

dr hab. inż. Mieczysław Zając, prof. PK
Katedra Automatyki i Technik Informatycznych
Politechnika Krakowska
ul. Warszawska 24
31-155 Kraków

Kraków, 1 października 2015 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Siei

pt. „Metrologiczna ocena dokładności systemów przeznaczonych do pomiarów dynamicznych i jej realizacja na wybranych przykładach”

Praca została wykonana na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej w 2015 r. pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Edwarda Layera.

Recenzję wykonałem w oparciu o uchwałę Rady Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej z dnia 24.06.2015 r. i w odpowiedzi na pismo Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej prof. dr hab. inż. Adama Jagiełło z dnia 29.06.2015 r.

1. Dane bibliograficzne rozprawy

Rozprawa zawiera 114 stron. Składa się ze wstępu, dwunastu rozdziałów, wniosków, wykazu ważniejszych symboli i oznaczeń, spisu literatury obejmującego w sumie 94 pozycje, w tym 60 pozycji w spisie literatury podstawowej i 34 pozycje w spisie literatury uzupełniającej oraz płyty CD.

W spisie literatury znajduje się 6 pozycji, w których autor rozprawy jest autorem lub współautorem.

2. Ocena tematu rozprawy

Recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska dotyczy problematyki wyznaczania błędów generowanych przez systemy przeznaczone do pomiarów dynamicznych na przykładzie piezoelektrycznych przetworników drgań. Celem rozprawy jest wykazanie, że istnieje możliwość wyznaczania błędów generowanych przez systemy pomiarowe przeznaczone do pomiarów dynamicznych poprzez zapewnienie wzajemnej metrologicznej porównywalności tych systemów.

Teza rozprawy została przedstawiona w **rozdziale 2** w sposób następujący:

Możliwe jest wyznaczanie błędów generowanych przez systemy pomiarowe przeznaczone do pomiarów dynamicznych w taki sposób aby uzyskany wynik odpowiadał na następujące pytania:

- jaki błąd dynamiczny, niezależnie od kształtu mierzonego sygnału, może być generowany przez system pomiarowy podczas jego użytkowania,
- który system pomiarowy mierzy z mniejszym, a który z większym błędem,
- czy istnieje możliwość ustalania hierarchii dokładności podobnych systemów pomiarowych niezależnie od ich odmiennych danych znamionowych i konstrukcyjnych oraz różnych zakresów pracy.

W celu potwierdzenia postawionej tezy autor rozprawy przedstawił swoje dokonania w zakresie oceny błędów dynamicznych wykorzystując metodę oceny dokładności

i klasyfikacji systemów przeznaczonych do pomiarów statycznych w oparciu o ich błąd maksymalny.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy

We **wstępie** autor przedstawił ogólnie obszar problematyki wzorcowania, którego dotyczy treść rozprawy oraz jej usytuowanie tematyczne. Wyszczególnił trzy jego zdaniem najważniejsze zagadnienia, tj. hierarchię wzorców, układy sprawdzeń oraz szacowanie błędów pomiarów. Stwierdził, że dotychczas nie opracowano uniwersalnych metod, jak i nie wdrożono aplikacji w przypadku wyznaczania błędów i ustalania hierarchii dokładności systemów przeznaczonych dla pomiarów sygnałów dynamicznie zmiennych. Omawiane w literaturze metody wyznaczania błędów cechuje duża różnorodność spowodowana, zdaniem autora rozprawy, brakiem wzorców, brakiem uniwersalnych kryteriów oraz trudnościami w wyznaczaniu błędu w przypadku istnienia nieskończonego zbioru możliwych sygnałów mierzonych. Autor zwrócił uwagę na trudność wyboru jednego reprezentatywnego dynamicznie zmiennego sygnału, którego można byłoby użyć w procesie wzorcowania.

W **rozdziale 3** autor przedstawił krótkie zestawienie poszczególnych zagadnień, które są objęte zakresem rozprawy.

