

Sławomir MICHALAKPOLITECHNIKA POZNAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI,
ul. Polanka 3, 60-965 Poznań**Badanie właściwości oscylatora pierścieniowego w temperaturze 77 K**

Dr inż. Sławomir MICHALAK

Pracuje jako adiunkt w Katedrze Systemów Telekomunikacyjnych i Optoelektroniki na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej. W pracy naukowo-dydaktycznej zajmuje się zagadnieniami komputerowego wspomaganie projektowania, symulacji układów elektronicznych, programowaniem układów mikroprocesorowych i układów programowalnych. Zajmuje się tematyką pozyskiwania informacji z inteligentnych czujników pomiarowych.



e-mail: michalak@et.put.poznan.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki eksperymentów, w których testowano działanie oscylatora pierścieniowego zaimplementowanego w układach reprogramowalnych. Analizowano właściwości opóźniające inwerterów zaprogramowanych w strukturze CPLD układów XC2C32 (Xilinx). W temperaturze otoczenia (300 K) i w temperaturze ciekłego azotu (77 K), badano zdolność do generacji drgań, stałość częstotliwości oscylatora (na podstawie pomiarów średniookresowych), wpływ zmian napięcia zasilania na częstotliwość oscylacji.

Słowa kluczowe: oscylator pierścieniowy, CPLD, ciekły azot, czas propagacji.

Examination of a ring oscillator at 77 K**Abstract**

In this paper the results of experiments with a ring oscillator implemented in programmable devices (XC2C32 Xilinx) are presented. The examined devices were immersed in a Dewar flask (Fig. 1) with liquid nitrogen. It was found out that the ring oscillator (composed of 11 gates) (Fig. 2) still worked properly in such low temperature. According to the theory of silicon semiconductors, the activity of carriers increases in low temperatures, so there was expected decrease in the propagation delay for every gate and increase in the oscillation frequency. The output frequency was measured and the average propagation time for inverters was calculated. The results at 77 K (temperature of liquid nitrogen) were compared with those at 300 K (room temperature) (Tab. 1). The output frequency characteristics versus the supply voltage for the examined devices were measured and drawn (Figs. 3 and 4). The quadric polynomial functions which fit these non-linear characteristics were proposed. The relative change of the oscillation frequency versus the supply voltage is shown in Fig. 5. The frequency sensitivity depends both on supply voltage and temperature. The relative sensitivity (normalized) in relation to the voltage at 300 K and 77 K is presented in Fig. 6. Based on the results from 24-hour measurements (86400 samples were collected) the frequency stability was determined. The average value and standard deviation value were calculated (Tab. 2) but first and foremost there was calculated and plotted the Allan deviation (Fig. 7).

Keywords: ring oscillator, CPLD, liquid nitrogen, propagation delay.

1. Czas propagacji bramek w niskich temperaturach

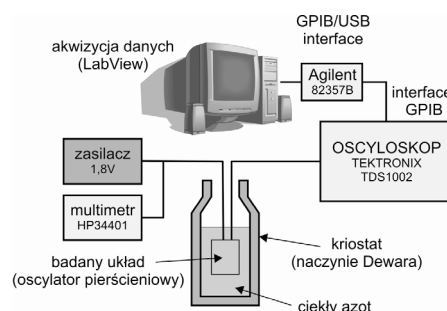
Wraz z obniżaniem temperatury układy CMOS (również układy reprogramowalne) wykazują tendencję do zwiększania szybkości działania. Cechę tę można zaobserwować już dla typowego, użytkowego zakresu pracy układów (0..70°C dla wersji *commercial*, -40..85°C dla wersji *industrial*). W zakresie użytkowym parametry czasowe (np. częstotliwość pracy) w funkcji temperatury zwykle podawane są przez producentów w notach katalogowych [1].

Zwiększenie szybkości działania struktur CMOS wraz z obniżaniem temperatury, związana jest ze zwiększeniem ruchliwości nośników (dziur i elektronów) w strukturze półprzewodnikowej krzemu. Ruchliwość ta jest wypadkową kilku zależności, przede

wszystkim jest wynikiem rozpraszania na fononach i na domieszkach. Wraz z obniżaniem temperatury rośnie ruchliwość nośników (w zależności od koncentracji domieszek), co w efekcie prowadzi do zwiększenia szybkości działania struktur półprzewodnikowych [2]. Zakres niskich temperatur (temperatur kriogenicznych) nie jest typowym zakresem pracy przewidzianym przez producentów układów reprogramowalnych. Zastosowanie tych układów w niskich temperaturach wymaga przeprowadzenia badań w celu sprawdzenia poprawności działania i określenia zmian wartości parametrów. Wybrane do testów układy XC2C32 (Xilinx) wykazują zdolność do poprawnej pracy w niskich temperaturach, w tym w środowisku ciekłego azotu, a więc znacznie poniżej dolnej granicy temperatury zalecanej przez producenta.

