

**Układ wysokorozdzielczego przetwornika cyfra-czas
zbudowany z użyciem bloków DSP układu programowalnego FPGA**

Przedmiotem wynalazku jest układ przetwornika cyfra-czas (ang. digital-to-time converter, DTC) zbudowany z użyciem dedykowanych bloków funkcjonalnych do cyfrowego przetwarzania sygnałów (ang. digital signal processing, DSP) wbudowanych w układy programowalne typu FPGA (ang. field-programmable gate array). Zgłoszony wynalazek obejmuje dziedzinę wiedzy określoną jako elektronika, w tym zakresie projektowanie urządzeń do precyzyjnej metrologii czasu.

Przetworniki cyfra-czas służą do zamiany informacji podanej w postaci cyfrowej na odpowiednią długość odcinka czasu, reprezentowaną jako odległość pomiędzy zboczami sygnałów elektrycznych. Tego typu układy znajdują zastosowanie m.in. jako źródła referencyjnych odcinków czasu, elementy automatycznych systemów testujących, dedykowane urządzenia do eksperymentów fizycznych i technik kwantowych, elementy synchronizujące oraz opóźniające.

Najprostsza cyfrowa metoda generacji odcinka czasu (metoda licznikowa) polega na wytworzeniu impulsu start i jednoczesnym uruchomieniu licznika binarnego oraz wytworzeniu impulsu stop gdy licznik zliczy określoną liczbę okresów sygnału zegarowego. Rozdzielczość generacji jest jednak w tym wypadku ograniczona do okresu sygnału zegarowego. Wyższą rozdzielczość można uzyskać stosując metodę licznikową z manipulacją częstotliwości (J. Kalisz, A. Poniecki, K. Różyc, „A simple, precise, and low jitter delay/gate generator”,

Review of Scientific Instruments, vol. 74, 3507, 2003) lub manipulacja fazy (P. Kwiatkowski, Z. Jachna, K. Różyc, J. Kalisz, „Accurate and low jitter time-interval generators based on phase shifting method”, Review of Scientific Instruments, vol. 83, 034701, 2012). Można także zastosować dwa sygnały zegarowe, których koincydencja spowoduje wytworzenie impulsu (metoda noniusza z użyciem oscylatorów, P. Chen, P.-Y. Chen, J.-S. Lai, Y.-J. Chen, „FPGA vernier digital-to-time converter with 1.58 ps resolution and 59.3 minutes operation range”, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 57, 5371812, 2010).

W układach scalonych do wytwarzania odcinków czasu w niewielkim zakresie, ale z bardzo wysoką rozdzielczością, stosuje się przetworniki cyfra-czas zbudowane w oparciu o programowalne linie opóźniające. Tego typu linie składają się z szeregowo połączonych elementów opóźniających. Czas odpowiedzi elementu opóźniającego od wystąpienia zmiany na wejściu do uzyskania odpowiedzi na wyjściu określa się jako czas propagacji. W układach programowalnych typu FPGA linie opóźniające można uzyskać przy użyciu elementów programowalnych bloków logicznych. W najprostszym przypadku będą to tablice przeglądowe (ang. look-up table, LUT; S. Chan „Programmable delay line using configurable logic block”, U.S. patent 7,049,845, May 2006). W praktyce w takim rozwiązaniu duży wpływ na uzyskaną rozdzielczość linii mają ścieżki połączeniowe pomiędzy kolejnymi tablicami przeglądowymi. Wyższą rozdzielczość generacji można uzyskać stosując wiele linii opóźniających połączonych ze sobą na wyjściu poprzez bramkę logiczną (Y.-Y. Chen et al. „Design and Implementation of an FPGA-Based Data/Timing Formatter” Journal of Electronic Testing, vol. 31, no. 5-6, 2015). Innym rozwiązaniem jest zastosowanie jako element opóźniający tzw. łańcuchów szybkich przeniesień. Są to elementy programowalnego bloku logicznego, posiadające dedykowane połączenia między sobą oraz z kolejnymi

łańcuchami w sąsiednich blokach. Dzięki temu uzyskuje się szybszą propagację przeniesienia w implementowanych z ich użyciem układach arytmetycznych. Korzystając z szeregowego połączenia ze sobą wielu elementów łańcucha szybkich 5 przeniesień uzyskuje się w układzie FPGA linie opóźniająca o możliwie wysokiej rozdzielczości. W literaturze znanych jest wiele rozwiązań przetworników cyfra-czas zbudowanych w oparciu o tego typu linie pojedyncze lub podwójne (metoda noniusza z użyciem linii opóźniających), np.: R. Giordano et al. 10 „Digitally controlled oscillator (dco) architecture” PCT international application no. PCT/IB2015/058390, May 2016; P. Kwiatkowski, “Układ generacji ciągu impulsów elektrycznych o regulowanych relacjach czasowych”, patent 423627, 28.11.2017; K. Cui, X. Liu, R. Zhu „A high-resolution 15 programmable Vernier delay generator based on carry chains in FPGA” Review of Scientific Instruments, vol. 88, 064703, 2017.