Rozdział 4 zawiera krótki, wybrany przez autora z pełnego zestawu, literaturowy przegląd stosowanych metod wyznaczania błędów dynamicznych obejmujący okres od połowy lat 60-tych (głównie prace prof. Adama Żuchowskiego dotyczące problematyki przyjmowania kryteriów doboru aparatury pomiarowej do pomiarów dynamicznych). Następnie autor przedstawia reprezentatywne prace dotyczące wyznaczania całkowo-kwadratowego błędu dynamicznego w domenie częstotliwości. Zwraca uwagę na prace, w których przedstawiono metody wyznaczania błędu dynamicznego przy wykorzystaniu relacji pomiędzy sygnałami wejściowymi i odpowiedziami czasowymi (głównie odpowiedziami impulsowymi) systemów pomiarowych. W dalszej części wskazuje na propozycje uwzględnienia zakłóceń oddziałujących na przetwornik pomiarowy. Zwraca też uwagę na prace podkreślające decydującą rolę prędkości narastania sygnału wejściowego w określaniu wielkości błędu dynamicznego. W części końcowej swojego krótkiego przeglądu autor wymienia prace, które podkreślają związek charakterystyk częstotliwościowych przetworników pomiarowych z oceną ich dynamicznej dokładności.

W zakończeniu autor zauważa, że zagadnienie doboru sygnałów wykorzystywanych do wyznaczania błędów dynamicznych pojawił się w oficjalnych dokumentach dopiero w dyrektywie JCGM 100:2008, w której rozwiązanie problemu obliczania błędów dynamicznych powinno być realizowane w oparciu o model matematyczny, ograniczenia nakładane na sygnał wzorujący i założone kryteria błędu. Następnie słusznie zauważa, że pozostaje do rozwiązania problem doboru kształtu sygnału wzorującego, postaci jego widma, a także doboru przedziału czasowego w jakim błąd powinien być wyznaczany.

W **rozdziale 5** autor przedstawia ogólną koncepcję obliczania błędów, zgodną z w/w dyrektywą. Stwierdza, że pojęcie maksymalnej wartości błędu można zaadoptować do oceny jakości systemu pomiarowego przeznaczonego do pomiarów dynamicznych. Wymaga to wyznaczenia odpowiedniego sygnału wejściowego, który w zadanym przedziale czasu dla przyjętego kryterium będzie generował błąd maksymalny. Autor słusznie podkreśla, że problem wyznaczenia sygnału generującego błąd maksymalny musi być poprzedzony analizą modelu matematycznego systemu, jego wzorca, wybranego kryterium błędu oraz przyjętego

przedziału czasowego. Różne kryteria błędów (np. całkowo-kwadratowe, całkowite z funkcją wagi, czy też kryterium błędu bezwzględnego) wymagają opracowania odpowiednich procedur określania odpowiadających im sygnałów wejściowych. Powstaje problem istnienia takiego sygnału oraz problem jego osiągalności. Autor postuluje wyznaczenie kształtu sygnału na drodze obliczeń analitycznych lub numerycznych. W charakterze przykładu przeprowadza obliczenia analityczne sygnałów wejściowych dla kryterium błędu bezwzględnego i kryterium całkowo-kwadratowego.

Przestrzeń rozwiązań zależy od przyjętego modelu przetwornika oraz ograniczeń nakładanych na sygnał. Autor słusznie uważa, że nawet dla przetworników o zbliżonych własnościach dynamicznych, przy przyjęciu tego samego kryterium błędu oraz przedziału czasowego, nie istnieje jeden określony sygnał generujący błąd maksymalny. Wynika to z różnic ograniczeń nakładanych na sygnał w przypadku różnych modeli.

Autor wymienia dwa rodzaje ograniczeń nakładanych na sygnał wejściowy: ograniczenie jego amplitudy oraz ograniczenie maksymalnej prędkości zmiany sygnału jaką może przerosić przetwornik pomiarowy. Maksymalna prędkość zmiany sygnału związana jest z maksymalną wartością jego odpowiedzi impulsowej. Odwołując się do literatury, autor stwierdza, że wprowadzenie tego drugiego ograniczenia i zastosowanie sygnału typu „bang-bang” umożliwi wzajemną porównywalność przetwornika i jego wzorca, a także przetworników o odmiennych własnościach dynamicznych i różniących się pasmami przenoszenia. Jednakże przedstawiony przez autora schemat procedury wyznaczania błędu dynamicznego (rys.5.1) jest moim zdaniem zbyt ogólny i wymaga uszczegółowienia. Ponadto w zależności (5.13) określającej wyliczaną wartość maksymalną błędu całkowo-kwadratowego błędnie określił górną granicę całkowania po dv .

Rozdział 6 stanowi podbudowę głównych rozdziałów potwierdzających tezę pracy. Autor w przejrzystej formie przedstawia w nim metodykę budowy modeli przetworników w domenach czasu i częstotliwości na przykładach dwóch akcelerometrów: akcelerometru z masą sejsmiczną i akcelerometru piezoelektrycznego. Formułuje równania dynamiki, ich modele matematyczne, oblicza odpowiedzi impulsowe oraz analizuje ich charakterystyki częstotliwościowe. Uważam, że przyjęty przez autora stopień złożoności prezentowanych modeli odpowiada celowi rozprawy.

