

PROGRAMOWANY GENERATOR FUNKCYJNY

1. CEL ĆWICZENIA:

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z obsługą i możliwościami programowanego generatora funkcyjnego.

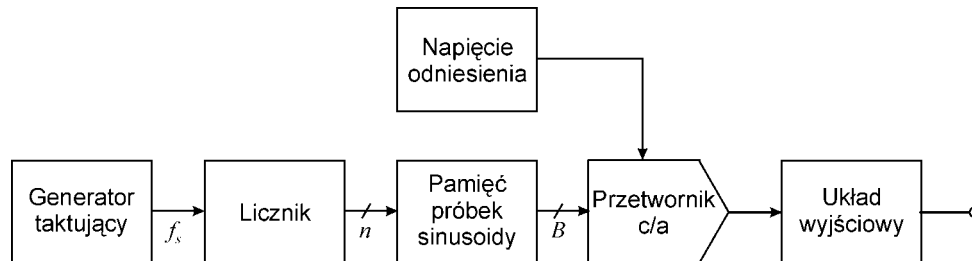
2. WPROWADZENIE

W wielu dziedzinach nauki i techniki występuje potrzeba wytwarzania sygnałów elektrycznych o określonych właściwościach. Do tego celu wykorzystywane są generatory elektrycznych sygnałów pomiarowych. Ich wielkością wyjściową jest z reguły napięcie o wartości międzyszczytowej nie przekraczającej kilkudziesięciu woltów. Zakres częstotliwości sygnałów elektrycznych, wytwarzanych przez generatory elektrycznych sygnałów pomiarowych zawiera się przedziale od 0 do kilkuset GHz. Generatory te można sklasyfikować w następujący sposób:

- 1) generatory sygnałowe, wytwarzające niemodulowany lub modulowany przebieg sinusoidalny. Częstotliwość generowanego przez nie sygnału zawiera się w przedziale od kilku kHz do kilkuset GHz. Są one wykorzystywane między innymi w laboratoriach radio- i telekomunikacyjnych.
- 2) generatory impulsowe, które wytwarzają przebiegi cyfrowe o nastawianej przez użytkownika częstotliwości, amplitudzie oraz współczynniku wypełnienia. W bardziej zaawansowanych przyrządach możliwa jest nastawa czasu narastania i opadania zboczy sygnału.
- 3) syntezy częstotliwości, których sinusoidalny lub cyfrowy sygnał wyjściowy charakteryzuje się dużą dokładnością i stabilnością częstotliwości, a ponadto dużą rozdzielczością jej nastawy.
- 4) generatory funkcyjne, które wytwarzają napięcie elektryczne o określonym kształcie, amplitudzie i częstotliwości. Niemal wszystkie generatory funkcyjne wytwarzają napięcie o trzech podstawowych kształtach: sinusoidalnym, trójkątnym (piłokształtnym) oraz prostokątnym [1].
- 5) generatory sinusoidalne o bardzo małych zniekształceniach.

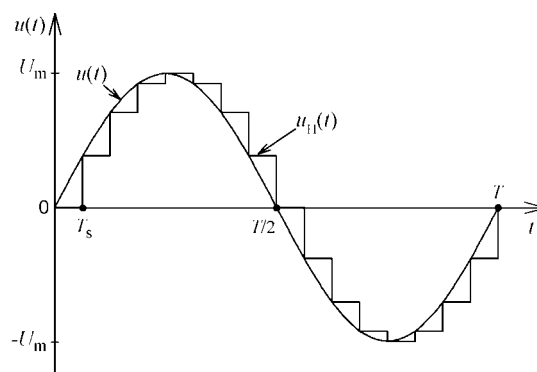
Najbardziej rozpowszechnionymi źródłami elektrycznych sygnałów pomiarowych są generatory funkcyjne. Mogą one być klasyfikowane na kilka sposobów. Na przykład, biorąc pod uwagę kryterium technologiczno-konstrukcyjne, można je podzielić na generatory analogowe oraz generatory z syntezą cyfrową. Do niedawna większość tańszych generatorów funkcyjnych była realizowana w technice analogowej. Aktualnie przyrządy te są nadal

produkowane z przeznaczeniem dla pracowni szkolnych oraz dla mniej wymagających użytkowników. Generatory analogowe charakteryzują się przeciętną stabilnością częstotliwości i amplitudy generowanego sygnału. Znacznie większą stabilnością tych parametrów charakteryzują się generatory z cyfrową syntezą przebiegu. Na rys. 1 przedstawiono uproszczony schemat blokowy cyfrowego źródła napięcia sinusoidalnego.



