

dr hab. inż. Tomasz Kulej, prof. PCz  
Wydział Elektryczny  
Politechnika Częstochowska  
42-201 Częstochowa

Częstochowa, dn. 31.08.2024

**S E K R E T A R I A T**  
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia ..... 04. 09. 2024 .....

Zarejestrowano pod nr ..... 510.5-6/21 .....

Podpis .....  .....

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Konrada Jurasza  
pt. Bezzegarowy przetwornik TDC (Time-to-Digital Converter) z sukcesywnym  
równoważeniem upływu czasu.**

Podstawą formalną recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, z dnia 4 lipca 2024, powołująca mnie na recenzenta w/w rozprawy. Ocena została dokonana zgodnie z przepisami Ustawy z dnia 20.07.2018, *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2023, poz. 742).

### 1. Temat pracy i jego znaczenie.

Tematyka rozprawy doktorskiej dotyczy projektowania asynchronicznych przetworników czasowo-cyfrowych (TDC) w kontekście ich potencjalnego zastosowania do przetwarzania analogowo-cyfrowego (A/C). Zainteresowanie przetwornikami A/C wykorzystującymi ideę przetwarzania w trybie czasowym wynika z trendów technologicznych i aplikacyjnych we współczesnej elektronice. Stałe dążenie do zmniejszania mocy rozpraszanej układów elektronicznych, jak również wymogi najnowszych procesów technologicznych, zmuszają projektantów do ciągłego zmniejszania stosowanych napięć zasilających. Wiąże się to z istotnymi problemami w realizacji tradycyjnych bloków analogowych i mieszanych (analogowo-cyfrowych), wynikających między innymi z pogarszającego się stosunku napięć progowych tranzystorów, wejściowych napięć niezrównoważenia i szumów do napięcia zasilania, a w konsekwencji ograniczenia zakresu dynamicznego realizowanych układów.

Jednym z podejść proponowanych dla przezwyciężenia w/w problemów jest zastosowanie układów przetwarzających sygnały w trybie czasowym, a nie napięciowym. W układach takich informacja zakodowana jest w postaci ciągu impulsów prostokątnych, których czas trwania jest proporcjonalny do chwilowych wartości oryginalnego sygnału wejściowego. Ten sposób kodowania i przetwarzania sygnału posiada wiele zalet, zwłaszcza w przypadku głęboko skalowanych technologii CMOS, gdzie ze względu na duże szybkości przełączania tranzystorów możliwe jest uzyskanie dużej rozdzielczości kodowania sygnału w dziedzinie czasu, a co za tym idzie odpowiednio dużego zakresu dynamicznego, nawet w warunkach bardzo niskich napięć zasilających. Operacja kodowania sygnału w dziedzinie czasu jest dokonywana przez specjalne układy kodujące (TEM), natomiast konwersja odcinka czasu na jego reprezentację cyfrową jest realizowana przez układy TDC.

Istnieje wiele możliwych sposobów realizacji układów TDC. Jedną z możliwości polega na wykorzystaniu metody aproksymacji sukcesywnej. Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w ten nurt badań. Jest ona poświęcona realizacji asynchronicznego przetwornika TDC, którego zasada działania jest oparta na znanym wcześniej lecz niezweryfikowanym praktycznie algorytmie sukcesywnego równoważenia upływu czasu (STB-TDC). Algorytm ten, będący wariantem realizacyjnym metody aproksymacji sukcesywnej, umożliwia konwersję czasowo-cyfrową w sposób bezpośredni, bez przetwarzania czasu na inną pośrednią wielkość fizyczną, co pozwala na uproszczenie struktury i ograniczenie błędów konwersji. Ponadto, asynchroniczny tryb pracy ma zapewnić większą sprawność energetyczną struktury, za względu na potencjalnie mniejszą liczbę przełączeń elementów aktywnych w cyklu konwersji.