Następnie autor przedstawia schemat układu pomiarowego akcelerometru piezoelektrycznego współpracującego ze wzmacniaczem pomiarowym oraz po wprowadzeniu rezystancji zastępczych krysztalu i kabla jego schemat uproszczony. Rozdział kończy przedstawienie danych i parametrów akcelerometrów.

W **rozdziale 7** autor postuluje dobór wzorca pod kątem najlepszego dopasowania własności częstotliwościowych (warunki tzw. transformacji niezniekształcającej). Dobór wzorca dla kryterium całkowo-kwadratowego proponuje autor dokonać w oparciu o pracę prof. E. Layera [Layer, 1997], który zaproponował model w postaci filtru dolnoprzepustowego o określonej funkcji przejścia. Dla kryterium błędu bezwzględnego autor proponuje przyjęcie modelu wzorca w postaci filtru Butterwortha 15 rzędu, ale tego wyboru nie uzasadnia, co wymagałoby wyjaśnienia. Autor stwierdza, że filtr ten może być zastosowany dla obu rozpatrywanych kryteriów błędu.

Rozdział 8 poświęcony jest parametrycznej identyfikacji akcelerometrów. Autor słusznie stwierdza, że zalecana do stosowania przez normy do równoczesnej aproksymacji charakterystyk częstotliwościowych ważona metoda najmniejszych kwadratów może być zastosowana wyłącznie w przypadku akcelerometrów z masą sejsmiczną. Wówczas możliwy jest rozkład odwróconej transmitancji widmowej na dwa wektory składowe. Natomiast w przypadku akcelerometrów z wyjściem ładunkowym podobna reparametryzacja nie jest możliwa.

W podrozdziale 8.1 autor odwołuje się szerzej do literatury omawiając użyteczne metody identyfikacji parametrycznej przetworników pomiarowych, w szczególności metody oparte o zastosowanie algorytmu Levenberga-Marquardta (L-M). Minimalizuje się funkcję celu zdefiniowaną w postaci różnicy położenia punktów obu charakterystyk częstotliwościowych obliczonych z transmitancji widmowych: na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i na podstawie modelu matematycznego układu pomiarowego.

W podrozdziale 8.2 autor proponuje iteracyjną metodę identyfikacji parametrycznej, która może być zastosowana w przypadku obu typów badanych akcelerometrów i służy do wykazania prawdziwości tezy jego pracy. Pierwszym jej etapem jest zastosowanie algorytmu L-M do iteracyjnego wyznaczenia wstępnych (początkowych) wartości identyfikowanych parametrów na podstawie kształtu charakterystyki amplitudowej. Autor nie precyzuje dokładnie jak przyjmuje początkową wartość zmiennej μ_k zależnej od zmian wartości przyjętej funkcji celu, co wymaga wyjaśnienia.

W kolejnych czterech etapach autor przyjmując marginesy błędów wektora parametrów i stosując generator liczb pseudolosowych wyznacza macierze charakterystyk amplitudowej i fazowej oraz wylicza funkcję celu. W etapie szóstym minimalizuje wartość tej funkcji. Dla sprawdzenia hipotezy zgodności obu wyliczonych charakterystyk częstotliwościowych z modelem akcelerometru autor, zakładając liczbę stopni swobody i poziom istotności, stosuje test *chi-kwadrat* (χ^2). Podrozdział ten stanowi oryginalne osiągnięcie autora.

Rozdział 9 rozprawy dotyczy oceny dokładności akcelerometrów dla przypadku błędu całkowo-kwadratowego. W jego wstępie autor, odwołując się do literatury i do ustaleń dokonanych w rozdziale 5, opisuje numeryczną procedurę wyznaczania czasów przełączeń sygnału wejściowego typu „bang-bang” w zależności od założonej ich liczby. Mała efektywność tego podejścia dla rosnącej liczby przełączeń sprawia, że dla określenia maksymalnych wartości błędów całkowo-kwadratowych autor proponuje wyznaczanie sygnałów typu „bang-bang” przy zastosowaniu algorytmu genetycznego, przy czym kolejny etap procedury maksymalizacyjnej realizuje w oparciu o wykorzystanie dyskretnej metody całkowania Simpsona, której zastosowanie opisano w pracy [Tomczyk, Sieja 2006]. Autor podaje wartości przyjętych parametrów procedury i określa warunek zakończenia obliczeń związany z brakiem rejestracji dalszego wzrostu wartości błędu.