Rys.1. Uproszczony schemat blokowy generatora sinusoidy z cyfrową syntezą przebiegu

W układzie tym generator taktujący inkrementuje z częstotliwością f_s licznik binarny, którego n -bitowe wyjście jest połączone z szyną adresową pamięci, w której umieszczono słowa cyfrowe, reprezentujące próbki sinusoidy. Zapisane w pamięci próbki sinusoidy są przetwarzane na napięcie za pomocą m -bitowego przetwornika cyfrowo-analogowego, współpracującego ze źródłem stałego napięcia odniesienia oraz odpowiednim układem wyjściowym. Na wyjściu tego układu uzyskuje się charakterystyczną „schodkową” replikę sinusoidy $u_H(t)$, przedstawioną na rys.2. Im większa jest liczba schodków przypadających na okres T wytwarzanego sygnału, tym mniejsze są zniekształcenia generowanego przebiegu.



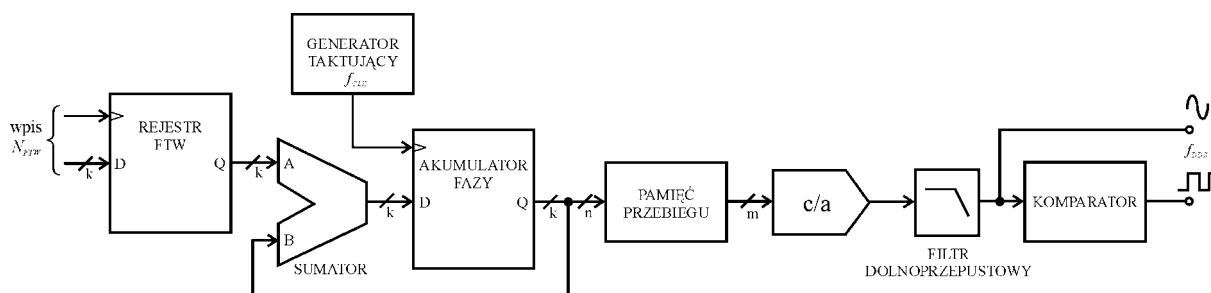
Rys.2. Schodkowy przebieg $u_H(t)$ uzyskiwany na wyjściu generatora sinusoidy z cyfrową syntezą przebiegu oraz aproksymowany przebieg sinusoidalny $u(t)$

Kształt sygnału wytwarzanego przez generator z cyfrową syntezą przebiegu jest zdeterminowany zawartością pamięci przebiegu. W pamięci przebiegu może być zapisanych kilka przebiegów o różnym kształcie, np. trójkątnym czy prostokątnym. Wybór kształtu przebiegu sprowadza się do wyboru obszaru pamięci.

Jeśli generator umożliwia wytworzenie sygnału o niemal dowolnym kształcie, zadeklarowanym przez użytkownika, to nazywany jest programowanym lub arbitralnym. Wytworzenie sygnału o „arbitralnym” kształcie jest proste w przypadku generatora z cyfrową

syntezą przebiegu, przedstawionego na rys.1. Wystarczy zmodyfikować zawartość pamięci przebiegu. Jest to realizowane ręcznie, za pomocą klawiatury przyrządu, lub przy wykorzystaniu komputera - przez odpowiedni interfejs.

Rozdzielczość nastawy częstotliwości generatorów z cyfrową syntezą przebiegu można zwiększyć przez wykorzystanie metody bezpośredniej cyfrowej syntezy częstotliwości (ang. *Direct Digital Synthesis*, DDS). Uproszczony schemat blokowy synteza częstotliwości wykorzystującego metodę DDS przedstawiono na rys. 3.



Rys.3. Podstawowy układ bezpośredniego cyfrowego synteza częstotliwości DDS

Układ ten składa się z następujących elementów:

- tzw. akumulatora fazy w postaci k -bitowego przerzutnika typu D;
- rejestru słowa nastawy częstotliwości (ang. *Frequency Tuning Word*, FTW) w postaci k -bitowego przerzutnika typu D;
- k -bitowego sumatora cyfrowego;
- generatora sygnału taktującego o częstotliwości f_{CLK} ;
- stałej pamięci przebiegu, zawierającej próbki przebiegu;
- m -bitowego przetwornika cyfrowo-analogowego;
- filtra dolnoprzepustowego.

