

## WPLYW PRÓBKOWANIA NA PARAMETRY GENERATORA WIELOFAZOWEGO O NIENASTAWNYM KĄCIE FAZOWYM SYGNAŁU SYNCHRONIZUJĄCEGO

mgr inż. Bartosz Jakubski

Instytut Informatyki i Elektroniki, Uniwersytet Zielonogórski  
65-246 Zielona Góra, ul. Podgórna 50

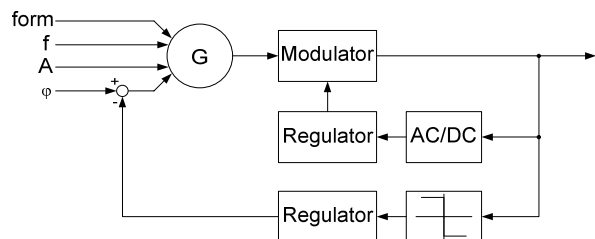
e-mail: b.jakubski@iie.uz.zgora.pl

### STRESZCZENIE

Integralną częścią kalibratorów mocy są generatory wielofazowe, które w zależności od przyjętego rozwiązania mogą mieć strukturę analogową lub cyfrową. Dokonano krótkiego porównania właściwości obu typów generatorów. Sprecyzowano wymagania na częstotliwość, kształt, rozdzielczość nastawy kąta fazowego i zniekształcenia sygnałów wyjściowych kalibratora, a zatem i generatora. Opisano model opracowanego wielofazowego cyfrowego generatora i przedstawiono wyniki jego badań, które następnie zostały omówione.

### 1. WPROWADZENIE

Na rys.1 przedstawiono schemat blokowy jednego toru napięciowego kalibratora mocy. Składa się on z generatora G, modulatora, przetwornika AC/DC, regulatora amplitudy, detektora przejścia przez zero i regulatora fazy. Wszystkie wymienione człony mogą zostać zrealizowane techniką analogową lub w połączeniu technik cyfrowych i analogowych. Każda z zastosowanych metod realizacji ma swoje zalety jak i wady. Obecnie produkowane kalibratory umożliwiają nastawę częstotliwości podstawowej w zakresie od 40Hz do 100Hz z rozdzielczością 0,01Hz. Kształt sygnału może być programowany za pomocą harmoniczných. Rozdzielczość nastaw kąta fazowego wynosi 0,1°, a zniekształcenia całkowite sygnałów wyjściowych są nie większe jak 0,5%. W artykule została podjęta dyskusja na temat generatora do zastosowań w kalibratorach mocy.



Rys. 1. Schemat blokowy toru napięciowego kalibratora mocy

## 2. GENERATORY ANALOGOWE

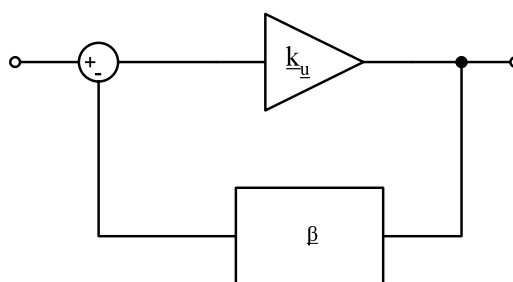
Generatorem nazywamy układ elektroniczny przeznaczony do generacji zmiennego przebiegu elektrycznego. Generatory drgań sinusoidalnych powinny generować przebieg harmoniczny o możliwie małych zniekształceniach oraz stałej częstotliwości i amplitudzie. Widmo takiego przebiegu powinno składać się z jednego prążka o stałym położeniu i stałej wysokości. Właściwości każdego generatora można opisać za pomocą następujących parametrów:

- Częstotliwość generowana;
- Amplituda przebiegu;
- Stałość częstotliwości;
- Stałość amplitudy;
- Zawartość harmoniczných;
- Fluktuacje częstotliwości i amplitudy.

Generatory drgań sinusoidalnych możemy podzielić ze względu na zastosowany w nich układ określający częstotliwość:

- Obwód rezonansowy – generatory LC;
- Obwód rezystancyjno-pojemnościowy przesuwnika fazowego – generatory RC;
- Kryształ piezoelektryczny – generatory kwarcowe.