W **rozdziale 10** autor przedstawia problem określania błędów akcelerometrów dla kryterium błędu bezwzględnego. Podkreśla złożoność problemu wyznaczania sygnału wejściowego w przypadku nałożenia na ten sygnał jednocześnie dwóch ograniczeń: amplitudy sygnału i jego prędkości narastania. Stwierdza, że omówione w literaturze metody analityczne oparte na przekształceniach geometrycznych odpowiedzi impulsowej nie mogą być wykorzystane w efektywnym algorytmie obliczeniowym. Dla wyznaczania błędu bezwzględnego autor proponuje wykorzystanie, w formie procedury dyskretnej, opisanej w literaturze metody transformacji różnicy odpowiedzi impulsowych i funkcji prostokątnej o określonym czasie trwania. Zapropionowana procedura wyznaczania wartości błędu bezwzględnego składa się z ośmiu określonych przez autora etapów, począwszy od wyznaczania funkcji prostokątnej i całki splotowej, poprzez wyznaczanie funkcji „bang-bang”, wyznaczanie sygnału z dwoma przetwornikami i wzorca. Dla każdego z tych etapów autor przedstawia bez dodatkowego wyjaśnienia odpowiednie zależności w postaci ciągłej i dyskretnej. Wskazany byłby dla kolejnych etapów krótki odautorski komentarz.

W **rozdziale 11** przedstawia autor wyniki identyfikacji parametrycznej przeprowadzonej przy wykorzystaniu systemu pomiarowego zawierającego wzbudnik drgań, służącego do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych akcelerometrów badanego i wzorcowego metodą „back-to-back”. Autor bada trzy akcelerometry z wyjściem napięciowym i sześć

akcelerometrów z wyjściem ładunkowym, przedstawiając w tabelach punkty pomiarowe. Aproksymację charakterystyk częstotliwościowych w oparciu o uzyskane punkty pomiarowe przeprowadza autor metodami opisanymi w **rozdziałach 8 i 9**, wykorzystując w pierwszym etapie algorytm L-M, a następnie generację liczb pseudolosowych (losowania MC). Wyniki identyfikacji parametrycznej przedstawił w tabelach.

W **rozdziale 12** autor przedstawił wyniki obliczeń dla błędu całkowo-kwadratowego. Wyniki dla poszczególnych akcelerometrów przedstawione zostały w postaci charakterystyk czasowych dla wybranych wartości okresów dyskretyzacji T oraz dla wybranych wartości ograniczeń amplitudy sygnału A i jego szybkości narastania \mathcal{G} . Na str. 79 – 80 autor przedstawił charakterystyki czasowe błędów całkowo-kwadratowych dla poszczególnych akceleratorów pogrupowane w porównywalnych zakresach częstotliwości pracy. Na str. 81-83 przedstawił natomiast charakterystyki błędów całkowo-kwadratowych dla poszczególnych akceleratorów pogrupowane w zakresach porównywalnych wartości wraz z podziałem na klasy A, B, C i D.

Godnym podkreślenia jest fakt, że autor wykazał w tym rozdziale, że przyjęte przez niego kryterium oceny systemu pomiarowego z akcelerometrem pozwala na przeprowadzenie w oparciu o nie klasyfikacji akcelerometrów dla wybranych wartości ograniczeń amplitudy sygnału A i jego szybkości narastania \mathcal{G} , a więc pozwala na potwierdzenie tezy rozprawy. W tabeli 12.2 autor przedstawił hierarchie dynamicznej dokładności dla błędu całkowo-kwadratowego $I(u_o)$. Ustalenie hierarchii dynamicznej dokładności jest oryginalnym osiągnięciem autora, wskazane byłoby krótkie odniesienie się autora do wyników przedstawionych w tabeli.

W **rozdziale 13** autor przedstawia wyniki obliczeń dla błędu bezwzględnego. Wyniki dla poszczególnych akcelerometrów przedstawione zostały podobnie jak dla błędu całkowo-kwadratowego w postaci charakterystyk czasowych dla wybranych wartości okresów dyskretyzacji T oraz dla wybranych wartości ograniczeń amplitudy sygnału A i jego szybkości narastania \mathcal{G} . Na str. 97 – 98 autor przedstawił charakterystyki czasowe błędów bezwzględnych dla poszczególnych akceleratorów pogrupowane w porównywalnych zakresach częstotliwości pracy. Na str. 99-101 przedstawił natomiast charakterystyki błędów bezwzględnych dla poszczególnych akceleratorów pogrupowane w zakresach porównywalnych wartości wraz z podziałem na klasy A, B i C. W porównaniu z klasyfikacją dla błędu całkowo-kwadratowego autor zanotował w rozpatrywanym przypadku zawężenie klasyfikacji, co udokumentował w tabeli 13.2 prezentując propozycję podziału akceleratorów na poszczególne klasy. W tabeli 13.1 przedstawił hierarchie dynamicznej dokładności dla błędu bezwzględnego $D(u_o)$. Wskazany byłby krótki komentarz dotyczący tego zestawienia.