Układ działa w sposób następujący: każdy impuls z generatora taktującego powoduje wpisanie do akumulatora fazy nowego słowa o wartości będącej sumą wartości poprzedniego słowa przechowywanego w akumulatorze oraz wartości słowa przechowywanego w rejestrze przechowującym wartość N_{FTW} . Liczba przechowywana w akumulatorze jest więc z każdym taktem inkrementowana o wartość N_{FTW} aż do przepełnienia akumulatora. Słowo przechowywane w akumulatorze reprezentuje fazę wytwarzanego przez generator DDS przebiegu. Kilkanaście najstarszych bitów akumulatora jest doprowadzonych do wejścia pamięci przebiegu, zawierającej wartości próbek sinusoidy. Cyfrowe wartości tych próbek podawane są na wejście przetwornika cyfrowo-analogowego, który przetwarza cyfrowe wartości próbek sinusoidy na napięcie o charakterystycznym schodkowym kształcie, przedstawionym na rys.2. Po odfiltrowaniu wyższych harmonicznym na wyjściu generatora

DDS uzyskuje się sygnał zbliżony do sinusoidy. Sygnał ten może być zamieniony na sygnał cyfrowy za pomocą odpowiedniego komparatora. Częstotliwość f_{DDS} tego sygnału jest równa

$$f_{\text{DDS}} = \frac{N_{\text{FTW}}}{2^k} f_{\text{CLK}} \quad (1)$$

Minimalna częstotliwość $f_{\text{DDS,min}}$, jaką może wytwarzać generator jest równa

$$f_{\text{DDS,min}} = \frac{1}{2^k} f_{\text{CLK}}, \quad (2)$$

natomiast częstotliwość maksymalna $f_{\text{DDS,max}}$ jest w przybliżeniu równa

$$f_{\text{DDS,max}} \approx \frac{f_{\text{CLK}}}{3}. \quad (3)$$

Na przykład dla $f_{\text{CLK}} = 400 \text{ MHz}$ oraz $k = 48$ uzyskuje się $f_{\text{DDS,min}} \approx 1,42 \text{ nHz}$, $f_{\text{DDS,max}} \approx 133 \text{ MHz}$. Maksymalną względną rozdzielczość nastawy częstotliwości uzyskuje się dla $f_{\text{DDS,max}}$. Dla 48-bitowego akumulatora ($k = 48$) sięga ona 14 dziesiętnych cyfr znaczących.

Przebiegi o kształtach innych niż sinusoidalne, w tym programowane przez użytkownika, są zapisywane w pamięci przebiegu, a na wyjściu przetwornika cyfrowo-analogowego znajduje się dolnoprzepustowy filtr Bessela 7. rzędu.

Częstotliwość f_{CLK} , z jaką taktowany jest układ DDS, determinuje jeden z najważniejszych parametrów charakteryzujących tego rodzaju generatory. Parametrem tym jest szybkość odtwarzania próbek przebiegu, wyrażona liczbą próbek odtwarzanych w jednostce czasu (ang. MegaSamples per Second, MSa/s lub GigaSamples per Second, GSa/s). Drugim ważnym parametrem jest rozdzielczość przetwornika cyfrowo-analogowego, wyrażona liczbą bitów m jego słowa wejściowego. Trzecim parametrem jest pojemność pamięci przebiegu, wyrażona w tzw. punktach (ang. *Samples*). Każdy punkt reprezentuje jedną próbkę przebiegu. Z reguły producent podaje na płycie czołowej maksymalną częstotliwość przebiegu sinusoidalnego, jaki może wytwarzać generator. Częstotliwości przebiegów o innych kształtach są zazwyczaj niższe.