Przytoczone przykłady rozwiązań przetworników cyfra-czas implementowane w układach FPGA mają pewne ograniczenia. Typowa metoda licznikowa charakteryzuje się niską rozdzielczością. 20 Metoda licznikowa z manipulacją częstotliwości lub fazy wymaga użycia syntezeru częstotliwości (np. w formie dedykowanego bloku funkcjonalnego do zarządzania sygnałem zegarowym w układzie FPGA), którego parametry decydują o ostatecznej rozdzielczości generacji. Metoda noniusza charakteryzuje się 25 niską szybkością powtarzania generowanych odcinków czasu. Przesuw fazy może być także realizowany z użyciem linii opóźniających implementowanych w matrycy programowalnej układu FPGA. W przypadku linii zbudowanej z tablic przeglądowych uzyskuje się jednak niewielką rozdzielczość, a w przypadku 30 linii zbudowanej w oparciu o łańcuch szybkich przeniesień uzyskuje się niewielki zakres generacji i zużywa znaczną liczbę zasobów logicznych układu FPGA (programowalnych bloków logicznych).

Coraz większa liczba układów FPGA jest wyposażona w dedykowane bloki funkcjonalne do cyfrowego przetwarzania sygnałów (DSP). Ich architektura jest zoptymalizowana do wykonywania operacji pomnóż-akumuluj (ang. multiply-accumulate, MAC), w szczególności posiadają one dedykowane układy sumujące i mnożące oraz rejestry do zatrzymywania wyników cząstkowych w celu uzyskania przetwarzania potokowego. Bloki DSP mają ograniczoną funkcjonalność w porównaniu do konfigurowalnych bloków logicznych za to pozwalają uzyskać znacznie wyższą szybkość wykonywania operacji arytmetycznych na wielobitowych danych. Korzystając z tej cechy możliwe jest opracowanie przetwornika cyfra-czas o wyższej rozdzielczości niż w przypadku klasycznego układu tego typu, zaprojektowanego z użyciem łańcucha szybkich przeniesień.

Układ według wynalazku zbudowany jest z bloku DSP układu FPGA skonfigurowanego do wykonywania operacji dodawania dwóch wielobitowych danych, gdzie jedna z danych (pierwszy składnik sumy) jest na stałe zwarta do stanu logicznego wysokiego (wartość maksymalna) a druga (drugi składnik sumy) określa w kodzie 1 z n długość wytwarzanego odcinka czasu i jest dołączona do sumatora poprzez rejestr z asynchronicznym zerowaniem. Sygnał wyzwolenia (TRIG) jest jednocześnie dołączony do rejestru, jako sygnał zegarowy, oraz wyjścia START układu przetwornika. Wyjście przeniesienia z sumatora bloku DSP jest jednocześnie dołączone do wejścia zerowania bloku DSP oraz wyjścia STOP układu przetwornika.

Działanie układu według wynalazku jest następujące. Sygnał wyzwolenia (TRIG) jest dystrybuowany jednocześnie na wyjście układu przetwornika jako sygnał START oraz stanowi sygnał zegarowy dla rejestru w bloku DSP. W chwili pojawienia się zbocza aktywnego sygnału TRIG dana wejściowa zapisana w kodzie 1 z n jest zapisywana do rejestru. Zmiana stanu wyjściowego rejestru inicjuje propagację przeniesienia

w sumatorze bloku DSP, począwszy od pozycji określonej w kodzie 1 z n . Zatem im pozycja stanu wysokiego w kodzie 1 z n bliższa najmniej znaczącemu bitu tym dłuższy czas propagacji przeniesienia, a więc dłuższy odcinek czasu pomiędzy zboczami narastającymi impulsów generowanych na wyjściach START i STOP. Wystąpienie przeniesienia (stan logiczny wysoki) na wyjściu przeniesienia bloku DSP powoduje zerowanie stanu rejestru i tym samym przetwornik jest gotowy do wytworzenia kolejnego odcinka czasu. Wiele bloków DSP może być ze sobą łączonych szeregowo przy użyciu wyjścia i wejścia przeniesienia, rozszerzając w ten sposób zakres generacji przetwornika.

Zaletą wynalazku jest to, iż pozwala on uzyskać wyższą rozdzielczość oraz szerszy zakres generacji niż przetworniki cyfra-czas oparte o łańcuch szybkich przeniesień, oszczędzając jednocześnie zasoby logiczne ogólnego przeznaczenia (programowalne bloki logiczne) układu FPGA.

