



Poznań, 25.09.2024 r.

dr hab. inż. Rafał Długosz, prof. PBS
Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
ul. Al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796, Bydgoszcz
e-mail: rafal.dlugosz@pbs.edu.pl

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 2.10.2024
Zarejestrowano pod nr 510-5-8/21
Podpis Jm

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

dla Rady Dyscypliny Naukowej

Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

1. Wprowadzenie

Niniejsza recenzja została przygotowana w wyniku powołania mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej pt. „Bezegarowy przetwornik TDC (Time-to-Digital Converter) z sukcesywnym równoważeniem upływu czasu” przez Radę Dyscypliny Naukowej – Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i *Tech.* Kosmiczne z dnia 5.07.2024 roku.

Tytuł rozprawy: Bezegarowy przetwornik TDC (Time-to-Digital Converter) z sukcesywnym równoważeniem upływu czasu

Autor rozprawy: mgr inż. Konrad Jurasz

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Witold Machowski

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Dariusz Kościelniak

Niniejsza recenzja (poza wprowadzeniem i wnioskiem) zawiera odpowiedzi na siedem pytań dotyczących rozprawy doktorskiej.

Jurasz

2. Jaki jest problem naukowy (teza) rozprawy? Czy został on trafnie i jasno sformułowany? Jaki charakter ma rozprawa?

Rozprawa, której Autorem jest Pan mgr inż. Konrad Jurasz, dotyczy opracowania nowych rodzajów przetworników analogowo-cyfrowych (A/C) opartych na pomiarze czasu, jednocześnie pracującej w trybie sukcesywnej aproksymacji. Przetworniki A/C z podziałem czasu są znane od wielu lat. Są to jednak przede wszystkim rozwiązania, w których stosowany jest zewnętrzny zegar referencyjny służący do zliczania impulsów. Autor zauważył, że istnieją też rozwiązania asynchroniczne tego rodzaju i im poświęcił tematykę swojej pracy. Zaproponował znaczące modyfikacje istniejących rozwiązań, a następnie wykonał prototyp układu scalonego. Układ ten został zweryfikowany pomiarowo.

Problemy naukowe rozprawy zostały trafnie sformułowane, a także rozwiązane przez Autora. Cele pracy znajduje się w Rozdziale 1.1 rozprawy na stronie 20, natomiast teza w Rozdziale 1.2 na stronie 21.

Celem pracy było:

Zoptymalizowanie, a następnie zaimplementowanie w prototypowym układzie scalonym, nowej w pełni asynchronicznej struktury przetwornika A/C typu TDC (Time-to-Digital Converter) opartej na metodzie sukcesywnego równoważenia wpływu czasu. Metoda ta została oznaczona jako STP (ang. Successive Time Balancing). Zaletą zaproponowanego rozwiązania, na którą zwrócił uwagę Autor, jest brak konieczności stosowania bloku zegara referencyjnego zarówno jako układu zewnętrznego względem przetwornika A/C jak też wewnętrznego oscylatora. Jest to możliwe dzięki zastosowaniu automatu stanów, który stanowi asynchroniczny wewnętrzny układ sterujący. Celem tak zaproponowanego rozwiązania jest minimalizowanie liczby przełączeń układu przypadającej na cykl przetwarzania, a w konsekwencji na ograniczenie poboru mocy.

Teza rozprawy zdefiniowana została następująco:

I. Możliwa jest praktyczna realizacja samotaktującego, bezzegarowego przetwornika TDC opartego na metodzie sukcesywnej aproksymacji, dokonującego pomiaru interwału czasu w sposób bezpośredni.

II. Czas przetwarzania przetwornika STB-TDC jest liniową funkcją długości mierzonego interwału czasu z dokładnością do kroku kwantyzacji.

Niniejsza rozprawa ma charakter teoretyczno-eksperymentalny.



3. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Przegląd i analiza literatury związanej z przedmiotem pracy zostały przeprowadzone w sposób właściwy. Autor rozprawy jest ekspertem w obszarze projektowania przetworników A/C w postaci scalonej. Rozumie aktualny stan wiedzy oraz literatury światowej w zakresie m.in. asynchronicznych przetworników A/C, co przedstawił między innymi w Rozdziałach 2 i 3.