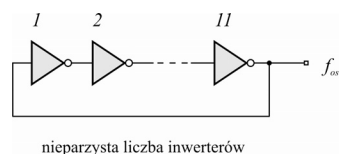
2. Układ pomiarowy

Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 1. Badany układ (oscylator pierścieniowy) zanurzony został w naczyniu Dewara (dla pomiarów w ciekłym azocie).



Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego
Fig. 1. Block diagram of the experimental circuit

Na oscyloskopie obserwowano przebieg (kształt) sygnału wyjściowego, oraz - wykorzystując funkcje pomiarowe oscyloskopu - mierzono częstotliwość generowanego przebiegu. Do zbierania danych utworzona została, w środowisku LabView, aplikacja akwizycji danych. Komunikacja pomiędzy oscyloskopem a komputerem odbywa się z wykorzystaniem magistrali pomiarowej GPIB (IEEE-488). Do sterowania pracą oscyloskopu wykorzystano komendy języka SCPI. Układ badanego oscylatora pierścieniowego przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Układ oscylatora pierścieniowego
Fig. 2. The ring oscillator circuit

Układ oscylatora utworzono z wykorzystaniem 11 połączonych szeregowo bramek NOT (nieparzysta liczba inwerterów). Bramki zaimplementowano wewnątrz struktury CPLD (do opisu wykorzystano język VHDL). Wstępnie, działanie oscylatora sprawdzono dla dwóch przypadków: w pierwszym sygnały z wejść i wyjść bramek wyprowadzone zostały na zewnątrz obudowy układu, także połączenia między bramkami wykonano poza układem. Dla zastosowanej obudowy PLCC44 możliwe było wykorzystanie 11 bramek. W drugim przypadku bramki oraz wszystkie połączenia między nimi zaimplementowano wewnątrz układu, a na zewnątrz wyprowadzono tylko sygnał wyjściowy. Aby uniknąć redukcji

liczby bramek podczas kompilacji zastosowano atrybut KEEP dla sygnałów łączących kolejne bramki. Dalsze badania wykonano dla drugiego przypadku.

3. Wyniki pomiarów częstotliwości i czasu propagacji

Na podstawie pomiaru częstotliwości oscylatora wyznaczono uśredniony czas propagacji dla pojedynczej bramki:

$$t_{PD} = \frac{T_{osc}}{n} = \frac{1}{n \cdot f_{osc}}, \quad (1)$$

gdzie: t_{PD} – czas propagacji dla pojedynczej bramki (n – liczba bramek), T_{osc} – okres drgań oscylatora pierścieniowego, f_{osc} – częstotliwość drgań oscylatora pierścieniowego.

Zaprogramowano i przebadano 9 układów XC2C32 w obudowie PLCC44, w temperaturze otoczenia (umownie określono jako 300 K) i w ciekłym azocie (77 K). Wyniki pomiarów częstotliwości oscylacji f_{osc} i obliczeń czasu propagacji t_{PD} dla pojedynczej bramki przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki pomiarów częstotliwości oscylacji f_{osc} (MHz) i obliczeń uśrednionego czasu t_{PD} (ns) dla układów XC2C32

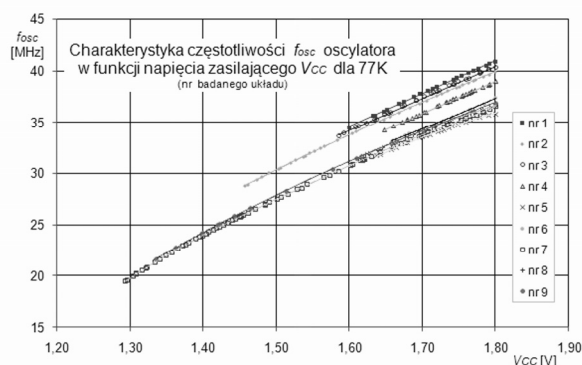
Tab. 1. The results of frequency f_{osc} (MHz) measurements and average time delay t_{PD} (ns) calculations for XC2C32 devices

nr układu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	średnia
f_{osc} 300 K	31,587	30,825	31,274	29,989	27,856	28,678	28,000	28,400	28,391	29,444
f_{osc} 77 K	40,862	39,908	40,312	38,841	36,316	37,353	36,574	36,945	37,071	38,242
t_{PD} 300 K	2,88	2,95	2,91	3,03	3,26	3,17	3,25	3,20	3,20	3,09
t_{PD} 77 K	2,22	2,28	2,26	2,34	2,50	2,43	2,49	2,46	2,45	2,38