W **rozdziale 14** autor przedstawia wnioski ujęte krótko w trzech punktach. W pierwszym z nich stwierdza, że w rozprawie wykazał, że możliwe jest wyznaczenie błędów generowanych przez przetworniki pomiarowe przeznaczone do pomiarów sygnałów dynamicznie zmiennych. Umożliwia to ich wzajemną metrologiczną porównywalność. Tym samym teza rozprawy została potwierdzona. W punkcie drugim autor stwierdza, że uzyskane wyniki umożliwiają dla badanych przetworników ustalenie hierarchii dynamicznej dokładności. W punkcie trzecim autor wskazuje na swoje oryginalne osiągnięcia.

Do pracy załączona jest płyta CD z programami źródłowymi (30 plików typu MATLAB Code i 9 dokumentów tekstowych, zapisanych w systemie UDF, 23,6 MB), które autor zastosował w przeprowadzonych eksperymentach.

Wartość merytoryczna wyników rozprawy

Recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska jest poprawnym rozwiązaniem postawionego zadania naukowo-badawczego. Jej autor w sposób konsekwentny przedstawia kolejne etapy badawcze zmierzające do potwierdzenia postawionej tezy. Rozpoczyna od sformułowania problemu i przedstawia jego istotę na tle aktualnego stanu wiedzy. Następnie rozwiązuje zadanie badawcze przeprowadzając badania modelowe. Korzystając z dostępnej literatury, adoptuje niezbędne rozwiązania teoretyczne, w oparciu o które przeprowadza obliczenia analityczne, optymalizacyjne i eksperymenty pomiarowe. Badania te pozytywnie weryfikują założony cel pracy jakim było przedstawienie metody identyfikacji spójnej dla przetworników z wyjściami: napięciowym i ładunkowym, przyjęcie jednolitego wzorca dla kryteriów błędu: całkowo-kwadratowego i bezwzględnego oraz ustanowienie hierarchii dynamicznej dokładności badanych przetworników.

Dodatkowo autor opierając procedurę przeszukującą o algorytm genetyczny oraz stosując dyskretne algorytmy obliczeniowe potwierdza liniową zależność błędu całkowo-kwadratowego od czasu. W zakończeniu przedstawia i omawia szerokie spektrum wyników dotyczących eksperymentów weryfikujących poprawność przyjętych metod i modeli. Szeroki zakres literatury został dobrany odpowiednio do treści pracy.

Całość stanowi cenny wkład w bardzo ważne zagadnienie jakim jest metrologiczna ocena dokładności systemów przeznaczonych do pomiarów dynamicznych. .

Praca napisana jest przejrzysto, ale fragmentami brak jest potrzebnych wyjaśnień i komentarzy zarówno przy przedstawianiu stosowanych metod jak i szerszego odniesienia się do uzyskanych wyników. Autor nie uniknął pewnych niepoprawności, które wyszczególniłem w charakterystyce rozprawy. Podczas obrony proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do uwag w niej zawartych.

Ocena ogólna i wniosek końcowy

Zawarte w tej recenzji uwagi, zarówno ogólne jak i szczegółowe czy dyskusyjne nie zmieniają mojej pozytywnej opinii na temat recenzowanej rozprawy doktorskiej oraz samodzielnego dorobku doktoranta. Uważam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marka Siei stanowi poprawne rozwiązanie trudnego problemu naukowego-technicznego dowodząc Jego umiejętności samodzielnego prowadzenia prac badawczych i naukowych w dyscyplinach z którymi jest związana. .

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że praca pana mgr inż. Marka Siei pt. „Metrologiczna ocena dokładności systemów przeznaczonych do pomiarów dynamicznych i jej realizacja na wybranych przykładach” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku oraz spełnia wymagania wprowadzone ustawą z dnia 11 lipca 2014 r. o zmianie ustawy - Prawo o Szkolnictwie Wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym w brzmieniu obowiązującym od dnia 1 października 2011 r., w związku z czym rekomenduję ją Radzie Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej jako rozprawę doktorską i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.