Impedancja wyjściowa generatorów funkcyjnych jest zazwyczaj równa 50Ω . W celu uniknięcia zniekształceń przebiegów, spowodowanych niedopasowaniem impedancji, kabel łączący wyjście generatora z obciążeniem powinien mieć impedancję charakterystyczną równą 50Ω . Podobnie obciążenie powinno się charakteryzować impedancją równą 50Ω . Ten ostatni warunek w praktyce bywa rzadko spełniony. Z tego powodu producenci generatorów umożliwiają zadeklarowanie rzeczywistej impedancji obciążenia. Algorytm nastawy napięcia wyjściowego uwzględnia tę zadeklarowaną impedancję obciążenia, a wartość napięcia wyświetlana na wyświetlaczu generatora jest w przybliżeniu równa rzeczywistemu napięciu na obciążeniu.

UWAGA: zazwyczaj domyślna wartość impedancji obciążenia jest równa $50\ \Omega$. Wówczas na nieobciążonym wyjściu generatora występuje napięcie dwukrotnie wyższe od wyświetlanego (czyli nastawionego)!

Generatory funkcyjne są wyposażone w tzw. wyjście synchronizacji. Na wyjściu tym z reguły występuje sygnał cyfrowy TTL, który jest synchroniczny z sygnałem wytwarzanym na wyjściu głównym. Sygnał ten może służyć np. jako sygnał toru wyzwalań oscyloskopu. Umożliwia to w wielu przypadkach uzyskanie stabilnego obrazu na ekranie oscyloskopu np. w przypadku gdy główny sygnał wyjściowy generatora jest zmodulowany amplitudowo.

Generatory z bezpośrednią cyfrową syntezą częstotliwości pozwalają na łatwe modulowanie wytwarzanych sygnałów [2]. Modulacja częstotliwości (ang. Frequency Modulation, FM), fazy (ang. Phase Modulation, PM) oraz kluczkowanie częstotliwości (ang. Frequency Shift Keying, FSK) jest realizowana przez dynamiczne modyfikowanie zawartości rejestru FTW. W praktyce rejestr ten ma postać pamięci SRAM, której zawartość zależy od rodzaju modulacji. Modulacja amplitudy (ang. *Amplitude Modulation*, AM) jest realizowana za pomocą analogowego układu mnożącego, który mnoży napięcie wyjściowe uzyskiwane z generatora DDS przez napięcie modulujące, uzyskiwane za pomocą pomocniczego generatora modulującego.

Kolejną zaletą generatorów z DDS jest łatwość wobulacji (przemiatań, ang. SWEEP) ich częstotliwości. Wobulacja polega na modyfikacji częstotliwości sygnału przebiegiem czasowym opisanym funkcją liniową lub logarytmiczną. Użytkownik ma możliwość wyboru częstotliwości początkowej i końcowej oraz czasu, w trakcie którego częstotliwość zmienia się od wartości minimalnej do maksymalnej. Funkcja wobulacji jest przydatna szczególnie w przypadku badania charakterystyk częstotliwościowych obiektów, np. filtrów, wzmacniaczy itp.

Generatory pozwalają także na wytworzenie określonej przez użytkownika liczby (serii, ang. BURST) okresów sygnału. Użytkownik określa liczbę generowanych w serii okresów, okres, fazę, źródło sygnału wyzwalającego serię oraz opóźnienie serii względem sygnału wyzwalającego.

Generowanie przebiegów wobulowanych (SWEEP) oraz ich serii (BURST) może być inicjowane automatycznie lub określonym zdarzeniem, np. naciśnięciem określonego przycisku. Sposób inicjowania (wyzwalania) jest określony przez użytkownika.

Zdecydowana większość dostępnych na rynku generatorów funkcyjnych wyposażona jest w dwa wyjścia (tzw. kanały), oznaczane zazwyczaj jako CH1 i CH2. Dla obu z tych kanałów oprócz podstawowych parametrów (tj. częstotliwość, amplituda, składowa stała) deklaruje się również fazę początkową. Możliwe jest zatem generowanie dwóch przebiegów przesuniętych względem siebie o dowolny kąt fazowy.

Na rys.4 przedstawiono płytę czołową programowanego generatora funkcyjnego DDS firmy Rigol typu DG1022Z. Generator ten posiada cechy generatora funkcyjnego, programowanego oraz impulsowego.



Rys.4. Płyta czołowa programowanego generatora funkcyjnego Rigol DG1022Z

Generator ten może być wykorzystany w charakterze źródła napięcia stałego z przedziału od -10 do +10 V. Impedancja wyjściowa generatora w tym trybie pracy jest także równa 50 Ω . Maksymalna częstotliwość próbkowania tego generatora to 200 MSa/s a stabilność częstotliwości wynosi ± 1 ppm.

