

Zautomatyzowane stanowisko do identyfikacji charakterystyki przetwarzania precyzyjnego generatora odcinków czasu

Streszczenie. Przedstawiono budowę, zasadę działania oraz wyniki badań zautomatyzowanego stanowiska do identyfikacji charakterystyki przetwarzania precyzyjnego generatora odcinków czasu. Z uwagi na bardzo dużą liczbę nastaw syntezy DDS użytego do budowy generatora, wyznaczenie tej charakterystyki w drodze pomiarów wykonywanych manualnie jest bardzo czasochłonne. Duża powtarzalność uzyskanych wyników umożliwia zapis wyznaczonej charakterystyki przetwarzania w pamięci generatora i wybór odpowiednich nastaw pozwalających uzyskać najmniejsze rozmycie czasowe wytwarzanych odcinków czasu.

Abstract. We present the design, principle of operation and test results obtained in automated test setup for transfer characteristic recognition of precise time interval generator. Due to a very large number of phase steps in DDS synthesizer that was used in the generator, manual measurement process is time consuming and automatic test setup is recommended. As the obtained results are highly repeatable it can be used to build an array of DDS phase settings that ensure lowest timing jitter of output pulses. (**Automated test setup for transfer characteristic recognition of precise time interval generator**)

Słowa kluczowe: Automatyczne stanowisko testujące, generator odcinków czasu, syntezer DDS.

Keywords: Automatic test equipment, time-interval generator, DDS synthesizer.

Wstęp

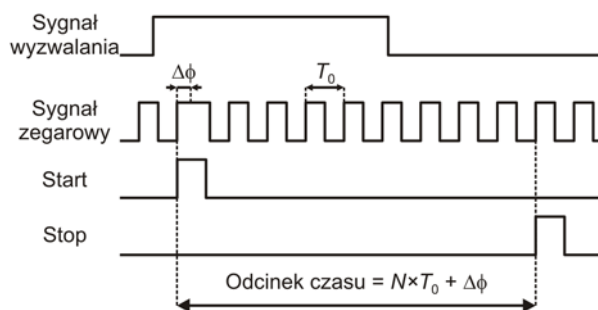
W precyzyjnych cyfrowych generatorach odcinków czasu wykorzystuje się manipulację częstotliwości [1] sygnału zegarowego lub manipulację fazy [2, 3] tego sygnału, co umożliwia wytwarzanie sygnałów o rozmyciu czasowym nie przekraczającym wartości kilku lub kilkunastu ps. Elementem pozwalającym na implementację tych metod jest syntezer DDS (ang. *Direct Digital Synthesis*), umożliwiający precyzyjne zmiany częstotliwości lub fazy referencyjnych sygnałów zegarowych. Niewątpliwą zaletą tego rodzaju generatorów odcinków czasu jest ich duża odporność na oddziaływanie warunków zewnętrznych (zmiany temperatury). Wadą natomiast jest konieczność identyfikacji charakterystyki przetwarzania syntezy, dzięki której możliwy jest wybór odpowiednich nastaw pozwalających uzyskać najmniejsze rozmycie czasowe wytwarzanych odcinków czasu. Z uwagi na bardzo dużą liczbę nastaw syntezy manualne wykonanie pomiarów jest bardzo czasochłonne. Stąd wskazane jest użycie zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego, pozwalającego na identyfikację charakterystyki przetwarzania syntezy.

Precyzyjny generator odcinków czasu

Metoda wytwarzania odcinka czasu, która została użyta w badanym generatorze [4], polega na zliczaniu pełnych okresów sygnału zegarowego T_0 oraz precyzyjnym przesuwie fazy w zakresie pojedynczego okresu (rys. 1).