Podsumowując ten punkt należy stwierdzić, że Doktorant podejmuje w swej pracy aktualny problem naukowy, mający istotne znaczenie aplikacyjne, zwłaszcza w kontekście potrzeby energooszczędnych rozwiązań w takich obszarach jak przenośny sprzęt do diagnostyki medycznej, elektroniczne implanty medyczne czy autonomiczne węzły sieci sensorowych.

## **2. Zakres i cel rozprawy doktorskiej.**

Głównym celem pracy było zoptymalizowanie i zaimplementowanie w postaci układu scalonego nowej, w pełni asynchronicznej struktury przetwornika TDC, wykorzystującej metodę STB-TDC, dowodząc w ten sposób jej praktycznej realizowalności. Wymagało to rozwiązania szeregu nietrywialnych problemów układowych, związanych z projektowaniem układów mikrostruktury krzemowej i optymalizacją ich działania. Ponadto doktorant podjął się wyznaczenia czasu przetwarzania przetwornika i dowiedzenia, że jest on liniową funkcją mierzonego interwału czasu.

Główne tezy pracy brzmią 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.

W mojej opinii Doktorant poprawnie określił zakres i tezy pracy. Podjęcie przez niego tematyki projektowania asynchronicznych przetworników TDC miało silne uzasadnienie teoretyczne i praktyczne, wnosząc wkład do rozwoju tej klasy układów elektronicznych.

## **3. Struktura rozprawy doktorskiej.**

Rozprawa doktorska liczy 147 stron wraz ze wszystkimi wykazami, dodatkami i spisem literatury. Materiał został podzielony na 7 rozdziałów. Zamieszczony spis literatury zawiera 118 pozycji, w tym 10, których współautorem jest Doktorant. Znacząca część pozycji literaturowych to publikacje z ostatniej dekady. Zarówno ilość jak i aktualność przywoływanych publikacji świadczy o dobrym rozeznaniu Doktoranta w literaturze przedmiotu.

W rozdziale wstępnym Doktorant uzasadnia potrzebę wykonania przeprowadzonych prac projektowo badawczych oraz formułuje główne cele i tezy rozprawy. Omówione są

główne zasady techniki TMSP (*Time-Mode Signal Processing*) i ewentualne korzyści wynikające z tego podejścia do przetwarzania sygnałów.

Rozdział drugi jest poświęcony przeglądowi stosowanych obecnie metod przetwarzania analogowo-cyfrowego, wykorzystujących kodowanie sygnałów w dziedzinie czasu. Omówione zostają kodery TEM, kodowanie w dziedzinie czasu metodą próbkowania progowego LCS oraz przykładowe realizacje układów TDC. Szczególną uwagę przywiązuje Autor do omówienia asynchronicznego przetwornika TDC z sukcesywną redystrybucją ładunku (SCR-TDC), szczegółowo przedstawiając jego strukturę i zasadę działania.

Rozdział trzeci omawia zasady przetwarzania czasowo-cyfrowego z wykorzystaniem metody sukcesywnego równoważenia upływu czasu STB-TDC, na których oparty jest układ przetwornika zrealizowany w pracy. Doktorant rozpoczyna swoje rozważania od klasyfikacji wariantów metody aproksymacji sukcesywnej, oraz oceny ich przydatności do przetwarzania niedekrementowalnych wielkości fizycznych, takich jak czas. Następnie, przy użyciu poglądowego modelu hydraulicznego, omówiony został algorytm STB-TDC. Doktorant przedstawia również schemat elektryczny, który stanowi układową implementację tego algorytmu, a następnie przeprowadza badania symulacyjne tej struktury przy założeniu idealnych elementów układowych. Symulacje zostały wykonane w środowisku Cadence Virtuoso, przy założeniu realistycznych wartości elementów, wynikających ze wstępnej analizy spodziewanych efektów pasożytniczych dla założonej technologii wykonania. Otrzymane wyniki symulacyjne zostały przedstawione w pracy. Potwierdzają one, że na poziomie ideowym badana struktura jest w pełni sprawna funkcjonalnie.