Cyfrowe generatory funkcyjne, podobnie jak większość obecnie produkowanych przyrządów pomiarowych, wyposażone są w odpowiednie interfejsy umożliwiające zastosowanie ich w zautomatyzowanych systemach pomiarowych. Zazwyczaj tanie generatory cyfrowe są wyposażone w interfejs USB. Na przykład wyżej wymieniony generator Rigol DG1022Z jest wyposażony w dwa porty USB (jeden typu Host i jeden typu Device). Umożliwiają one sterowanie przyrządem przez komputer, programowanie przebiegu użytkownika oraz zapis ustawień do pamięci zewnętrznej (pendrive). Najdroższe instrumenty są dodatkowo wyposażone w interfejsy GPIB i LAN.

Niektóre z generatorów funkcyjnych wyposażone są w terminal, w którym dostępny jest sygnał cyfrowy odpowiadający sygnałowi w pamięci przebiegów. Następnie użytkownik może użyć przyrządu do wygenerowania cyfrowej reprezentacji wygenerowanego kształtu fali. Jednym z wyższej klasy generatorów wyposażonych w taki terminal jest programowalny generator funkcyjny Tabor Electronics 2571A. Przyrząd jest wyposażony w 16-bitowy przetwornik cyfrowo-analogowy, który może generować przebiegi o maksymalnej częstotliwości próbkowania 250 MS/s.

3. PROGRAM ĆWICZENIA

Za pomocą kabla koncentrycznego z wtykami BNC na obu końcach połączyć wyjście CH1 generatora funkcyjnego z wejściem kanału pierwszego oscyloskopu, a wyjście CH2 generatora z wejściem kanału drugiego oscyloskopu. Po uzyskaniu zgody prowadzącego włączyć generator i oscyloskop.

1. Przebiegi podstawowe

Uwaga! Należy załączyć wyjście nr 1 w generatorze (przycisk „Output1”). Każdorazowo dla wszystkich poniższych punktów należy po wybraniu odpowiednich nastaw generatora użyć na oscyloskopie przycisku „Auto” w celu automatycznego doboru nastaw przyrządu. Ponadto należy ustawić oscyloskop w tryb sprzężenia DC (CH1→Coupling DC, CH2→Coupling DC). Przebiegi należy zapisywać w formacie .bmp na nośniku USB podłączonym do oscyloskopu.

- a) Wygenerować przebieg sinusoidalny (Sine) o wybranych przez siebie parametrach, (częstotliwość, amplituda, składowa stała, faza początkowa), różnych od ustawień domyślnych. Zmienić sposób wyświetlania amplitudy z wartości międzyszczytowej V_{pp} na wartość skuteczną V_{rms} (str. 2-5)
- b) Wygenerować przebieg prostokątny (Square) o wybranych przez siebie parametrach, (częstotliwość, amplituda, składowa stała, faza początkowa, współczynnik wypełnienia), różnych od ustawień domyślnych (str. 2-10 wyjaśnia definicję współczynnika wypełnienia)
- c) Wygenerować przebieg trójkątny (Ramp) o wybranych przez siebie parametrach, (częstotliwość, amplituda, składowa stała, faza początkowa, współczynnik symetrii), różnych od ustawień domyślnych (str. 2-11 wyjaśnia definicję współczynnika symetrii)
- d) Wygenerować przebieg impulsowy (Pulse) o wybranych przez siebie parametrach, (częstotliwość, amplituda, składowa stała, faza początkowa, szerokość impulsu, czas narastania, czas opadania), różnych od ustawień domyślnych (str. 2-13 wyjaśnia pojęcia czasu narastania i opadania)
- e) Wygenerować przebieg szumu (Noise) o wybranych przez siebie parametrach (amplituda, składowa stała), różnych od ustawień domyślnych

2. Przebiegi arbitralne

- a) Wygenerować dowolny przebieg arbitralny (Arb) wbudowany z grupy „Common” (opcja: Select Wform→BuiltIn). Czynność powtórzyć dla trzech innych przebiegów, jednego z grupy „Engine”, jednego z grupy „Signal” i jednego z grupy „AutoElec” (str. 2-20 do 2-24)

- b) Wygenerować przebieg stałoprądowy (DC) o dowolnej wartości wykorzystując opcję Select Wform→DC (str. 2-19).