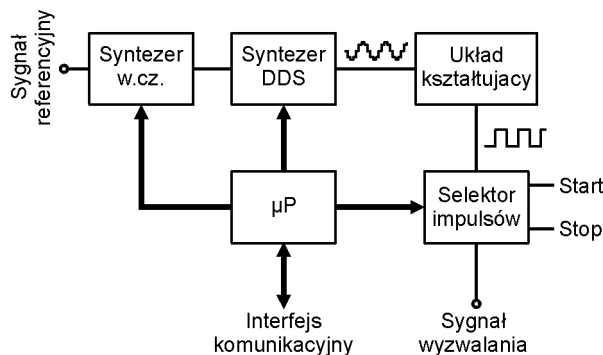
W metodzie tej [2] wytworzony impuls *Start* skorelowany jest z aktywnym zboczem sygnału zegarowego o okresie T_0 . Równocześnie wykonywany jest przesuw fazy sygnału zegarowego o zadaną wartość $\Delta\phi$. Po wystąpieniu N okresów sygnału zegarowego wytwarzany jest impuls *Stop*. Wygenerowany w ten sposób odcinek czasu pomiędzy impulsami *Start* i *Stop* ma długość równą $N \times T_0 + \Delta\phi$.

Uproszczony schemat budowy generatora pokazano na rys. 2. Referencyjny sygnał zegarowy o częstotliwości 10 MHz po powieleniu do częstotliwości 1 GHz z użyciem syntezy w.cz. wykorzystywany jest jako sygnał referencyjny dla kolejnego syntezy DDS. Na jego wyjściu otrzymuje się ciąg dyskretnych próbek, z których po przetworzeniu w układzie kształtującym powstaje fala prostokątna o częstotliwości 50 MHz. Jest ona sygnałem zegarowym dla generatora odcinków czasu. Synchronicznie do tego sygnału wytwarzane są impulsy *Start* i *Stop* w selektorze impulsów. Sterowanie pracą poszczególnych elementów generatora odbywa się za pośrednictwem mikroprocesora (μP).



Rys. 1. Metoda generacji odcinka czasu

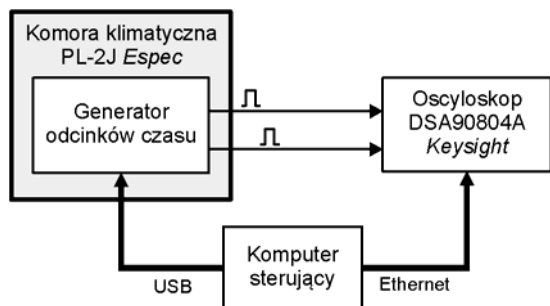
Jednym z elementów mających wpływ na parametry opracowanego urządzenia jest syntezer DDS. Odpowiada on za wytworzenie sygnału zegarowego dla generatora odcinków czasu oraz precyzyjne zmiany fazy tego sygnału. W zbudowanym generatorze odcinków czasu użyto syntezy o możliwie najmniejszym kroku przestrajania fazy ($2\pi/2^{16}$, tj. dla okresu sygnału zegarowego $T_0 = 20$ ns minimalny krok przestrajania wynosi około 305 fs [5]). Chcąc uzyskać możliwie najwyższą dokładność generacji odcinka czasu konieczna była szczegółowa identyfikacja charakterystyki przetwarzania generatora, tj. określenie rzeczywistej szerokości każdego pojedynczego kroku przestrajania fazy w syntezerze DDS. Z uwagi na konieczność wykonania bardzo dużej liczby pomiarów (65 536) opracowano w tym celu dedykowane, zautomatyzowane stanowisko pomiarowe.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy generatora odcinków czasu

Stanowisko pomiarowe

Opracowany generator charakteryzuje się rozmyciem czasowym wytwarzanych odcinków czasu (ang. *time jitter*) nie przekraczającym wartości 10 ps. Stąd stanowisko pomiarowe (rys. 3) zestawiono z użyciem oscyloskopu DSA90804A (*Keysight*) charakteryzującego się poziomem szumów własnych nie przekraczającym 2 ps [6], a badane urządzenie umieszczono w komorze klimatycznej PL-2J (*ESPEC*), zapewniającej stabilną temperaturę pracy (+25°C) w trakcie całej sesji pomiarowej.