Drgania sinusoidalne można uzyskać dwoma sposobami. Pierwszy polega na połączeniu elementu o rezystancji ujemnej z obwodem rezonansowym LC. Generator o takiej strukturze nazywany jest dwójnikowym i jest wykorzystywany głównie w zakresie wielkich częstotliwości. Innym rodzajem generatorów są generatory czwórnikowe, nazywane również sprzężeniowymi. Drgania uzyskuje się w nich dzięki objęciu wzmacniacza pętlą sprzężenia dodatniego, która musi spełniać odpowiednie warunki. Schemat blokowy takiego generatora przedstawiony jest na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy generatora sprzężeniowego

Wzmocnienie układu z rys. 2 wyraża się wzorem:

$$\underline{k} = \frac{k_u}{1 - k_u \beta} \quad (1)$$

Dąży ono do nieskończoności, gdy mianownik dąży do zera:

$$1 - \underline{k}_u \beta = 0 \quad (2)$$

czyli:

$$\underline{k}_u \beta = 1 \quad (3)$$

Jeżeli wyrażenie (3) przedstawimy w postaci wykładniczej otrzymamy:

$$\underline{k}_u e^{j\varphi_k} * \beta e^{j\varphi_\beta} = \underline{k}_u \beta e^{j(\varphi_k + \varphi_\beta)} = 1 \quad (4)$$

gdzie:

- $\varphi_k$  – kąt przesunięcia fazowego wzmacniacza o wzmocnieniu  $\underline{k}_u$ ;
- $\varphi_\beta$  – kąt przesunięcia fazowego członu sprzężenia zwrotnego  $\beta$ .

Aby część urojona wyrażenia (4) była równa zero, suma kątów fazowych  $\varphi_k$  i  $\varphi_\beta$  powinna być równa zero lub być całkowitą wielokrotnością  $2\pi$ :

$$\text{Im}(\underline{k}_u \beta) = 0, \text{ gdy } \varphi_k + \varphi_\beta = n * 2\pi, n=0,1,2,3\dots \quad (5)$$

Wówczas mamy:

$$\text{Re}(\underline{k}_u \beta) = \underline{k}_u \beta = 1 \quad (6)$$

Wyrażenie (5) nazywane jest *warunkiem fazowym generacji drgań*, natomiast wyrażenie (6) – *amplitudowym warunkiem generacji drgań*.

W rzeczywistych układach generatorów warunek (6) jest zastępowany silniejszym warunkiem (7), który zapewnia wzbudzenie w układzie drgań.

$$\text{Re}(\underline{k}_u \beta) = \underline{k}_u \beta \geq 1 \quad (7)$$

Jak wcześniej wspomniano istnieje podział generatorów ze względu na zastosowany układ określający częstotliwość. Generatory z obwodem rezonansowym LC charakteryzują się dużą stałością częstotliwości generowanego przebiegu ( $\Delta f/f = 10^{-3} \div 10^{-5}$ ). Z reguły są one stosowane w zakresie wielkich częstotliwości. Typowy zakres przestrajania generatora LC obejmuje częstotliwości różniące się od nominalnej o około 25% dzięki zastosowaniu w obwodach rezonansowych elementów, których pojemność zależy od przyłożonego do nich napięcia, są to tzw. waraktory lub diody pojemnościowe. Istnieje wiele rozwiązań układowych generatorów z obwodem rezonansowym. Przykładem mogą być generatory Colpits'a, Hartley'a lub Meissner'a. Różnica pomiędzy nimi polega na sposobie podziału napięcia lub realizacji pętli sprzężenia zwrotnego.

Generatory RC charakteryzują się małym poziomem zniekształceń generowanego przebiegu. W przypadku generatora z mostkiem Wiena możliwe jest uzyskanie przebiegu sinusoidalnego o zniekształceniach na poziomie 0,001%. Stałość częstotliwości generowanego przebiegu  $\Delta f/f$