Zasadnicze wyniki własnej pracy analityczno-projektowej Doktoranta przedstawione są w kolejnych rozdziałach rozprawy. W rozdziale czwartym przedstawiono analizę teoretyczną ważnego parametru przetwornika jakim jest czas przetwarzania. Analiza została przeprowadzona dla przypadku idealnego, tzn. bez uwzględnienia opóźnień wnoszonych przez nieidealności elementów przetwornika. W sposób nie budzący wątpliwości dowiodła ona, że czas przetwarzania przetwornika STB-TDC jest liniową funkcją długości mierzonego interwału czasu z dokładnością do kroku kwantyzacji, które to stwierdzenie stanowi drugą z tez postawionych w dysertacji.

W obszernym rozdziale piątym Autor omawia implementację przetwornika w technologii UMC 0,18  $\mu\text{m}$ . Omówiona zostaje realizacja matrycy pojemności, kluczy analogowych, źródeł prądowych, źródła napięcia referencyjnego, tzw. układu wzajemnego wykluczania, komparatorów i asynchronicznej maszyny stanów sterującej pracą przetwornika. W celu optymalizacji działania struktury Doktorant omawia i uwzględnia w projekcie wpływ efektów drugorzędnych, takich jak pojemności pasożytnicze, opóźnienia wnoszone przez elementy elektroniczne, wpływ niedopasowań tranzystorów czy efekty wstrzykiwania ładunków przy przełączaniu kluczy. Omówione zostają nie tylko schematy ideowe wymienionych wyżej podukładów ale także ich topografia, mająca wpływ na ich funkcjonowanie. Autor podejmuje szereg kompromisów układowych pomiędzy powierzchnią zajmowaną przez układ a dokładnością realizacji poszczególnych funkcji. Rozważa problemy związane z doprowadzeniem zasilania i wpływ rozmieszczenia poszczególnych podukładów na czasy propagacji sygnałów sterujących. Szczegółowo opisany jest również proces projektowania asynchronicznego automatu sterującego. W celu kompensacji wpływu skoków napięcia podczas przełączania pojemności referencyjnych Autor proponuje ciekawy mechanizm wstępnego wstrzykiwania ładunku. Ponadto Autor proponuje kompensację wpływu pojemności pasożytniczych matrycy kondensatorów za pomocą dodatkowych pojemności

zapewniających utrzymanie binarnych stosunków poszczególnych pojemności przetwornika. W rozdziale przedstawiono również wyniki badań symulacyjnych całej struktury, obejmujące zmiany poboru mocy w czasie, charakterystykę przetwarzania przetwornika oraz charakterystyki błędów nieliniowości różniczkowej i całkowitej. Wyniki symulacji całej struktury, jak również poszczególnych podukładów, przedstawiono w tablicach.

Rozdział szósty jest poświęcony wynikom badań eksperymentalnych rzeczywistego układu wykonanego w technologii UMC 0,18  $\mu\text{m}$ , co potwierdza zamieszczona mikrofotografia struktury krzemowej. Rozdział rozpoczyna opis sterowanego komputerowo stanowiska pomiarowego, które Doktorant zaprojektował i zbudował w celu przeprowadzenia badań. Przedstawione zostają zmierzone charakterystyki przetwarzania układu oraz wykresy błędów nieliniowości różniczkowej (DNL) i całkowitej (INL) dla różnych napięć zasilania. Analiza błędów przetwarzania prowadzi Autora do wniosku, że uzyskana rozdzielczość przetwornika odpowiada raczej siedmiu, niż zakładanym ośmiu bitom. Następnie, na próbie 15-stu badanych układów, Autor dokonuje analizy statystycznej takich parametrów jak zakres przetwarzania, błąd zera, błędy DNL i INL dla różnych napięć zasilania. Wyniki tych badań przedstawiono w postaci histogramów oraz dodatkowo zebrano w tabelach. W ostatnim punkcie rozdziału Autor przeprowadza dyskusję uzyskanych wyników i podaje potencjalne przyczyny zauważonych różnic pomiędzy wynikami symulacji i pomiarów.