Rys.3. Stanowisko pomiarowe

Impulsy *Start* i *Stop* z generatora doprowadzono do wejść oscyloskopu, zaś oprogramowanie zainstalowane na komputerze sterowało przesuwem fazy w syntezerze DDS i odczytem danych z oscyloskopu za pomocą interfejsów odpowiednio USB i Ethernet.

Oprogramowanie sterujące

Do sterowania pracą zestawionego stanowiska zaprojektowano oprogramowanie, którego zadaniem było zautomatyzowanie długiego procesu pomiarowego, który podzielono na iteracje. Pojedyncza iteracja obejmowała zmianę nastawy generatora odcinków czasu oraz wykonanie pomiaru przez oscyloskop. Dodatkowo przyjęto założenie, że przed uruchomieniem oprogramowania, operator ma możliwość ustawienia parametrów wykonywanych badań.

Oprogramowanie zostało napisane w języku C++, zgodnie ze standardem z 2011 roku [7]. Kod programu składa się z trzech głównych elementów: modułu transmisji szeregowej (poprzez wbudowany konwerter USB-UART) do komunikacji z syntezerem DDS, modułu do odczytywania ustawień początkowych z pliku tekstowego oraz stosu Ethernet do obsługi połączenia z oscyloskopem DSA90804A.

Moduł obsługi portu szeregowego składa się z pojedynczej klasy, w której zaimplementowano plikowy dostęp do portu, wykorzystując biblioteki systemu MS Windows. Port szeregowy jest obsługiwany jak zwykły plik, z wyjątkiem funkcji konfiguracyjnych, które pozwalają określić wymagane parametry transmisji. Każde z poleceń przesyłanych do syntezeru jest zakończone dwoma znakami specjalnymi – „\r\n”, co odpowiada wciśnięciu klawisza Enter na klawiaturze. Zadaniem modułu obsługi portu szeregowego jest interpretacja przesłanego przez główną funkcję programu zestawu ustawień, wygenerowanie odpowiadającego mu zestawu komend oraz przesłanie go do syntezeru DDS.

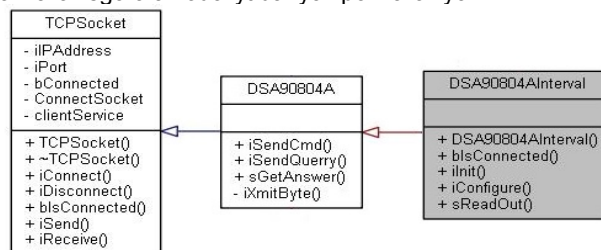
Kolejny moduł odpowiada za odczytywanie ustawień z pliku tekstowego. Po uruchomieniu programu, katalog roboczy jest przeglądany w poszukiwaniu pliku „config.txt”, w którym są zawarte ustawienia połączeń oraz scenariusz pomiarów. Każda opcja w pliku ma następującą składnię: „<nazwa opcji> : <wartość> ; <komentarz>”. Nazwa opcji jest zarezerwowana i jest potrzebna do prawidłowego przyporządkowania wartości do jej odpowiedniego miejsca w programie. W zależności od opcji, wartością może być liczba lub tekst. Opcje do ustawienia to:

- adres IP oscyloskopu DSA90804A,
- numer portu COM do komunikacji z syntezerem,
- zezwolenie na pomiary z użyciem sygnału sinusoidalnego z syntezeru DDS w tym:
 - wartość początkowa słowa przestrajania fazy,
 - wartość kroku zmiany słowa przestrajania fazy,
 - wartość końcowa słowa przestrajania fazy,
 - opóźnienie w [ms] potrzebne na pomiar danych statystycznych przez oscyloskop,
- zezwolenie na pomiary z użyciem sygnału kosinusoidalnego z syntezeru DDS w tym:
 - wartość początkowa słowa przestrajania fazy,
 - wartość kroku zmiany słowa przestrajania fazy,
 - wartość końcowa słowa przestrajania fazy,
 - opóźnienie w [ms] potrzebne na pomiar danych statystycznych przez oscyloskop,