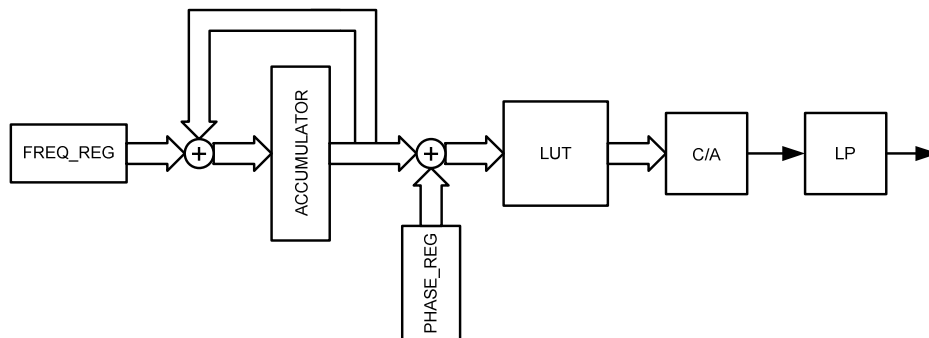
mieści się w granicach  $10^{-3} \div 10^{-4}$  i jest najmniejsza w porównaniu do pozostałych dwóch rodzajów generatorów typu LC i kwarcowych. Generatory RC są stosowane w zakresie częstotliwości od ułamków Hz do pojedynczych MHz. Dla wyższych częstotliwości ujawnia się niekorzystny wpływ pojemności pasożytniczej rezystorów.

W przypadku, gdy wymagana jest bardzo duża stałość częstotliwości generowanego przebiegu (rzędu  $10^{-6} \div 10^{-7}$ ) stosuje się generatory kwarcowe. W generatorze takim używa się rezonatory kwarcowe, które są odpowiednio wyciętymi i wyszlifowanymi kawałkami kwarcu z napyłonymi elektrodami. Duża dobroć takiego rezonatora i stałość jego parametrów sprawiają, że jest to bardzo dobry element określający z dużą dokładnością częstotliwość drgań w układach generacyjnych. Produkowane są rezonatory o podstawowej częstotliwości rezonansowej od 10kHz do dziesiątek MHz. Jeśli istnieje potrzeba zmiany częstotliwości sygnału w niewielkim zakresie, można zastosować diodę waraktorową. Otrzymuje się w ten sposób generator kwarcowy przestrajany napięciem, tzw. VCXO (ang. voltage-controlled crystal oscillator).

Dużą zaletą generatorów analogowych jest niski poziom zniekształceń sygnału wyjściowego. Kłopotliwa jest natomiast zmiana częstotliwości podstawowej generowanego przebiegu, która wymaga zmiany wartości elementów ustalających częstotliwość. Nowoczesne generatory umożliwiają również zaprogramowanie kształtu przebiegu wyjściowego. Bardzo trudno jest zaprojektować układ generatora analogowego, który formowałby przebiegi o zadanych wcześniej parametrach. Znacznie łatwiej jest zrealizować to zadanie za pomocą generatorów cyfrowych.

### 3. GENERATORY CYFROWE

Najpopularniejszą techniką cyfrowej generacji przebiegów jest bezpośrednia synteza cyfrowa DDS (ang. Direct Digital Synthesis). Przy obecnie dostępnych środkach jest ona dość łatwa do implementacji, jak i są oferowane gotowe układy generatorów w postaci scalonej. Schemat blokowy układu DDS przedstawiony jest na rys.3. Składa się on z rejestru zawierającego słowo przestrajające, akumulatora fazy, tablicy LUT (Look-up table) zawierającej wartości próbek przebiegu, przetwornika C/A i filtru dolnoprzepustowego. Do zmian kąta fazowego sygnału wyjściowego służy sumator, który sumuje aktualną wartość z akumulatora ze słowem z rejestru fazy. W ten sposób następuje przesunięcie przebiegu wyjściowego dokładnie o tyle próbek, ile jest zapisanych w rejestrze fazy. Zaletą tej metody jest możliwość nastawy częstotliwości z bardzo małym krokiem i generacja przebiegów o różnych kształtach, które są zapisane w pamięci – tablicy LUT.