Wraz z obniżeniem temperatury następuje wzrost częstotliwości oscylacji (maleje czas propagacji bramek). Otrzymane wyniki są zgodne z wynikami badań czasu propagacji metodą pomiaru czasu opóźnienia szeregowo połączonych bramek [3].

4. Wpływ zmian napięcia zasilania

W pomiarach zbadano wpływ zmian napięcia zasilania na częstotliwość drgań oscylatora pierścieniowego. Pomiaru wykonano obniżając napięcie zasilania układu V_{CC} od wartości nominalnej 1,8 V (dla układów rodziny XC2xx) do momentu zaniku oscylacji. Pomiaru wykonano w temperaturze otoczenia (300 K) i w ciekłym azocie (77 K). Na rysunku 3 przedstawiono zależność $f_{osc}=(V_{CC})$.



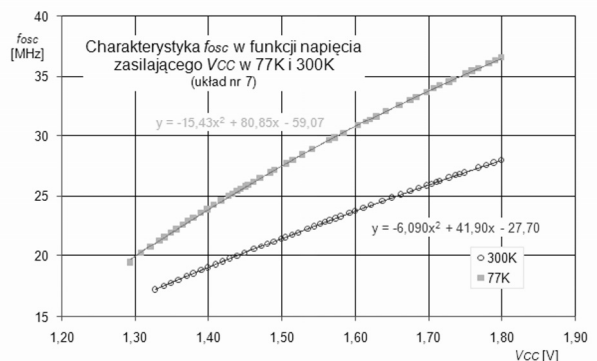
Rys. 3. Charakterystyka częstotliwości oscylatora w funkcji zmian napięcia zasilającego w temperaturze 77 K (układy 1-9)

Fig. 3. The frequency characteristic versus voltage supply at 77 K (devices no. 1-9)

Wszystkie badane układy poprawnie działają w temperaturze 77 K dla nominalnego napięcia $V_{CC} = 1,8$ V. Wraz z obniżaniem napięcia zasilania maleje częstotliwość oscylacji (zwiększa się czas propagacji pojedynczej bramki). Moment zaniku oscylacji jest

różny dla poszczególnych układów – w „najgorszym” przypadku (układ nr 6) pracował do napięcia 1,66 V, w „najlepszym” przypadku uzyskano zakres pracy do 1,30 V (układ nr 7). Zatem dolna wartość napięcia zasilania jest bardzo zróżnicowana i indywidualna dla każdego układu (w temperaturze 300 K testowane układy pracowały poprawnie do około 1,30 V). Przeprowadzone badania umożliwiły wyselekcjonowanie układów o stosunkowo szerokim zakresie napięć zasilania w temperaturze ciekłego azotu. Sterowanie wartością napięcia zasilającego umożliwia zmianę częstotliwości oscylatora. Tę cechę można wykorzystać do regulacji częstotliwości oscylatora lub do korekcji (lub autokorekcji) częstotliwości.

Na rysunku 4 przedstawiono wykresy zależności $f_{osc}=(V_{CC})$ w temperaturze 300 K i 77 K dla wybranego układu (nr 7).



Rys. 4. Częstotliwość oscylacji w funkcji napięcia zasilającego w 300 K i 77 K
Fig. 4. Frequency oscillation vs. supply voltage at 300 K and 77 K

Zmiany mają charakter monotoniczny, a uzyskane wyniki pomiarów można z dobrym przybliżeniem aproksymować funkcją wielomianową 2-stopnia (współczynnik korelacji $r^2 > 0,999$):