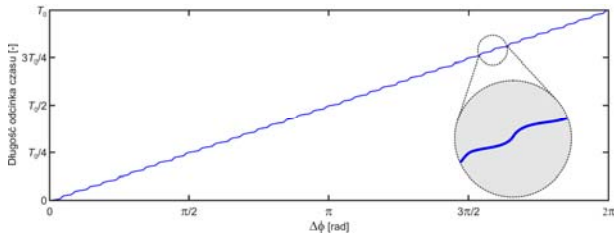
Słowo przestrajania stanowi 16-bitową daną wpisywaną do rejestru sterującego syntezeru DDS i określającą wartość przesunięcia fazy ($\Delta\phi$) sygnału zegarowego. Oprogramowanie umożliwia więc dokonanie pomiaru w dowolnym zakresie wartości przesunięcia fazy i z dowolnym krokiem przestrajania. Pokazane w dalszej części artykułu wyniki uzyskano przez zbadanie pełnego zakresu przestrajania fazy, tj. wartości początkowa 0, wartość końcowa $2^{16}-1=65\ 535$, krok 1.

Ustalono empirycznie, że opóźnienie o wartości 5500 ms jest wystarczające, by oscyloskop zebrał reprezentatywną próbę z generowanego sygnału. W przypadku przeprowadzania szczegółowej sesji pomiarowej, czyli przy pomiarach z użyciem sygnałów sinus i kosinus z syntezeru DDS, dla przestrajania słów sterujących od 0 do 65535 co jedną wartość (czyli 2×2^{16} przypadków), każde o czasie trwania 5,5 s, całkowity czas badania wynosi ~ 721000 s czyli nieco ponad 8 dni.

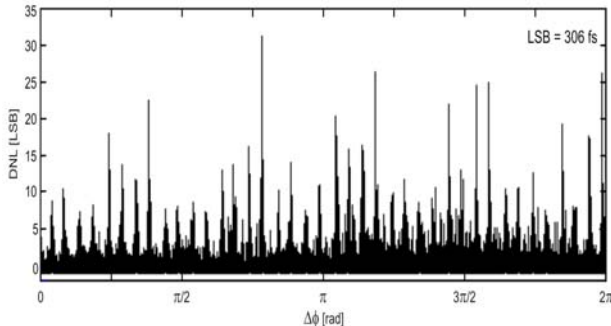
Ostatnim modułem jest stos Ethernet. Odpowiada on za komunikację między programem a oscyloskopem, który dokonuje pomiarów statystycznych badanego sygnału z selektora impulsów. Diagram klas implementujących poszczególne funkcjonalności stosu pokazano na rys. 4. Podstawową klasą jest *TCPSocket*, która odpowiada za zestawianie i rozłączanie połączenia oraz wymianę danych między programem a serwerem TCP uruchomionym na oscyloskopie. Oscyloskop na otwartym porcie 5024 nasłuchuje na tekstowe polecenia, zbliżone składnią do języka SCPI [8]. Kolejna klasa *DSA90804A* dziedziczy funkcjonalność po *TCPSocket* i odpowiada za prawidłowe formatowanie komend wysyłanych do oscyloskopu oraz odczyt nadsyłanych przez niego statusów. Zastosowanie do transmisji danych protokołu TCP powoduje, że dane otrzymuje się partiami. Dlatego zaimplementowano w klasie *DSA90804A* mechanizm buforowania danych oraz zgłaszania zakończenia odbioru do funkcji głównej, w przypadku, gdy otrzyma się znaki zakończenia linii. Nadzrędną klasą jest *DSA90804AInterval*, w której zaimplementowano abstrakcyjnie zdefiniowane polecenia wyzerowania oscyloskopu, ustawienia wybranego trybu pomiarowego oraz odczyt danych pomiarowych.



Rys. 4. Diagram zależności klas stosu Ethernet.



