tylko zmiany o charakterze skokowym) nazywane są tradycyjnie układami sterowania programowego – jeśli zmienność zadawania jest znana a priori, lub nadążnego – jeśli sygnał zadający zmienia się w sposób trudny do przewidzenia. Już dawno temu zauważono, że konstruowanie układów nadążnych stanowi największe wyzwanie dla projektantów, nie tylko ze umiejętności posłużenia się stosowną wiedzą teoretyczną, ale i ze względu na znajomość odpowiednich technologii umożliwiających realizację takich najnowszych pomysłów. W wielu prostych zastosowaniach przemysłowych wystarczają układy programowe, nawet o charakterze otwartym (czyli bez sprzężeń zwrotnych). Odpowiednia modyfikacja sygnału wejściowego (zadającego) jest stosunkowo łatwa i tania przy praktycznej realizacji, a pozwala na osiągnięcie wyraźnej poprawy jakości działania całego układu regulacji, nawet gdy jego część zamknięta zawiera regulator dobrany niezbyt

starannie. Prawdziwe jest także stwierdzenie odwrotne. Obecność właściwie dobranego regulatora, nawet o nieskomplikowanej strukturze, pozwala uprościć budowę układu zadawania (kompensatora). W odróżnieniu od typowych regulatorów metodyka konstrukcji i doboru właściwych kompensatorów w otwartych układach sterowania wymaga jednak nadal kontynuowania badań. I właśnie z tego powodu tematyka ocenianej rozprawy może pozostać aktualna jeszcze przez długi czas.

Ponieważ autor w swojej rozprawie sam zastanawiał się nad zasadnością praktycznej implementacji niektórych omawianych przez siebie pomysłów (z uwagi na niewspółmierność pomiędzy osiąganym efektem końcowym a stopniem komplikacji algorytmu), to w trakcie publicznej obrony prosiłbym go o wypowiedzenie się na temat możliwości wspomożenia układu kształtowania sygnału zadającego używanego do tłumienia niepożądanych oscylacji w formie odpowiedzi na poniższe pytania:

1. Jak autor widzi możliwość wprowadzenia dodatkowych pomiarów sygnałów pośrednich (tj. pomiędzy sygnałem sterującym a wyjściowym) w rozważanych przez siebie przykładach obiektów drgających i utworzenia choćby fragmentarycznego podukładu regulacji w oparciu o wprowadzone sprzężenia zwrotne od tych sygnałów – jak przy regulacji kaskadowej?
2. Jak autor ocenia możliwość zbudowania prostych obserwatorów stanu dla rozważanych przez siebie przykładów obiektów drgających, które pozwoliłyby odtworzyć niedostępne pomiarowo główne zmienne stanu tak, by możliwe stało się wprowadzenie nawet prostego regulatora pracującego w typowym układzie zamkniętym?

5. Wniosek końcowy

W podsumowaniu pragnę podkreślić, że recenzowana rozprawa:

- 1) dotyczy naukowego opracowania trudnego problemu technicznego o dużym znaczeniu praktycznym,
- 2) wykazuje, że autor posiada rozległą wiedzę z dziedziny teorii i techniki sterowania dotyczącą systemów automatyki przemysłowej i swobodnie się nią posługuje przy prowadzeniu samodzielnych badań,
- 3) zawiera liczne elementy oryginalne, związane z samodzielnym opracowaniem i badaniem algorytmów sterowania weryfikowanych na drodze badań symulacyjnych,
- 4) zawiera bardzo interesującą praktyczną weryfikację niektórych sposobów sterowania zaproponowanych przez siebie, wraz z autorskim systemem wizyjnym pozwalającym na pomiar kąta odchylenia zawieszki, nadającym się do rozpowszechnienia w innych zastosowaniach przemysłowych,
- 5) jest poprawnie opracowana od strony redakcyjnej.

Stwierdzam więc, że rozprawa przedstawiona przez mgr inż. Macieja Gniadka, dotycząca zagadnień badawczych z dyscypliny naukowej Automatyka i Robotyka, w pełni odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim w art. 13 ust.1 “Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14.03.2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz.595, z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Ciechanów, dnia 26 grudnia 2016 r.