

# Generator sygnału 1 kHz

## Raport Techniczny

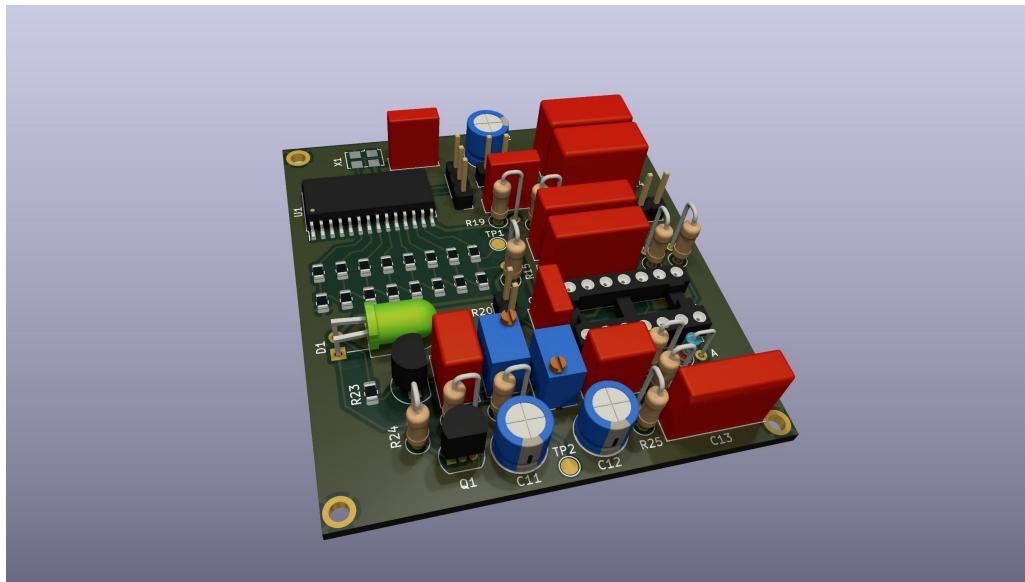
Szymon Januszek, szymon\_j@tutanota.com

Kwiecień 2023

---

### Streszczenie

Dokument zawiera opis budowy i działania generatora przebiegu 1 kHz.



# Spis treści

<b>1 Bezpośrednia synteza cyfrowa</b>	<b>3</b>
1.1 Mikrokontroler . . . . .	3
1.2 Przetwornik Cyfrowo-Analogowy . . . . .	3
1.3 Analiza zniekształceń przetwornika . . . . .	4
<b>2 Kształtowanie</b>	<b>4</b>
<b>3 Kontrola Amplitudy</b>	<b>5</b>
3.1 Pomiar amplitudy . . . . .	5
3.2 Element sprzęgający . . . . .	5
3.3 Źródło odniesienia . . . . .	6
3.4 Dostrajanie . . . . .	6
<b>4 Oprogramowanie</b>	<b>6</b>
4.1 Kod źródłowy . . . . .	8
<b>5 Eksperymenty</b>	<b>9</b>

# 1 Bezpośrednia synteza cyfrowa

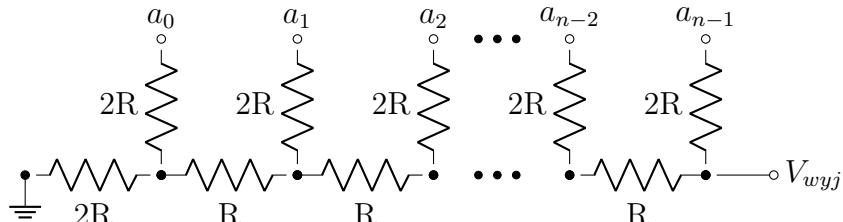
Aby wygenerować maksymalnie stabilny i dokładny względem częstotliwości sygnał, zdecydowałem się na wykorzystanie techniki **Bezpośredniej Syntezy Cyfrowej**, gdzie mikroprocesor wraz z układem Przetwornika Cyfrowo-Analogowego (DAC) generuje sygnał zbliżony do sygnału oczekiwanej. Umożliwia to zastosowanie wysokiej jakości generatora kwarcowego, o precyzyji rzędu 50ppm<sup>1</sup>, w całym zakresie temperatur. Oznacza to, iż częstotliwość uzyskanego sygnału nie będzie odbiegać o więcej niż  $\pm 50\text{ mHz}$  od wartości oczekiwanej.

## 1.1 Mikrokontroler

Jako główny mikrokontroler wybrany został układ **AVR32DA28**[2] należący do rodzinny 8-bitowych układów AVR. W porównaniu ze starszymi generacjami, producent dopuszcza pracę układu przy częstotliwościach przekraczających 8 MHz z napięciem 3 V. Jednocześnie dokonana została unifikacja modelu pamięci, co okaże być się przydatne przy pisaniu oprogramowania(4).