Rys.5. Charakterystyka przetwarzania generatora odcinków czasu w zakresie jednego okresu T_0



Rys.6. Charakterystyka nieliniowości różnicowej generatora odcinków czasu [1]

Wyniki pomiarów generowane przez oscyloskop są przesyłane tekstowo z użyciem protokołu TCP. Spośród odebranych danych, program wybiera wartość średnią oraz odchylenie standardowe odcinka czasu mierzonego przez oscyloskop. Odfiltrowane dane są następnie zapisywane do pliku tekstowego wraz z wartością bieżącej nastawy rejestru przestrajania syntezy DDS oraz (jeżeli operator dokona takiego wyboru przy starcie programu) bieżącej daty i/lub godziny wykonania pomiaru.

Zastosowanie mechanizmu dziedziczenia pozwoliło hermetyzować funkcjonalności każdej z klas, separując je od innych modułów programu. Sprzyja to łatwemu modyfikowaniu oraz rozszerzaniu programu w przyszłości o nowe funkcje [9].

Badania eksperymentalne

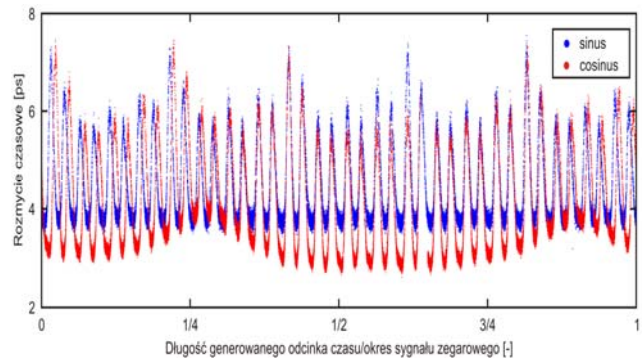
Na podstawie przeprowadzonych badań określona została charakterystyka przetwarzania generatora odcinków czasu w zakresie pojedynczego okresu sygnału zegarowego T_0 (rys. 5). W przypadku 177 z 65 536 kroków przestrajania fazy nie zaobserwowano zmiany średniej długości generowanego odcinka czasu. Zatem rzeczywista rozdzielczość generacji wyniosła 306 fs (20 ns/65 359).

Na charakterystyce przetwarzania można zaobserwować cykliczną zmianę szerokości kroków przestrajania. Ich dokładna analiza jest możliwa na podstawie charakterystyki nieliniowości różnicowej (DNL, ang. *differential nonlinearity* [10]), pokazanej na rys. 6. Wartości DNL oblicza się ze wzoru: $DNL_i = (q_i/q_{sr}) - 1$, gdzie q_i to szerokość i -tego kroku przestrajania, a q_{sr} to średnia rozdzielczość generacji odcinka czasu. Wartości nieliniowości różnicowej określa się w stosunku do wartości najmniej znaczącego bitu (LSB, ang. *least significant bit*), która w tym przypadku jest równa wyznaczonej rzeczywistej rozdzielczości generacji (306 fs).

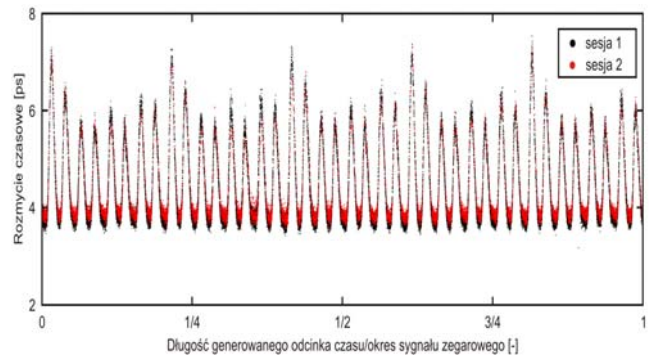
Syntezer DDS pozwala w pewnych zakresach przesuwac fazę z krokiem znacznie mniejszym niż oczekiwany (<306 fs). Niestety wiąże się to także z występowaniem kroków ponad 10-krotnie większych (nawet do około 10 ps).