W rozdziale 2 Autor przybliżył podstawy asynchronicznego przetwarzania analogowo-cyfrowego z wykorzystaniem kodowania sygnałów w dziedzinie czasu. W bardzo zwięzły i czytelny sposób przedstawił m.in. podstawy asynchronicznej modulacji sigma-delta, przetwarzania (i kodowania) metodą LIF (ang. Leaky Integrate-and-fire) oraz LCS (ang. Level Crossing Sampling). Następnie przedstawił też sposoby zliczania impulsów, stosowane w asynchronicznych przetwornikach A/C do pomiaru interwałów czasu kodujących informację. W dalszej części Rozdziału 2 Autor przedstawił podstawy pośredniego przetwarzania TDC (ang. time to digital conversion) jak również podstawy budowy i działania przetwornika A/C opartego na tym rodzaju przetwarzania. W Rozdziale 3 Autor przedstawił stan literatury w obszarze samotaktującego przetwarzania TDC za pomocą metody sukcesywnego równoważenia (aproxymacji) upływu czasu STB. Autor szczegółowo omówił oscylacyjną oraz monotoniczne wersje takiej aproxymacji. Opisując wymienione rodzaje przetwarzania, Autor potrafił wykazać zalety oraz wady tych rozwiązań. Ta część rozprawy jest napisana w sposób przystępny a zarazem bardzo zwięzły, co pokazuje, że Autor posiada spore umiejętności w zakresie prezentowania wiedzy.

Bibliografia zawiera 118 pozycji, wliczając w to prace własne Autora. Zdecydowaną większość z nich opublikowano po 2000 roku, co świadczy o dobrej znajomości aktualnego stanu wiedzy.

Dorobek publikacyjny doktoranta

W spisie literatury znaleźć można 10 prac w której Autor rozprawy jest współautorem [28, 31, 111 – 118]. W dwóch pierwszych przypadkach (publikacje w czasopiśmie naukowym Sensors) jest on pierwszym autorem. Na uwagę zasługuje współautorstwo w 8 zgłoszeniach patentowych, z czego dwa patenty zostały udzielone, a 6 w spisie literatury ma status zgłoszonych. Niemniej jednak obecnie z tych sześciu, trzy są obecnie dostępne w bazie Espacenet. Sądząc po datach zgłoszeń pozostałych trzech (kwiecień i maj 2022), można

przypuszczać, że pozostałe trzy będą dostępne w formie publikacji w październiku i listopadzie tego roku. Biorąc pod uwagę strukturę własnych publikacji Autora, uważam jego dorobek za wystarczający.

4. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia? Czy użył do tego właściwych metod dowodząc, że posiadał umiejętności związane z metodyką i metodologią prowadzenia badań naukowych? Czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Uważam, że Autor w sposób odpowiedni rozwiązał problemy, które zdefiniował w rozdziale poświęconym celom rozprawy. Posiada dużą wiedzę w obszarze projektowania specjalizowanych układów scalonych (ASIC) w stylu „full-custom”, pracujących w mieszanym trybie analogowo-cyfrowym, a w szczególności w obszarze projektowania przetworników A/C. Przyjęte w pracy założenia są uzasadnione i merytorycznie poprawne. Teza rozprawy została dowiedziona.

Autor zastosował adekwatną metodologię do wyznaczonych celów. Zaproponował nowe rozwiązania na poziomie koncepcji przetwornika A/C. W następnym kroku zaprojektował układ scalony zawierający strukturę prototypowego przetwornika A/C. Wykonany układ scalony zweryfikował laboratoryjnie, uwzględniając analizę statystyczną, bazującą na pomiarze wielu próbek układu. Taka metodologia jest szczególnie istotna przy badaniu układów analogowych oraz analogowo-cyfrowych.

5. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu nauki reprezentowanych przez literaturę światową?

Celem rozprawy było zoptymalizowanie, a następnie zaimplementowanie w prototypowym układzie scalonym, nowej w pełni asynchronicznej struktury przetwornika A/C typu TDC (Time-to-Digital Converter) opartej na metodzie sukcesywnego równoważenia wpływu czasu.

Jako autorskie i oryginalne dokonanie można uznać:

- 1) Głównym osiągnięciem pracy rozpatrywanej jako całości jest zaproponowanie nowych struktur (modyfikacji) przetworników A/C z uwzględnieniem konieczności uzyskania niskiego zużycia energii i małej liczby przełączeń układu.
- 2) Pełna implementacja układowa algorytmu sukcesywnego równoważenia upływu czasu STB-TDC wraz z przejściem całego procesu projektowania, począwszy od wspomnianej

wyżej koncepcji układu, aż do jego wszechstronnej weryfikacji pomiarowej. Uważam to za spore osiągnięcie, biorąc pod uwagę ilość i jakość problemów do rozwiązania przy projektowaniu układów scalonych. Dotyczy to zwłaszcza układów analogowych oraz, jak w tym przypadku, szczególnie wymagających układów mieszanych z częścią analogową i cyfrową.