Rys. 3. Schemat blokowy układu DDS

Rozdzielczość nastaw częstotliwości zależy od długości akumulatora i wyraża się wzorem:

$$\Delta f = \frac{f_{clk}}{2^n} \quad (8)$$

gdzie  $f_{clk}$  jest częstotliwością sygnału zegarowego doprowadzonego do układu, a  $n$  szerokością słowa akumulatora. Częstotliwość wyjściowa sygnału jest iloczynem słowa przestrajającego zapisanego w rejestrze FREQ\_REG i  $\Delta f$ :

$$f_{out} = FREQ\_REG * \Delta f \quad (9)$$

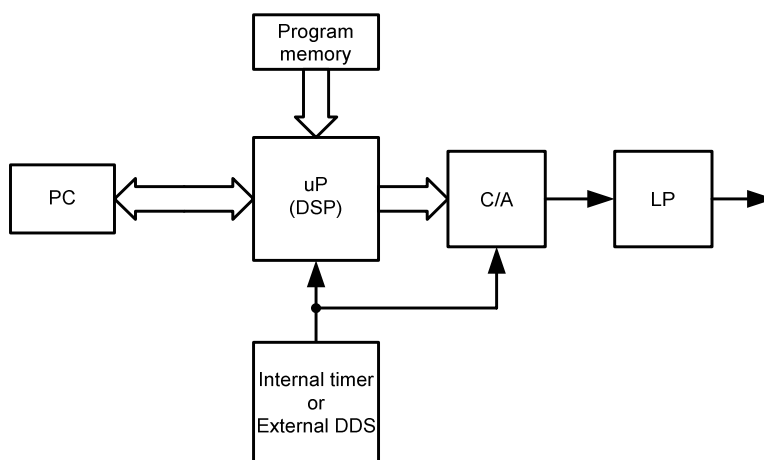
Rozdzielczość nastaw kąta fazowego zależy od ilości próbek zapisanych w tablicy LUT. Minimalny skok kąta fazowego wyraża się wzorem:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{N} \quad (10)$$

gdzie  $N$  jest liczbą próbek zapisanych w tablicy. Kąt fazowy przebiegu wyjściowego jest iloczynem  $\Delta \varphi$  i wartości z rejestru PHASE\_REG:

$$\varphi = PHASE\_REG * \Delta \varphi \quad (11)$$

Jak już wspomniano metoda DDS gwarantuje dużą rozdzielczość nastaw częstotliwości. Jednak z zasady jej funkcjonowania, dla każdej z nastaw przypada inna ilość próbek na okres przebiegu wyjściowego. Pociąga to za sobą różną wartość współczynnika THD (ang. Total Harmonic Distortion) dla przebiegów o różnych częstotliwościach. Aby zapewnić nastawy kąta fazowego na poziomie  $0,01^\circ$  koniecznych jest min. 36 000 próbek na okres, które należy zapisać w tablicy LUT. Wzrost rozdzielczości wymusza dalszą rozbudowę układu adresującego tablicę, jak i jej rozmiar. Inne rozwiązanie generatora cyfrowego przedstawione jest na rys. 4.