Podczas przeprowadzonych badań oprócz średniej długości generowanego odcinka czasu zbierana była także

informacja o jego rozmyciu czasowym. Wyniki pokazano na rys. 7. Podobnie jak w przypadku charakterystyki przetwarzania, rozmycie czasowe podlega cyklicznym zmianom w zależności od wartości przesunięcia fazy, a więc długości wytwarzanego odcinka. Zweryfikowano wartości rozmycia czasowego dla odcinków czasu wytworzonych z użyciem zegarowego sygnału sinusoidalnego lub kosinusoidalnego uzyskanego z syntezy DDS. W obu przypadkach otrzymano zbliżone wyniki. Rozmycie czasowe wytwarzanych odcinków dla wybranych zakresów osiąga wartość poniżej 4 ps, a dla niektórych przypadków nie przekracza wartości 2,6 ps. Są to wartości niewiele większe od poziomu szumów własnych użytego oscyloskopu. Niestety w zakresach charakterystyki przetwarzania odpowiadających wydłużeniu kroków przestrajania obserwuje się gwałtowny wzrost rozmycia czasowego dochodzący do ponad 7 ps. Zakresy te częściowo pokrywają się dla sygnałów typu sinus i cosinus z syntezy DDS.



Rys.7. Rozmycie czasowe generowanych odcinków czasu w zależności od rodzaju sygnału wyjściowego z syntezy DDS



Rys.8. Wyniki dwóch sesji pomiarowych dla sygnału sinus

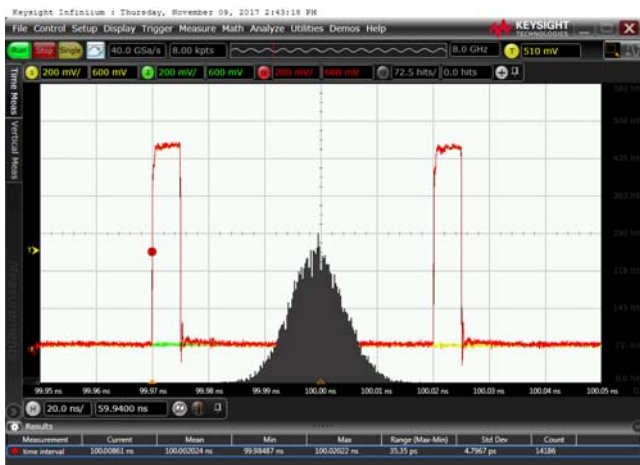
W celu praktycznej weryfikacji uzyskanych wyników, przeprowadzono kolejną sesję pomiarową, w której użyto drugiego modelu generatora. Na rys. 8 pokazano rozmycie czasowe wytwarzanych odcinków czasu dla sygnału zegarowego z syntezy DDS typu sinus zmierzone w czasie dwóch sesji pomiarowych. Analogicznie uzyskano także charakterystykę przetwarzania.

W obu seriach pomiarowych uzyskano bardzo zbliżone wyniki. Różnice w rozmyciu czasowym były w większości wypadków poniżej 0,5 ps. Pojedyncze, niewielkie wartości odstające (do 1,5 ps) mogły być związane ze zmianami warunków pomiarowych oscyloskopu, który znajdował się poza komorą termiczną. Biorąc pod uwagę długotrwały proces pomiarowy (1 sesja dla sygnału sinus trwa ok. 4 dni) można uznać te różnice za pomijalnie małe.

Z uwagi na wysoką powtarzalność uzyskanych wyników, otrzymaną charakterystykę przetwarzania można zapisać na stałe w pamięci urządzenia i użyć do wyboru nastaw generacji. Tym samym zwiększona zostaje precyzja wytwarzania odcinków czasu.