- 3) Spory wysiłek włożony przez Autora w dokładność wykonania poszczególnych elementów projektowanego układu scalonego. Autor sporo uwagi poświęcił na właściwy dobór rozmiarów tranzystorów oraz kondensatorów, podpierając swoje wybory odpowiednimi obliczeniami oraz analizą Monte Carlo. Przy opisie projektowania poszczególnych elementów (kondensatory, źródła prądowe, komparatory) przeprowadza też wpływ niedoskonałości tych elementów na błąd przetwarzania całego układu. Pokazuje to jego dojrzałość jako projektanta takich układów oraz krytyczny stosunek do własnych projektów. Są to bardzo ważne zalety.
- 4) Pomiary wykonanego prototypu układu z uwzględnieniem analizy statystycznej. Bardzo często etap takiej analizy jest pomijany w artykułach naukowych, a jest bardzo istotny do właściwej oceny uzyskanych wyników.

6. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników? Jaka jest poprawność redakcyjna rozprawy?

Bardzo wysoko oceniam umiejętności Autora w zakresie poprawnego i przekonującego przedstawiania zarówno podstaw teoretycznych (w tym stanu badań na świecie w tym obszarze) jak i uzyskanych przez niego wyników badawczych. Przedstawiona rozprawa doktorska została przygotowana poprawnie, zarówno pod kątem redakcyjnym jak i językowym. Struktura została przemyślana z zachowaniem odpowiedniego balansu pomiędzy poszczególnymi częściami.

Można w pracy znaleźć kilka niedociągnięć edycyjnych, które w małym stopniu wpływają na treść pracy. Jednym z często występującym problemów jest niekonsekwencja w stosowaniu oznaczeń zmiennych. Bardzo często jest tak, że we wzorach używane są czcionki pochyłe, a w tekście te same zmienne pisane są czcionką prostą, co bywa mylące. Kilka przykładów:

- Str. 44: „Proces przetwarzania rozpoczyna się w chwili położenia mierzonej wielkości X_{IN} na szalce źródłowej S.” Jednocześnie we wzorach (3.4) i (3.5) mamy X_{IN} .
- Str. 45: W treści mamy FSR, R_0 , podczas gdy na Rysunku 3.9, FSR, R_0 .
- Autor pisze o szalkach S oraz R. Ale czy R i S należy w domyśle traktować jako zmienne będące sumami ciężarków znajdujących się na tych szalkach? W opisie tych szalek brzmi

to wyłącznie jak przyjęte ich oznaczenia. Jednocześnie w nieco skrótowy sposób w tekście rozprawy używane są takie wyrażenia jak $(S > R)$ lub $(R < S)$, sugerujące że są to zmienne.

Najlepiej byłoby przyjąć zasadę, że zmienne pisze się czcionką pochyłą, natomiast pozostałe oznaczenia czcionką prostą. Przykładowo X jest zmienną, zatem powinna być pisana czcionką pochyłą. Jednocześnie IN jest skrótem (jak się można domyśleć) od „input”. W tym przypadku IN powinno być pisane czcionką prostą. Jeśli natomiast we wzorach mamy indeks IN , to od strony matematycznej można by to rozumieć np. jako zmienną X o indeksach I oraz N , gdzie I i N są niezależnymi zmiennymi. Takich niekonsekwentnie spotykanych oznaczeń jest bardzo wiele.