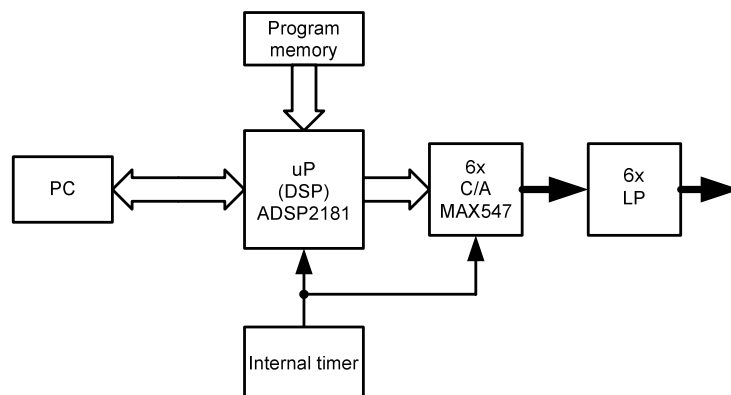


Rys. 4. Schemat blokowy generatora cyfrowego z zastosowaniem mikroprocesora

Zastosowany mikroprocesor jest najczęściej wyspecjalizowanym układem DSP. Nowoczesne procesory sygnałowe mają zaimplementowaną szybką pamięć RAM, której pojemność jest wystarczająca aby zapisać w niej wartości próbek sygnału wyjściowego. Program wykonywany przez procesor DSP, przepisuje wartości zapisane w jego pamięci do przetwornika C/A w takt sygnału próbkującego. Sygnał ten może pochodzić z wewnętrznego układu czasowego procesora lub zewnętrznego układu DDS generującego sygnał prostokątny o programowalnej częstotliwości. Zmieniając częstotliwość sygnału próbkującego można zachować stałą liczbę próbek na okres generowanego sygnału, a co za tym idzie, również współczynnik zniekształceń THD. Zastosowanie układu DDS do generowania sygnału próbkującego pozwala znacząco poprawić rozdzielczość nastaw częstotliwości, w porównaniu z układem czasowym zintegrowanym w procesorze. W tym rozwiązaniu rozdzielczość nastaw kąta fazowego jest również ściśle powiązana z ilością próbek przypadającą na okres generowanego przebiegu i jest określona zależnością (10). Dodatkowo duża rozdzielczość kąta fazowego stawia wymagania na procesor sygnałowy, który musi mieć na tyle krótki cykl aby zdążyć przepisać wartości próbek do układu C/A w czasie jednego okresu sygnału próbkującego.

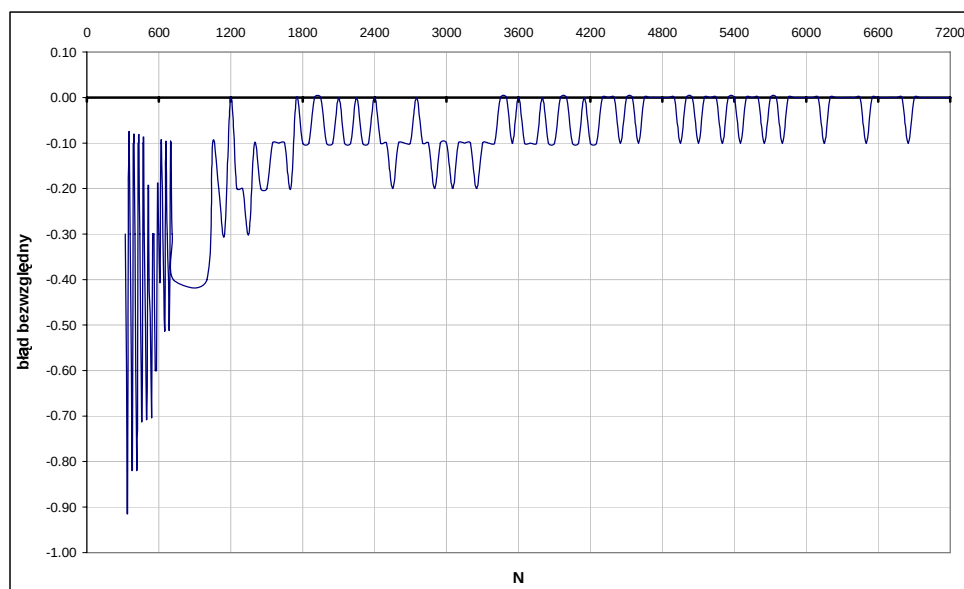
#### 4. GENERATOR WIELOKANAŁOWY

W pracy [4] został zaprezentowany model wielokanałowego generatora cyfrowego. Na rys. 5 pokazano schemat blokowy urządzenia. Posiada on sześć wyjść, dla których jest wspólna tylko częstotliwość podstawowa. Pozostałe parametry przebiegów są od siebie niezależne. Generator obsługiwany jest za pomocą aplikacji uruchamianej na komputerze osobistym. Parametry przebiegów i ilość aktywnych wyjść przesyłane są poprzez interfejs RS-232.