## 1.2 Przetwornik Cyfrowo-Analogowy

Do implementacji przetwornika zrealizowany został układ drabinki R-2R (Rys.1), umożliwiając łatwą zmianę wartości liczbowej, przedstawionej jako liczba binarna na pinach mikrokontrolera, na ułamek napięcia zasilania.



Rysunek 1: Schemat drabiny R-2R [1]

Napięcie na węźle wyjściowym przetwornika można opisać w następujący sposób:

$$V_{wyj} = V_{ref} \times \frac{a_0 \times 2^0 + a_1 \times 2^1 + a_2 \times 2^2 + \dots + a_{N-1} \times 2^{N-1}}{2^N}$$

Jak widać, przy  $N = 8$ , przetwornik ten pozwala na uzyskanie 256 różnych wartości. Dla  $V_{ref} = 3\text{ V}$ , oznacza to, iż różnica pomiędzy dwoma dowolnymi stopniami wynosi ok.  $11.72\text{ mV}$ .

Co ciekawe, okazuje się, iż impedancja wyjściowa takiego układu jest stała dla każdego poziomu<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Części na milion

<sup>2</sup>Wynika to z Twierdzenie Thévenina, zakładającego zerową impedancję źródła oraz mikrokontrolera. W rzeczywistości ich wartości są znacznie mniejsze od wartości R.

Aby zachować użyteczność najniższych bitów, precyza wykorzystanych rezysto-rów musi być lepsza niż  $\frac{1}{2^N} \times 100\% \approx 0.3\%$ . Na szczęście, w sprzedaży dostępne są rezistory przeznaczone do montażu powierzchniowego o precyzyji 0.1 %.

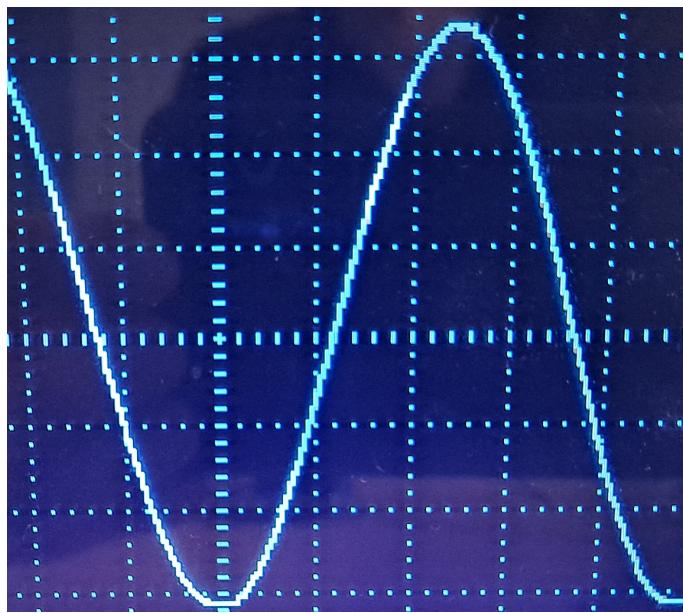
### 1.3 Analiza znieksztalceń przetwornika

Sygnal generowany w ten sposob nie opowiada jednak perfekcyjnej sinusoidzie (Rys. 2). Obecne jest tzw. znieksztalconie kwantyzacji, wynikajace z faktu, iż sygnal zlo-żony jest z serii dyskretnych wartosci. Jednak jeśli dokladnie przyjrzymy się różnicy pomiedzy naszym sygnałem a idealnej sinusoidzie, to okaże się, że nastepna skadowa generowanego sygnału ma częstotliwość  $f_1 = f_0 \times N_{smp}$ .

Co więcej, stosunek mocy całego sygnału do mocy wyzszych składowych dla konwertera z N-bitami wynosi

$$SQR = 1.76 + 6.02 \times N(dB) \quad (1)$$

Przy  $N = 8$  oraz  $N_{smp} = 1024$  oznacza to iż całkowita moc znieksztalceń wzgle-dem sygnału fundamentalnego wynosi  $-50$  dB, oraz jest rozłożona w paśmie mega-hercowym.

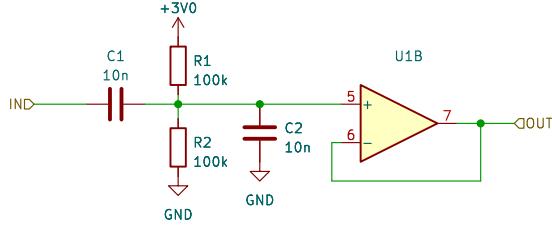


Rysunek 2: Przebieg sinusoidy generowanej przy pomocy przetwornika R-2R.

## 2 Kształtowanie

Mimo wszystko nalezy usunąć składowe wyzszej częstotliwości. Funkcje tą realizuje kondensator C2 (Rys. 3).