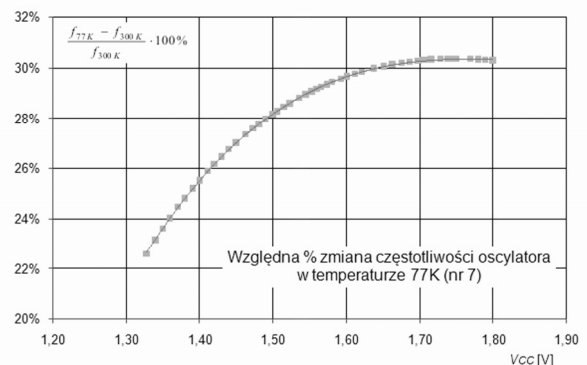
$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c, \quad (2)$$

gdzie:

$$a = -6,09, \quad b = 41,90, \quad c = -27,70 \text{ dla } 300 \text{ K,}$$

$$a = -15,43, \quad b = 80,85, \quad c = -59,07 \text{ dla } 77 \text{ K.}$$

Częstotliwość drgań oscylatora jest zależna od zmian temperatury oraz od zmian napięcia zasilania. Na rysunku 5 przedstawiono względną, procentową zmianę częstotliwości oscylacji dla 77 K w odniesieniu do częstotliwości w 300 K dla różnych wartości napięcia zasilającego.



Rys. 5. Względna zmiana częstotliwości oscylacji w temperaturze 77 K

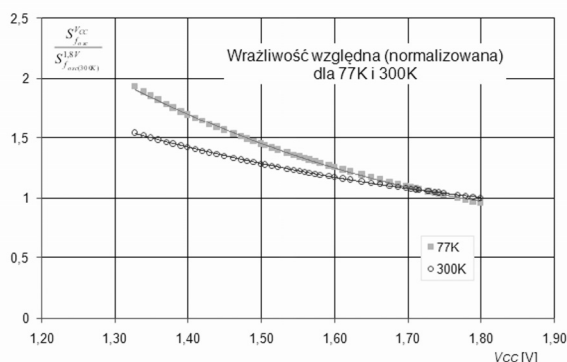
Fig. 5. The relative change of oscillation frequency at 77 K

Obniżenie temperatury powoduje zmianę (wzrost) częstotliwości drgań oscylatora o około 20-30%, przy czym wielkość zmian zależna jest od wartości napięcia zasilającego. Aby ocenić wpływ napięcia, wyznaczono wrażliwość częstotliwości f_{osc} na zmiany

napięcia V_{CC} . Wrażliwość względna (normalizowana) określona została równaniem:

$$S_y^x = S_{f_{osc}}^{V_{CC}} = \frac{\partial f_{osc}}{\partial V_{CC}} \cdot \frac{V_{CC}}{f_{osc}} \quad (3)$$

Na rysunku 6 przedstawiono zależność wrażliwości względnej częstotliwości od zmian napięcia zasilającego dla 300 K i 77 K odniesionej do wartości f_{osc} w punkcie $V_{CC}=1,8$ V, $T=300$ K.



Rys. 6. Wrażliwość względna (normalizowana) częstotliwości w funkcji V_{CC} dla 300 K i 77 K

Fig. 6. The frequency relative sensitivity (normalized) vs. supply voltage V_{CC} at 300 K and 77 K

Dla napięć zbliżonych do wartości napięcia nominalnego (1,8 V) wrażliwość układu na zmiany napięcia zasilania jest porównywalna dla 300 K i 77 K, wraz z obniżaniem napięcia zasilania wrażliwość wzrasta, przy czym efekt ten jest bardziej widoczny dla niskich temperatur. Wzrost wrażliwości dla niższych napięć jest charakterystyczny dla układów niskonapięciowych [4, 5].

5. Ocena stałości częstotliwości oscylatora

Ocenę stałości drgań oscylatora przeprowadzono na podstawie pomiarów średniokresowych zmian częstotliwości w czasie. W układzie pomiarowym (rys. 1) rejestrowano próbki (wyniki pomiaru częstotliwości) w odstępie 1s przez okres 24 godzin (86400 próbek). Dla pozyskanych próbek obliczono podstawowe parametry statystyczne: wartość średnią i wartość odchylenia standardowego. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

Tab. 2. Wartość średnia i wartość odchylenia standardowego częstotliwości (Hz) dla pomiarów 24-godzinnych (układ nr 7)

Tab. 2. The frequency (Hz) average and standard deviation value for 24-hour measurements (device no. 7)