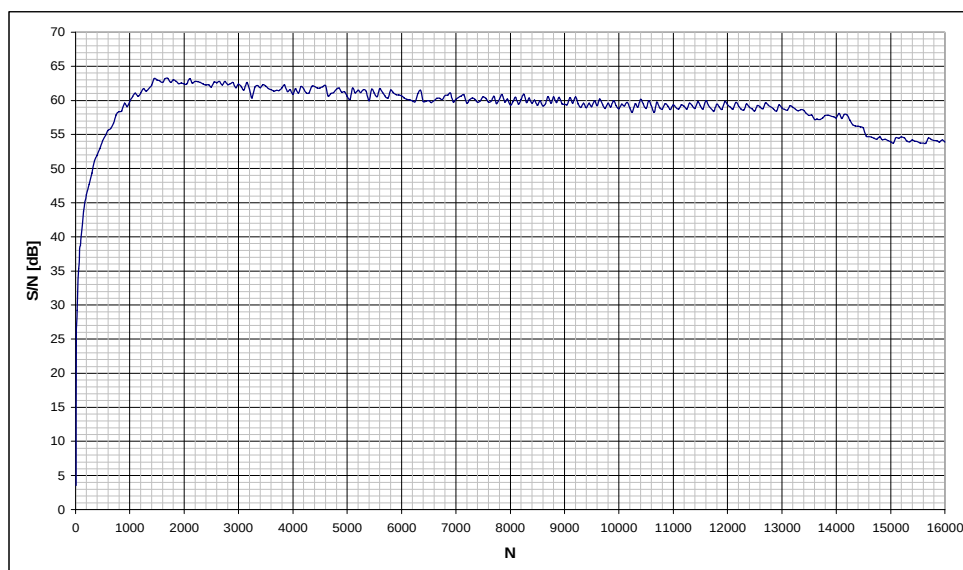
Rys. 5. Schemat blokowy zrealizowanego modelu cyfrowego generatora sygnałów sinusoidalnych

Jak było to już wcześniej wspomniane aby uzyskać dużą rozdzielczość kąta fazowego, wymagana jest duża liczba próbek generowanego przebiegu. Zależność pomiędzy rozdzielczością a liczbą próbek określa wzór (10). Wykonano pomiary przesunięcia fazowego w zależności od liczby próbek na okres pomiędzy dwoma sygnałami wyjściowymi w generatorze, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 5. Badania były wykonane dla zadanego kąta przesunięcia fazowego  $45,3^\circ$ . Wykres 1 przedstawia zależność błędu bezwzględnego kąta przesunięcia fazowego od liczby próbek. Jak widać z wykresu, błąd utrzymuje się w granicach  $\pm 0,1^\circ$  dla liczby próbek większej niż 3600. Jest to zgodne z zależnością (10), gdyż dla 3600 próbek na okres można uzyskać rozdzielczość kąta fazowego na poziomie  $0,1^\circ$ .



Wyk. 1. Błąd bezwzględny nastawy kąta fazowego w zależności od liczby próbek na okres

Zwiększanie liczby próbek na okres jest równoznaczne ze zwiększaniem częstotliwości próbkowania sygnału wyjściowego, co pociąga za sobą wzrost zawartości niepożądanych harmonicznych w sygnale wyjściowym i spadek stosunku sygnału do szumu. Na wykresie 2 pokazany jest zmierzony stosunek S/N w zależności od liczby próbek na okres na wyjściu omawianego generatora.



Wyk. 2. Zależność stosunku S/N od liczby próbek na okres przebiegu na wyjściu generatora

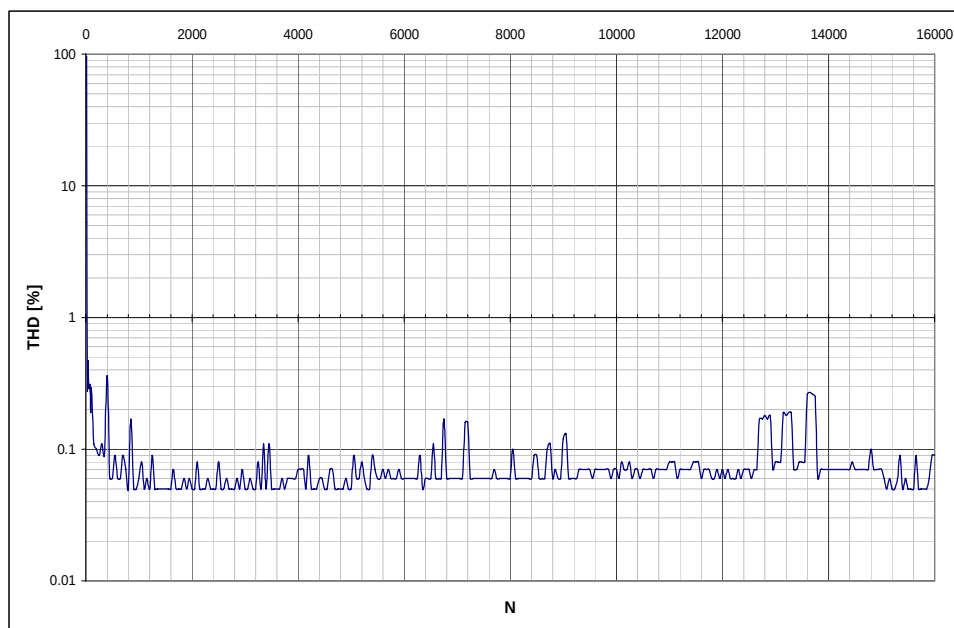
Zmiana częstotliwości próbkowania sygnału wyjściowego wpływa również na jego całkowite zniekształcenia, których poziom definiowany jest współczynnikiem THD (Total Harmonic Distortion). Wartość współczynnika THD można wyrazić w procentach:

