

Obszerwany w ostatnich dziesięcioleciach dynamiczny rozwój techniki oraz metod badawczych spowodował między innymi wzrost zainteresowania precyzyjnym pomiarem odcinka czasu upływającego pomiędzy zdarzeniami fizycznymi, a urządzenia mierzące tenże odcinek znajdują coraz powszechniejsze zastosowanie w różnych obszarach nauki i techniki. Przykładowo w badaniach w zakresie fizyki jądrowej towarzyszą wykrywaniu i identyfikacji cząstek, badaniu struktury materii poprzez rozpraszanie cząstek (CERN) [1] oraz do zliczania fotonów [2, 3]. Stosowane są w spektrometrii masowej czasu przelotu (TOFMS) [4], służącej do określenia składu izotopowego pierwiastków oraz w badaniach czasu życia stanów wzbudzonych atomów. Przykładami kolejnych zastosowań są określanie pozycji w systemach nawigacyjnych [5] i kwantowa transmisja danych [6]. Wśród powszechnych już zastosowań precyzyjnych pomiarów odcinka czasu wymienić należy pomiary odległości za pomocą odbitej wiązki ultradźwięków (TOF), fal radiowych albo światła lasera [7]. W przemyśle są to również pomiary intensywności przepływu cieczy i gazów realizowane z użyciem przepływomierzy ultradźwiękowych [8]. Z kolei w medycynie układy pomiaru odcinka czasu stosowane są w pozytonowej emisyjnej tomografii komputerowej (PET) [9]. Inne spektakularne zastosowanie to ultra szybkie kamery o bardzo wysokich częstotliwościach rejestracji klatek rzędu $10^{12}/s$, które umożliwiają zarejestrowanie poruszającego się pojedynczego fotonu [10, 11] i odtworzenie jego ruchu w zwolnionym tempie. Pomiary odcinka czasu od wielu lat mają zastosowania również w telekomunikacji, głównie w pomiarach fluktuacji fazowych sygnałów zegarowych i sygnałów danych [12], co ma istotne znaczenie w świetle coraz większych szybkości transmisji danych.

Od urządzeń pomiaru odcinka czasu wymaga się jednocześnie coraz wyższej precyzji (rzędu pojedynczych pikosekund) i stosunkowo szerokiego zakresu pomiarowego (rzędu kilkudziesięciu sekund i więcej). System pomiaru odcinka czasu powinien charakteryzować się również krótkim czasem martwym, a układ pomiarowy powinien akceptować impulsy o dużej intensywności. Jest to szczególnie ważne w systemach pomiarowych stosowanych w eksperymentach fizycznych. Niektóre zastosowania wymagają przy tym wielu kanałów pomiarowych. Dostępne komercyjnie urządzenia często nie spełniają wymagań odnośnie precyzji i zakresu pomiarowego lub posiadają ograniczoną liczbę kanałów pomiarowych. Dlatego większość urządzeń do precyzyjnego pomiaru odcinka czasu opracowywana jest na potrzeby konkretnego eksperymentu badawczego lub zastosowania.

Precyzyjne systemy pomiaru odcinka czasu posiadają najczęściej budowę modułową. Do ich realizacji stosuje się przeważnie układy specjalizowane lub programowalne wykonane w najnowszych technologiach mikroelektronicznych. Zapewniają one elementy i bloki funkcjonalne charakteryzujące się krótkimi czasami propagacji, co jest istotne z punktu widzenia rozdzielczości projektowanego systemu. Urządzenie do pomiaru odcinka czasu może być zaprojektowane i wykonane jako układ specjalizowany ASIC (Application-Specific Integrated Circuit), czyli układ scalony wykonany w pełnym cyklu projektowo-wytwórczym (*full-custom*). Prototypowanie w tej technologii gwarantuje dużą kontrolę nad opracowywanym układem, począwszy od rozmiarów tranzystorów, co wpływa na gęstość upakowania, poprzez rozmieszczenie elementów na podłożu, co silnie określa opóźnienia w rozprowadzaniu sygnałów. Jednakże odbywa się to kosztem wydłużonego czasu

prototypowania i weryfikacji. Pierwsze przetworniki czasowo-cyfrowe w tej technice zostały wykonane w technologii CMOS o rozmiarze charakterystycznym $2,5\ \mu\text{m}$ [13].

Alternatywą do układów ASIC techniką realizacji scalonych urządzeń do pomiaru odcinka czasu jest zastosowanie układów programowalnych, w szczególności matryc bramkowych FPGA (Field-Programmable Gate Array). Pierwszy scalony licznik czasu i częstotliwości z użyciem układu FPGA opracowano w Wojskowej Akademii Technicznej w 1997 [14]. W liczniku tym uzyskano rozdzielczości 200 ps i niepewność pomiarową nie gorszą niż 150 ps. Zastosowane układy pASIC firmy Quicklogic nie wymagają wstępnej rekonfiguracji i są gotowe do użycia po załączeniu napięcia zasilania. Wadą układów pASIC jest możliwość jedynie jednokrotnego programowania, co znacznie komplikuje i podraża proces prototypowania.