Jak wspomniałem wyżej, generalnie treść rozprawy jest bardzo czytelna. Można jednak wskazać fragmenty które nie są jasne. Dotyczy to np. opisu (str. 49) zasady przetwarzania metodą STB-TDC. Opis jest zrozumiały do końca pierwszego akapitu na tej stronie („... która rozpoczyna jego jednostajne napełnianie.”). W dalszym opisie mowa jest o krokach podejmowanych w chwilach napełnienia któregośkolwiek ze zbiorników referencyjnych, ale nie ma informacji co powoduje, że dany zbiornik zostaje zainstalowany na wieży S lub R. W opisie tym jest kilka myślników z warunkami. W pierwszym jest zdanie: „... podczas jego napełniania rozpoczęto napełniania kolejnego zbiornika na wieży R”, w którym moim zdaniem jest błąd, który ma wpływ na klarowność prezentacji. Czy powinno być „rozpoczęto napełnianie”, czy może „nie rozpoczęto napełniania” ? W samym Rysunku 3.11 ilustrującym ten opis też można znaleźć niejednoznaczności. Mamy (b-c) rozpoczęcie budowy wieży, a następnie (c-d) dodanie kolejnego zbiornika. Czy (c) jest jednocześnie rozpoczęciem jak i kontynuacją budowy wież?

7. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Pomimo osiągnięcia postawionego celu rozprawy i dowiedzeniu też w rozprawie można zauważyć pewne aspekty dyskusyjne, wymagające wyjaśnienia i doprecyzowania. Uwagi mające charakter dyskusyjny można sformułować następująco:

- 1) Autor przedstawił schemat elektryczny zaprojektowanego przez siebie przetwornika A/C (Rys. 3.12). Kwestia analizy wrażliwości układu na różne negatywne zjawiska. O ile analizę wpływu niedokładności pojemności (pojemności ścieżek) można znaleźć w opisie układu, to brakuje opisu potencjalnego wpływu zjawiska wstrzykiwania ładunku do tych pojemności, które może wystąpić podczas przełączania kluczy przez które kondensatory te są ładowane. Jest też kwestia napięć niezrównoważenia komparatorów, itp. Autor wspomina fakt wstrzykiwania ładunku (str. 75) oraz to, że zjawisko to nie powoduje

skrócenia czasu ładowania (str. 76). Moim zdaniem może w jakimś stopniu wpływać, ponieważ wstrzyknięty ładunek podnosi napięcie na kondensatorze i komparatory mogą szybciej zadziałać. Prosiłbym o komentarz wyjaśniający.

Czy Autor próbował rozważyć zastosowanie tzw. „dummy switches” w celu kompensowania zjawiska wstrzykiwania ładunku?

- 2) Na stronie 71 jest informacja o sposobie łączenia kondensatorów referencyjnych za pomocą bramek transmisyjnych (kluczy). Autor wspomniał, że do każdego takiego kondensatora są podłączone trzy klucze. Mam wątpliwości, czy takie podejście jest do końca właściwe. Jeśli bowiem zastosowano takie same klucze (taka sama rezystancja), to przy dużej zmienności pojemności poszczególnych kondensatorów C_k , bardzo będą różniły się stałe czasowe ładowania tych kondensatorów. Czy nie byłoby wskazane przyjęcie zasady określonej liczby kluczy na jakiś zakres pojemności takich kondensatorów? Zastosowanie ośmiu kondensatorów z wartościami rosnącymi z potęgą dwójki oznacza, że największy ma teoretyczną pojemność 128 razy większą niż najmniejszy, zatem stała czasowa jego ładowania będzie znacznie większa niż najmniejszego kondensatora. Autor odnosi się do tej kwestii w ostatnim zdaniu na str. 72, wskazując że czasy ładowania poszczególnych kondensatorów pozostają względem siebie w stosunku binarnym (czy chodzi tutaj o to że rosną z potęgą liczby 2?) i że ENOB jest zachowany. Trzeba jednak brać pod uwagę pojemności pasożytnicze ścieżek, które przy założeniu zachowania ENOB jakby „na styk” mogą ostatecznie wpłynąć na szybkość.
- 3) Na stronie 74 Autor wspomina parametry najmniejszych tranzystorów dla zastosowanej technologii, podając też sumaryczną pojemność wszystkich kluczy taką, że sugeruje ona iż takie tranzystory zostały użyte w kluczach. Jednocześnie wcześniej (str. 72) wspomina o tym, że powszechnie stosowanym sposobem projektowania bramki transmisyjnej jest taki dobór wymiarów tranzystorów PMOS i NMOS, by uzyskać stałą wypadkową rezystancję w danym zakresie napięć. Czy zastosowanie minimalnych tranzystorów nie niesie ryzyka, że zjawisko niedopasowania tranzystorów wyeliminuje przy tak małych ich rozmiarach wypracowaną stałą wartość rezystancji?
- 4) Opis źródeł prądowych (str. 83 i 84). Autor wspomina o opóźnieniach podczas włączania tych źródeł. Można by rozważyć taką implementację, w której źródła pracują cały czas, tylko są przełączane pomiędzy dwoma węzłami odbiorczymi. Można to sobie wyobrazić w taki sposób, że mając wąż ogrodowy, to zamiast odkręcać i zakręcać zawór wody, to zawór pozostaje odkręcony (woda płynie cały czas), tylko kierujemy jej strumień naprzemiennie do dwóch różnych zbiorników. Jednym z nich jest odpowiednik naszego