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_k^2}}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_k^2}} * 100\% \quad (12)$$

lub w decybelach:

$$THD = 20 \log \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_k^2}}{\sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_k^2}} \quad (13)$$





Wyk. 3. Zależność zniekształceń THD od liczby próbek na okres przebiegu wyjściowego

## 5. ZAKOŃCZENIE

W artykule przedstawiono krótką charakterystykę generatorów analogowych i cyfrowych. Rozwiązania analogowe charakteryzują się niskim poziomem zniekształceń generowanego sygnału, jednak realizacja funkcji umożliwiającej programowanie kształtu przebiegu wyjściowego jest bardzo trudna do realizacji. Układy takie wymagają również procesu uruchomienia, np. dobrania odpowiedniego wzmocnienia aby układ mógł się wzбудzić. Generatory cyfrowe pozwalają zrealizować wiele zaawansowanych funkcji, takich jak programowanie kształtu przebiegu, kąta fazowego, częstotliwości i amplitudy, w prostszy sposób. Na niekorzyść generatorów cyfrowych wpływa niedoskonałość procesu przetwarzania cyfrowo-analogowego. Przebieg schodkowy uzyskany z wyjścia przetwornika C/A można wygładzić za pomocą filtra dolnoprzepustowego, jednak bardzo trudne jest do wyeliminowania zjawisko powstawania impulsów szpicowych w przebiegu wyjściowym (ang. glitch). Z zaprezentowanych badań wynika, że do uzyskania dużej rozdzielczości kąta fazowego przebiegów wyjściowych generatora, konieczny jest system przetwarzania cyfrowo-analogowego, który jest w stanie próbkować sygnał wyjściowy z bardzo dużą częstotliwością. Generatory stosowane w kalibratorach mocy są z reguły sześciokanałowe, dlatego nakłada to na taki system bardzo duże wymagania co do szybkości pracy. Należy wówczas stosować układy scalone, które pracują przy częstotliwościach rzędu kilkudziesięciu MHz. Z wykresu 2 wynika, że zwiększenie częstotliwości próbkowania pogarsza znacznie stosunek sygnału do szumu. Również całkowite zniekształcenia THD sygnału zależą od ilości

próbek na okres. Z przeprowadzonych badań widać, że współczynnik THD zmienia swoją wartość nawet kilkukrotnie przy różnych częstotliwościach próbkowania. Z tych względów trudno jest przewidzieć jakie parametry będzie mieć projektowany generator. Uniezależnienie rozdzielczości kąta fazowego od liczby próbek na okres sygnału wyjściowego, pozwoliłoby na zbudowanie generatora o lepszych właściwościach oraz zmniejszyłoby wymagania na szybkość pracy elementów zastosowanych do budowy urządzenia.

#### LITERATURA

- [1] P. Horowitz, W. Hill: *Sztuka elektroniki I*, WKŁ, Warszawa 1999
- [2] R. van de Plassche: *Scalone przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe*, WKŁ, Warszawa 1997,2001
- [3] P. Wesołowski: *Programmable polyphase AC generator system*, Politechnika Zielonogórska, Warszawa 1996
- [4] B Jakubski, J Wiszniewski: *Model cyfrowego generatora sygnałów sinusoidalnych*, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra 2003
- [5] A. Kluger: *Dwusygnałowy, programowalny generator funkcyjny*, XXXI-sza Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, materiały konferencyjne str. 291, Białystok 1999
- [6] P. Michalak: *Cyfrowa bezpośrednia synteza częstotliwości*, Radioelektronik 1993, nr 1,2