Na przestrzeni ostatnich 30-stu lat w układach pomiaru odcinka czasu dokonał się znaczący postęp. Przede wszystkim układy te zwiększyły rozdzielczość pomiaru z nanosekund do pikosekund. Rozwój ten zawdzięczają nowszym technologiom produkcji układów scalonych, w tym nowej technologii tranzystorów 3D FinFET [15, 16, 17, 18, 19]. Rozwój technologii mikroelektronicznych zapewniając coraz szybsze działanie elementów umożliwia poprawę parametrów systemów pomiaru odcinka czasu. Przykładowo linie opóźniające zaimplementowane w układach FPGA FLEX10KE firmy Altera, wytwarzanych w latach 1998 – 2002 w technologii $0,22\ \mu\text{m}$, osiągały rozdzielczość rzędu $0,5\ \text{ns}$ [20]. Natomiast linie opóźniające zaimplementowane w nowszych układach FPGA UltraScale firmy AMD/Xilinx, wykonywanych w technologii 20 nm, posiadają rozdzielczość rzędu pojedynczych pikosekund [21]. Firma TSMC (Taiwan Semiconductor Manufacturing Company), produkująca układy scalone dla firmy Xilinx, wytwarza obecnie układy scalone w technologii 5 nm (układy System On Chip do telefonów komórkowych i kart graficznych). Prognozowane jest przejście na technologię 2 nm w ciągu najbliższych kilku lat. Z coraz mniejszymi rozmiarami tranzystorów wiąże się zmniejszenie pojemności pasożytniczych, prowadzące do skracania czasów propagacji sygnałów i skutkujące projektami układów i systemów o coraz większej rozdzielczości i szybkości działania. Kolejnymi pozytywnymi efektami miniaturyzacji są też zmniejszenie mocy strat oraz ograniczenie efektu metastabilności.

W systemach pomiaru odcinka czasu, które są implementowane w układach FPGA, stosuje się na ogół przetworniki czasowo-cyfrowe oparte na wielosegmentowych liniach opóźniających, wykorzystujących łańcuchy szybkich przeniesień arytmetycznych. Układy FPGA Kintex UltraScale (AMD/Xilinx) posiadają duże zasoby logiczne i funkcjonalne oraz pracują z wysokimi częstotliwościami, co umożliwia budowę wielosegmentowych linii opóźniających (WLO) o rozdzielczości pojedynczych pikosekund. Niestety, charakterystyki przetworników opartych na WLO wykazują silnie nieliniowości. Ponadto, zaobserwowano istotny wpływ błędu bąbelkowego, co stanowi dodatkową trudność w procesie dekodowania fazy zegara wzorcowego. Dalsza poprawa parametrów systemu pomiaru odcinka czasu jest możliwa między innymi poprzez zastosowanie optymalnie dobranych zwielokrotnionych wielosegmentowych linii opóźniających (ZWLO). Zmienia to zasadniczo podejście w procesie projektowania ZWLO w tych strukturach.

W niniejszej pracy przedstawiono projekt systemu pomiaru odcinka czasu zbudowanego z użyciem wielu wielosegmentowych linii opóźniających. Układ pomiarowy wykorzystuje interpolacyjną metodę Nutta z 16 przetwornikami jednostopniowymi (flash) opartymi na WLO. System został zaimplementowany w układzie programowalnym Kintex UltraScale firmy AMD/Xilinx.

W celu uzyskania możliwie wysokich parametrów metrologicznych opracowano dedykowany algorytm wyboru WLO spośród dostępnego nadmiarowego zbioru linii zaimplementowanych w strukturze FPGA.

Rozprawa jest podzielona na siedem rozdziałów. W rozdziale drugim dokonano przeglądu metod i technik precyzyjnego pomiaru odcinka czasu oraz opisano architekturę wielosegmentowych linii opóźniających.

Cel i tezy rozprawy zawarte są w rozdziale trzecim. Przedstawiono w nim także założenia projektowe i zadania badawcze, których realizacja jest niezbędna do osiągnięcia celu rozprawy.

W rozdziale czwartym opisano budowę i działanie opracowanego systemu pomiaru odcinka czasu zaimplementowanego w układzie programowalnym Kintex UltraScale. Ponadto opisano procedury sortowania segmentów wielosegmentowych linii opóźniających.

W rozdziale piątym zawarto zaproponowane kryteria oraz algorytm selekcji wielosegmentowych linii opóźniających, wybieranych do systemu pomiaru odcinka czasu w celu uzyskania parametrów systemu spełniających przyjęte założenia.

Rozdział szósty zawiera wyniki badań eksperymentalnych opracowanego systemu pomiaru odcinka czasu potwierdzające jego prawidłowe działanie i poprawność przyjętej koncepcji.

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie rozprawy.