W ostatnim, siódmym rozdziale, Autor zwięźle podsumowuje swoje osiągnięcia, potwierdzając dowiedzenie obu postawionych w rozprawie tez. Jednocześnie wskazuje na możliwości modyfikacji i ulepszeń zaprojektowanej struktury, co wytycza drogę do dalszych prac badawczych nad jej udoskonaleniem.

#### **4. Ogólna ocena rozprawy doktorskiej.**

Praca doktorska mgr. inż. Konrada Jurasza ma charakter projektowo-analityczny. Główne jej cele to zaprojektowanie funkcjonującego scalonego przetwornika TDC, którego działanie jest oparte o niezwyfikowany wcześniej w praktyce algorytm STB-TDC, oraz analiza czasu przetwarzania tego przetwornika. Autor z sukcesem zrealizował postawione zadania. W wyniku jego prac powstał funkcjonujący układ scalony, dowodzący praktycznej realizowalności układu o takiej zasadzie działania. Implementacja przetwornika w formie scalonej wymagała rozwiązania szeregu problemów układowych i przeprowadzenia wielu zabiegów optymalizacyjnych. Sposób rozwiązania postawionego zadania jest kompletny i obejmuje główne etapy procesu projektowo-badawczego, od sformułowania założeń, przez opracowanie układu aż po weryfikację jego działania. Proces projektowy jest prowadzony w sposób przemyślany i analitycznie uzasadniony. Działanie zaprojektowanego układu zostało potwierdzone eksperymentalnie, a główne wyniki zaprezentowano w pracy w postaci przejrzystych rysunków i tabel. Wartość przeprowadzonych badań zwiększa analiza statystyczna, przeprowadzona dla próby piętnastu zmierzonych układów. Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

- projekt i optymalizację całej struktury przetwornika, a w szczególności zaproponowane sposoby optymalizacji takich aspektów projektowych jak wpływ pojemności pasożytniczych wewnętrznych szyn sygnałowych, spadków napięć na kluczach, czasu włączania źródeł prądowych i ich asymetrii, czasu odpowiedzi komparatorów czy obciążenia źródła referencyjnego  $V_{REF}$ . Na uwagę zasługuje też zaproponowany przez Autora mechanizm wstępnego wstrzykiwania ładunku, który prowadzi do zmniejszenia błędów przetwornika.

- przedstawienie wyników badań struktury krzemowej przetwornika, wraz ze szczegółową dyskusją błędów i analizą statystyczną, pozwalających na identyfikację ograniczeń przyjętej metody przetwarzania.
- analizę czasu konwersji przetwornika, prowadzącą do uzyskania zależności analitycznych potwierdzających liniową zależność tego parametru od długości mierzonego interwału czasu.

Z całkowitą pewnością można stwierdzić, że Autor osiągnął postawione cele i dowiódł głównych tez pracy. Na uznanie zasługuje szeroki zakres wiedzy teoretycznej i umiejętności praktycznych Doktoranta w zakresie projektowania układów mikroelektronicznych i dedykowanych narzędzi informatycznych do projektowania i symulacji.

Należy również podkreślić wysoki poziom edytorski i językowy pracy. Praca jest napisana precyzyjnym językiem technicznym, z użyciem właściwej terminologii, bez dwuznacznych sformułowań i bez niepotrzebnego używania określeń żargonowych. Struktura pracy nie budzi zastrzeżeń.