kondensatora referencyjnego, natomiast drugi jest nieistotny dla części układu wyznaczającej cyfrową reprezentację sygnału analogowego. Jest po prostu odbiornikiem niepotrzebnego w danej chwili strumienia. Takie podejście zwiększyłoby złożoność układu i zużywaną energię, ale skróciłoby okres „wybudzania” źródeł i może błąd z tego wynikający.

- 5) Brak jest analizy narożnikowej PVT (proces, voltage, temperature). Można co prawda tutaj przyjąć, że przy zakładanym zastosowaniu układu w aplikacjach biomedycznych temperatura nie będzie się zmieniać w dużym zakresie, ale mimo wszystko taka analiza by się przydała.
- 6) W Rozdziale 5.1.4 Autor opisuje referencyjne źródło napięcia. Można by rozważyć opcję tymczasowego zastąpienia takich źródeł, źródłami idealnymi. To co piszę nie traktuję jako zarzut. Bardziej chodzi o to, by do oceny działania głównej części układu (core) na ile się dać wyidealizować działanie innych jego części.
- 7) Odnośnie układu wzajemnego wykluczania opisanego w Rozdziale 5.1.5. W jakich okolicznościach oba komparatory mogą zadziałać jednocześnie? Czy jest to wtedy, gdy dla danej wartości kroku k , chwilowy sygnał referencyjny będzie w przybliżeniu równy analogowej wartości konwertowanej? Brakuje takiego wyjaśnienia w treści pracy.
- 8) W Rozdziale 5.2.1. Autor przedstawił sposób kompensacji pojemności pasożytniczych. Czy po zastosowaniu tej kompensacji układ był ponownie weryfikowany symulacyjnie? Pytam dlatego, że zastosowanie takich pojemności mogło dołożyć kolejne pojemności pasożytnicze.
- 9) W punkcie 6.3. Autor opisuje analizę statystyczną przeprowadzoną w oparciu o pomiary 15 próbek układu. Pozostałych nie uwzględniono, bo zostały poddane testom niszczącym. Czy nie można było najpierw ich pomierzyć w testach nieniszczących, tak by uzyskać więcej próbek do analizy statystycznej?

8. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych i gospodarki?

Uważam, że tematyka rozprawy mieści się w obszarze zainteresowań dyscypliny naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne. Przydatność rozprawy wynika m.in. z tego, w jaki sposób Autor podszedł do poszczególnych etapów swojej pracy. Nie ograniczył się jedynie do zaprezentowania koncepcji układu, ale przeprowadził też pełen proces projektowania i weryfikacji stosunkowo trudnej klasy układów, jakimi są układy mieszane analogowo-cyfrowe. Jest to metodologia stosowana w projektowaniu układów komercyjnych.

Jako motywację dla swojej pracy Autor przyjął zastosowanie przetwornika A/C w systemach biomedycznych, które wymagają rygorystycznych testów przed udostępnieniem ich pacjentom. W tej sytuacji optymalizacja poszczególnych komponentów układu jest kluczowa, jeśli chce się osiągnąć zakładane wymagania dla układu jako całości. Autor takiej optymalizacji dokonał, co powoduje że jego praca może mieć znaczenie dla gospodarki.

9. Wniosek

Biorąc pod uwagę wnioski zaprezentowane w poprzednich punktach i wymagania podane w art. 187 ustawy z dnia 20.07.2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2020 poz. 85 z późniejszymi zmianami) uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Konrada Jurasza pt. „Bezegarowy przetwornik TDC (Time-to-Digital Converter) z sukcesywnym równoważeniem upływu czasu” zawiera oryginalne rozwiązanie problemu oraz dowodzi, że Kandydat posiada ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Nauki Kosmiczne i posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Uważam zatem, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Konrada Jurasza spełnia wszystkie wymagania ustawowe i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Rafał Długosz, prof. PBŚ
Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki
Politechnika Bydgoska im. J. J. Śniadeckich