Głównym założeniem związanym z konstrukcją generatora było uzyskanie możliwie najmniejszego rozmycia czasowego wytwarzanych odcinków czasu. Dlatego, w ostatecznym rozwiązaniu [4], w oparciu o pokazane na rys. 7 wyniki ograniczono rozdzielczość generacji do 500 ps i wybrano takie nastawy dla których rozmycie czasowe wyniosło mniej niż 5 ps.

Na rys. 9 pokazano przykładowy histogram z wyników pomiaru wytworzonego przez generator odcinka czasu. Kształt histogramu odpowiada rozkładowi normalnemu i charakteryzuje się następującymi parametrami: wartość średnia 100,002 ns (nastawa generatora 100 ns), odchylenie standardowe (rozmycie czasowe odcinka czasu) 4,8 ps.



Rys.9. Histogram z wyników pomiaru długości odcinka czasu

Podsumowanie

Opracowane zautomatyzowano stanowisko pomiarowe umożliwiło dokładną identyfikację charakterystyki przetwarzania precyzyjnego generatora odcinków czasu oraz określenie rozmycia czasowego wytwarzanych odcinków czasu dla poszczególnych nastaw. Ponadto, potwierdzono dużą powtarzalność otrzymywanych wyników.

Stanowisko pozwoliło zaoszczędzić wiele dni żmudnych badań w przypadku pomiarów wykonywanych manualnie przy ciągłym zaangażowaniu eksperymentatora. Uzyskane wyniki mogą być użyte w urządzeniu w postaci mapy nastaw umożliwiających uzyskanie jak najwyższej rozdzielczości (306 fs) lub jak najmniejszego rozmycia czasowego wytwarzanych odcinków czasu (<5 ps).

Praca współfinansowana ze środków Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie w ramach projektu PBS 661.

Autorzy: mgr inż. Grzegorz Grzęda, E-mail: grzegorz.grzed@wat.edu.pl; dr inż. Paweł Kwiatkowski, E-mail: pawel.kwiatkowski@wat.edu.pl; dr hab. inż. Ryszard Szplet, E-mail: ryszard.szplet@wat.edu.pl; mgr inż. Krzysztof Różyc, E-mail: krzysztof.rozyc@wat.edu.pl; dr inż. Zbigniew Jachna, E-mail: zbigniew.jachna@wat.edu.pl; Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Telekomunikacji, Zakład Techniki Cyfrowej, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

LITERATURA

- [1] Kalisz J., Poniecki A., Różyc K., A simple, precise, and low jitter delay/gate generator, *Rev. Sci. Instrum.*, 74 (2003), n. 7, pp 3507-3509
- [2] Kwiatkowski, P., Jachna, Z., Różyc, K., Kalisz, J., Accurate and low jitter time-interval generators based on phase shifting method, *Rev. Sci. Instrum.*, 83 (2012), n. 3, 034701/1-4
- [3] Suchenek, M., Starecki, T., Programmable pulse generator based on programmable logic and direct digital synthesis, *Rev. Sci. Instrum.*, 83 (2012), n. 12, 124704/1-4
- [4] Kwiatkowski, P., Różyc, K., Sawicki M., Jachna, Z., Szplet R., 5 ps jitter programmable time interval/frequency generator, *Metrol. Meas. Syst.*, 24 (2017), n. 1, 57–68
- [5] 1 GSPS, 14-Bit, 3.3 V CMOS Direct Digital Synthesizer, Datasheet, *Analog Devices*, 10.2016: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9910.pdf>
- [6] Agilent Technologies Infiniium 90000 Series Oscilloscopes Data Sheet, Agilent Technologies, Inc. 2012
- [7] Stroustrup B., *The C++ Programming Language*, wyd. 4, Pearson Education, 2013
- [8] SCPI specification, 02.2016: <http://www.ivifoundation.org/scpi/default.aspx>
- [9] Gamma E., Helm R., Johnson R., Vlissides J.M., *Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*, wyd. 1, Addison-Wesley
- [10] Szplet R., Time-to-Digital Converters, chapter VII in *Design, Modeling and Testing of Data Converters*, edited by Carbone P., Kiaei S., F. Xu, Springer, 2014