	średnia	odchylenie standardowe
300 K	27 994 390	86 489
77 K	36 588 250	114 966

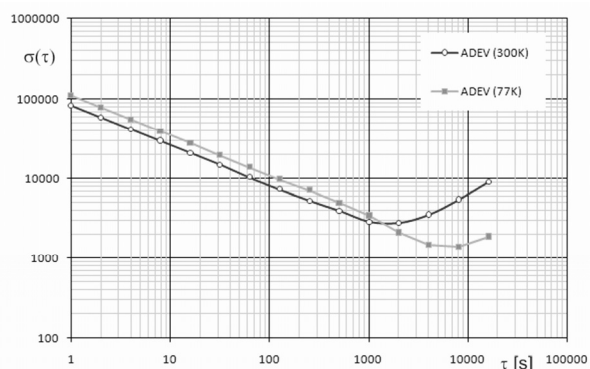
Do oceny stałości częstotliwości oscylatorów w czasie średnio lub długookresowym bardziej odpowiednie jest zastosowanie wariancji lub dewiacji Allana [6]. Estymator dewiacji Allana opisany jest zależnością:

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \sum_{k=1}^{N-1} (y_{k+1} - y_k)^2} \quad (4)$$

gdzie: N – liczba próbek, τ – odstęp między próbkami, y_k, y_{k+1} – wartości kolejnych próbek.

Na rysunku 7 przedstawiono wykresy dewiacji Allana dla jednego z badanych układów XC2C32 (układ nr 7). Obniżenie i stabi-

lizacja temperatury (umieszczenie oscylatora w ciekłym azocie) przyczynia się do poprawy średniokresowej stałości drgań oscylatora mniej więcej o rząd wielkości.



Rys. 7. Wykresy dewiacji Allana (ADEV) częstotliwości oscylatora dla 300 K i 77 K (układ nr 7)

Fig. 7. Allan deviation (ADEV) for frequency at 300 K and 77 K (device no. 7)

6. Podsumowanie

Jednym z głównych parametrów oceny wydajności obliczeniowej układów cyfrowych jest wydajność energetyczna (*energy efficiency*), określana jako liczba operacji MIPS (*million instructions per second*) lub FLOPS (*floating-point operations per second*) na jednostkę dostarczonej mocy. Poprawę (zwiększenie) tego parametru osiąga się - między innymi - poprzez zwiększenie częstotliwości pracy układów, obniżenie temperatury ich struktury (chłodzenie) oraz obniżenie mocy dostarczanej do układu (układy niskonapięciowe) [7]. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów z układami programowalnymi XC2C32 pokazały, że testowane układy mogą pracować poprawnie w warunkach kriogenicznych (w temperaturze wrzenia ciekłego azotu), a dla wyselekcjonowanych układów możliwe jest także znaczne obniżenie napięcia zasilania poniżej wartości nominalnej. Pozwala to na zastosowanie tych układów w aplikacjach kriogenicznych a także umożliwia zwiększanie wydajności obliczeniowej układów.

7. Literatura

- [1] XC2C32 – nota katalogowa, www.xilinx.com.
- [2] Gutierrez-D E.A., Jamal Deen M., Claeys C. L.: *Low Temperature Electronics - Physics, Devices, Circuits, and Applications*. Academic Press, San Diego, 2001.
- [3] Michalak S.: Pomiar czasu propagacji inwerterów implementowanych w układach programowalnych w temperaturze ciekłego azotu. PAK, vol. 57, nr 8/2011, s. 828-829.
- [4] Daga J.M., Ottaviano E., Auvergne D.: Temperature Effect on Delay for Low Voltage Applications. Design, Automation and Test in Europe, IEEE Proceedings, pp. 680-685, 1998.
- [5] Franco J.J.L., Boemo E., Castillo E., Parrilla L.: Ring Oscillators as Thermal Sensors in FPGAs: Experiments in Low Voltage. VI Southern Programmable Logic Conference, IEEE, pp.133-137, 2010.
- [6] Allan D.W.: Should the Classical Variance Be Used As a Basic Measure in Standard Metrology?, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. IM-36, No. 2, pp. 646-654, June 1987.
- [7] Vassighi A., Keshavarzi A., Narendra S., Schrom G., Ye Y., Lee S., Chrysler G., Sachdev M., De V.: Design Optimizations for Microprocessors at Low Temperature. Design Automation Conference, Proceedings, 41st, pp. 2-5, San Diego, 2004.

otrzymano / received: 11.04.2012

przyjęto do druku / accepted: 01.06.2012

artykuł recenzowany / revised paper