Reasumując, recenzowana praca doktorska prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i zawiera wnioski badawcze, które mają znaczenie aplikacyjne. Prezentuje ona ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

## 5. Uwagi krytyczne.

Uzyskane wyniki jak i strukturę i język pracy oceniam wysoko. Szczegółowa lektura ujawnia jednak pewne niedociągnięcia i elementy dyskusyjne przedstawione poniżej.

### a) Elementy dyskusyjne.

- W mojej opinii praca zyskałaby na wartości gdyby zamieścić w niej definicje podstawowych parametrów przetworników TDC, takich jak błędy nieliniowości różniczkowej i całkowitej, błąd zera, efektywna liczba bitów etc, nawet jeśli definicje te uznajemy za powszechnie znane.
- Wyniki badań eksperymentalnych byłyby jeszcze bardziej pełne, gdyby zamieścić również wyniki badania wpływu temperatury na pracę przetwornika. W przypadku braku możliwości przeprowadzenia takich pomiarów nawet wyniki badań symulacyjnych byłyby tutaj interesujące.
- Interesującym byłoby przeprowadzenie analizy porównawczej z istniejącymi przetwornikami TDC opartymi na innych metodach konwersji, np. w formie tabeli zawierającej podstawowe parametry przetworników.

### b) drobne uwagi redakcyjne.

Pomimo starannej edycji pracy Autor nie ustrzegł się drobnych błędów redakcyjnych wymienionych niżej:

- kierunek zmian sygnału  $y(t)$  na rys.2.2. jest przeciwny do opisu w tekście.
- dobrym zwyczajem jest oznaczanie składowych stałych prądów i napięć dużą literą z dużym indeksem.
- rys. 2.5: nie wyszczególniono rysunków a), b) i c) w podpisie rysunku.
- rys.2.8: źródło  $I_a$  powinno być dołączone do  $V_{DD}$ .
- rys. 3.12: nie można odnaleźć klucza  $SW_0$  wymienionego w tekście.
- str.52: "zatrzaśnięte w rejestrze", wolałbym sformułowanie "zapamiętane w rejestrze".

- rys.3.16: skala na osi X powinna być w [ $\mu$ s] a nie [s].
- rys.3.16 i 3.17: W podpisie rysunku dobrze byłoby zaznaczyć, że wyniki dotyczą przetwornika idealnego.
- str. 72: jest "wpięte", powinno być "włączone".
- str.72. i kolejne. Zamiennie są używane określenia "wymiary" i rozmiary" w odniesieniu do szerokości i długości kanałów tranzystorów MOS. W mojej opinii należy preferować określenie "rozmiary".
- rys.5.6: kolory charakterystyk wydają się być inne niż w podpisie pod rysunkiem.
- str. 81: jest "będzie ona ładowana", powinno być "będzie on ładowany".
- tabela 5.4: "liczba aktywnych tranzystorów - 9", powinno być 7.
- str.91: jest "chwilowe zapady napięcia zasilania", wolałbym "chwilowe wahania napięcia zasilania".
- str.94: jest "na wejścia odwracającego", powinno być 'na wejścia odwracające".
- str.96: jest "podzespołów", powinno być "podukładów".
- tabela 5.8 i inne: "tranzystory CMOS", wolałbym "tranzystory MOS".
- rys. 5.31: Brak odniesień do rysunków a) i b) w podpisie rysunku.
- str.136: jest "stosunkowo duża czułość", lepiej napisać "stosunkowo duża wrażliwość" lub "stosunkowo duża zależność".

Powyższe uwagi krytyczne nie mają istotnego wpływu na ogólnie pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej. Wymienione niedoskonałości nie kwestionują wysokiej wartości merytorycznej opisanego rozwiązania, a odnoszą się jedynie do sposobu jego prezentacji.

## 6. Wniosek końcowy.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Konrada Jurasza spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 20.07.2018, *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2023, poz. 742). Rozprawa przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a ponadto prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Tomasz Kulej