Istotą wynalazku jest układ przetwornika cyfra-czas składający się z bloku DSP skonfigurowanego jako sumator dwóch k -bitowych sygnałów (składników sumy) dołączonych do wejść oraz posiada wejście przeniesienia i wyjście przeniesienia z układu sumatora, gdzie k -bitowe wejście jest zwarte na stałe do stanu logicznego wysokiego a drugie wejście jest podłączone do źródła k -bitowego sygnału cyfrowego w kodzie 1 z n , gdzie $n=k$ określa liczbę bitów sumatora i jest dołączone do sumatora poprzez rejestr. Wejście wyzwiania (TRIG) jest jednocześnie dołączone do wyjścia START układu oraz do wejścia zegarowego rejestru. Wejście przeniesienia jest dołączone do stanu logicznego niskiego a wyjście przeniesienia jest wyjściem STOP układu i jest jednocześnie dołączone do wejścia asynchronicznego zerowania rejestru.

Korzystnie, gdy układ zawiera m -bloków DSP połączonych ze sobą szeregowo poprzez wyjścia przeniesienia i wejścia przeniesienia. Sygnał wyzwolenia (TRIG) jest jednocześnie dołączony do wyjścia START układu oraz do wejść zegarowych

rejestrów we wszystkich blokach DSP. Sygnał ze źródła p -bitowego sygnału cyfrowego w kodzie 1 z n , gdzie $n=p=m \times k$, jest dołączony na k -bitowe wejścia w taki sposób, że sygnały o numerach od $(i-1) \times k + 1$ do $i \times k$ są dołączone do i -tego bloku DSP, gdzie $i=1:m$. Wejście przeniesienia pierwszego bloku DSP jest dołączone do stanu logicznego niskiego a wyjście przeniesienia m -tego bloku DSP jest wyjściem STOP układu i jest jednocześnie dołączony do wejść asynchronicznego zerowania rejestrów we wszystkich blokach DSP.

10 Układ według wynalazku został przedstawiony na rysunkach, z których Fig. 1 ukazuje układ z jednym blokiem DSP, a Fig. 2 przedstawia układ z dwoma blokami DSP.

Układ przetwornika cyfra-czas w korzystnym przykładzie wykonania został zaimplementowany w układzie programowalnym 15 FPGA XC6SLX9 z rodziny Spartan-6 firmy Xilinx (technologia CMOS 45 nm) i umieszczony w generatorze odcinków czasu TIG 101.

Składał się on z 16-tu bloków DSP (1) skonfigurowanych jako sumatory (2) dwóch 48-bitowych sygnałów (składników sumy) dołączonych do wejść A:B:D (3) oraz wejść C (4) bloków DSP 20 oraz posiadał wejście przeniesienia CARRYCASIN (5) i wyjście przeniesienia CARRYCASOUT (6) z układu sumatora, gdzie 48-bitowe wejście A:B:D (3) było zwarte na stałe do stanu logicznego wysokiego a wejście C (4) było podłączone do źródła $16 \times 48 = 768$ -bitowego sygnału cyfrowego w kodzie 1 z n (7). 25 Źródłem sygnału cyfrowego w kodzie 1 z n (7) był sterownik SPI (ang. *Serial Peripheral Interface*), pełniący jednocześnie rolę układu komunikacyjnego z zewnętrzną aplikacją sterującą zainstalowaną na komputerze. Źródło sygnału cyfrowego w kodzie 1 z n (7) było dołączone do sumatorów (2) poprzez rejestry 30 (8). Do wejście wyzwalania (TRIG) podłączono sygnał zegarowy o częstotliwości 25 MHz z zewnętrznego syntezyera częstotliwości. Wejście wyzwalania (TRIG) było jednocześnie dołączone do wyjścia START układu oraz do wejść zegarowych rejestrów (9). Wejście przeniesienia pierwszego bloku DSP (5a)

zostało dołączone do stanu logicznego niskiego a wyjście przeniesienia z 16-go bloku DSP (6) było wyjściem STOP układu i było jednocześnie dołączone do wejścia asynchronicznego zerowania rejestrów (10). Szeregowe połączenie 16-bloków DSP

5 pozwoliło uzyskać zakres generacji 11,114 ns i rozdzielczość 14,5 ps. Jest to około 2 razy szerszy zakres generacji i 20% lepsza rozdzielczość niż w przypadku zastosowania łańcucha

10 szybkich przeniesień w układzie FPGA tej samej rodziny (odpowiednio 5 ns i 20 ps). Pojedynczy blok DSP charakteryzował się jeszcze wyższą rozdzielczością (9,4 ps, 50% poprawa) ale krótkim zakresem generacji (440 ps).