Uwaga: ustawienie wartości przebiegu następuje poprzez zmianę parametru „Offset” po wciśnięciu klawisza powrotu do wcześniejszego okna.

- c) Zaprogramować w pamięci ulotnej (Volatile) własny przebieg arbitralny wykorzystując do tego 8 punktów (str. 2-26 i 2-27)

3. Nastawa impedancji obciążenia

Wygenerować przebieg sinusoidalny o dowolnej częstotliwości i amplitudzie. Zmienić impedancję obciążenia (Utility→Channel Set→Output Set) z HighZ na 50 Ω . Wciskając przycisk „Sine” zaobserwować, co uległo zmianie na ekranie. Powtórzyć czynność dla innej wartości impedancji obciążenia, np. 1 k Ω .

4. Praca dwukanałowa

Wygenerować dwa przebiegi o tym samym kształcie i tej samej częstotliwości przesunięte o dowolny kąt fazowy. Zwrócić uwagę, że po ustawieniu faz początkowych na obu kanałach przebiegi zazwyczaj nie są przesunięte o właściwy kąt. Użyć przycisku „Align Phase” w celu uzyskaniażądanego przesunięcia fazowego (str. 2-9).

5. Inne funkcje generatora

- a) Zapoznać się ze sposobem dodawania wyższych harmoniczných do przebiegu. Dodać trzecią harmoniczną do dowolnego przebiegu sinusoidalnego (str. 2-33 i 2-34).
- b) Zapoznać się ze sposobami wobulacji oferowanymi przez przyrząd (opcja „Sweep”). Zwrócić uwagę na parametry, które mogą być modyfikowane przez użytkownika (str. 2-57).
- c) Zapoznać się ze sposobami generowania serii impulsów oferowanymi przez przyrząd (opcja „Burst”). Zwrócić uwagę na parametry, które mogą być modyfikowane przez użytkownika (str. 2-65).

UWAGA! Instrukcja obsługi generatora (pozycja [3] wykazu literatury) dostępna jest na stronie internetowej Katedry (<https://www.polsl.pl/re2/materialy/>). Zaleca się, aby studenci przed przystąpieniem do ćwiczenia zapoznali się z fragmentami instrukcji obsługi wskazanymi w programie ćwiczenia.

4. PRZYGOTOWANIE SPRAWOZDANIA

1. Przedstawić cel ćwiczenia.
2. Zamieścić schemat pomiarowy ze wskazaniem typów użytych przyrządów.
3. Zamieścić najistotniejsze parametry badanego generatora tj. maksymalna częstotliwość sygnału, maksymalna częstotliwość próbkowania, zakresy generowanych napięć AC i DC, dokładność nastawy napięcia, impedancja wyjściowa, interfejsy, liczba wbudowanych przebiegów arbitralnych.
4. Zamieścić i skomentować kolejne zarejestrowane przebiegi zgodnie z podziałem podanym w programie ćwiczenia. Omówić każdy z przebiegów odnosząc się do testowanej funkcji generatora.

5. PYTANIA KONTROLNE

1. Wymienić rodzaje generatorów elektrycznych sygnałów pomiarowych i podać ich zastosowanie.
2. Podać ważniejsze różnice między generatorami funkcyjnymi analogowymi i generatorami z cyfrową syntezą przebiegu.
3. Narysować i omówić schemat blokowy generatora funkcyjnego DDS.
4. Podać i omówić najważniejsze parametry generatorów cyfrowych.
5. Co to jest wyjście synchronizacji w generatorze i jakie ma zastosowanie?
6. Nastawa impedancji obciążenia generatora – dlaczego jest istotna?
7. Wymienić i krótko opisać sposoby modulowania sygnału sinusoidalnego, spotykane w generatorach funkcyjnych.

6. LITERATURA

- [1] Tietze U., Schenk Ch., „Układy półprzewodnikowe”, WNT, Warszawa 1996
- [2] Knoch L., Ekiert T., „Modulacja i detekcja”, WKiŁ, Warszawa 1977
- [3] Rigol, „DG1000Z Series Function/Arbitrary Waveform Generator”, Rigol Technologies Inc. Oct 2016.

v.3 /2024

Opracowali: prof. dr hab. M.Kampik, dr hab. inż. K. Musioł, dr inż. K. Kubiczek