Dodatkowo, rzeczywiste wzmacniacze operacyjne nie są w stanie generować sy-gnałów bardzo bliskich  $< 300$  mV szyn zasilania. Tłumienia tego dokonują C1, R1, R2, zachowując wartość średkową na poziomie 1.5 V



Rysunek 3: Schemat filtru

### 3 Kontrola Amplitudы

Ostatnią zmienną którą należy rozpatrzyć jest amplituda sygnału wyjściowego. Na tym etapie poziom sygnału jest wyższy od oczekiwanej wartości 0.5 V. Potrzebna jest więc metoda dokładnego tłumienia, nie wprowadzająca dodatkowych zniekształceń i zakłócenia.

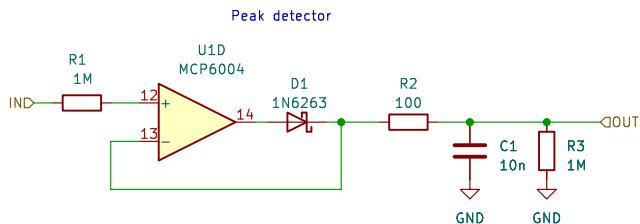
Rozwiązanie oparte o nawet precyzyjny potencjometr pozostaje jednak wrażliwe na zmianę absolutnej wartości napięcia zasilania, czy też dryft elementów związanych ze zmianą temperatury.

Tak więc, niezbędny jest układ aktywnie korygujący amplitudę sygnału. Cyfrowa implementacja takiego rozwiązania nie wchodzi w grę, ponieważ przetwornik DAC nie posiada wystarczającej głębokości bitowej. Stąd też, proponuję rozwiązanie w pełni analogowe.

Przy użyciu wzmacniaczy operacyjnych możemy uzyskać pętle sprzężenia zwrotnego, korygującą amplitudę sygnału względem stałego napięcia odniesienia. Do realizacji tego rozwiązania potrzebujemy następujących elementów.

#### 3.1 Pomiar amplitudы

Konieczny jest pomiar amplitudy sygnału wyjściowego. To tego celu służy tzw. Detektor szczytowy (Rys. 4).



Rysunek 4: Przykładowy schemat połówkowego detektora szczytowego

#### 3.2 Element sprzęgający

Wymagany jest układ umożliwiający tłumienie sygnału zmiennego względem sygnału sterującego:

$$V_{wyj} \propto \frac{V_{wej}}{V_{ster}} \quad (2)$$

Fizyczna implementacja takiego układu okazuje się być niebanalna. Możliwy jest układ realizujący operacje mnożenia wartości sygnałów. Jego realizacja jednak jest wysoce złożona i wymaga relatywnie dużo części.

Alternatywna metoda wykorzystuje element zmieniający swój opór elektryczny względem jakiegoś innego czynnika. Przykładem historycznej realizacji takiego układu jest zastosowanie niewielkiej łapmy żarowej, której opór włókna jest wprost proporcjonalny do jego temperatury.

Istnieje jednak znacznie prostsze i wydajniejsze rozwiązanie.

Popularnym elementem o zmiennym oporze jest fotorezystor. W przeciwieństwie do np. tranzystorów jFET, przy stałym natężeniu światła, zachowuje się on jak faktyczny rezystor, tzn. prąd przepływający jest wprost proporcjonalny do przyłożonego napięcia  $I \propto V$ , tym samym jego zastosowanie nie wprowadzi zniekształceń mogących wynikać z nie liniowością elementów półprzewodnikowych.

Tak więc, jeśli zamknie się fotorezystor w obudowie światłoszczelnej wraz z diodą LED, uzyskamy układ o zmiennym oporze elektrycznym, kontrolowany przez prąd diody<sup>3</sup>.

$$R \propto \frac{1}{I_{Led}} \quad (3)$$

Umożliwia to łatwą implementację układu sprzężenia (Eq. 2).

Co prawda powyższy model ignoruje fakt, iż tak na prawdę opór fotorezystora zależy od natężenia padającego światła  $R = \left(\frac{1}{\phi}\right)^A$ . Nie stanowi jednak to dużego problemu ponieważ układ ten znajduje się w pętli sprzężenia zwrotnego.

$$R \propto \frac{1}{(I_{Led})^A} \quad (4)$$

### 3.3 Źródło odniesienia

W tym momencie potrzebne jest jedynie stabilne oraz dostrajalne źródło napięcia odniesienia. Do tego celu z zupełności wystarczy układ LM4041 wraz z precyzyjnym potencjometrem.

### 3.4 Dostrajanie

Szczególnie trudnym okazało się zapewnienie stabilnej pracy układu. Wartości elementów w pętli kompensacji zostały w większości dobrane empirycznie. Konieczne było zastosowanie dużej pojemności kondensatorów elektrolitycznych, ze względu na duży czas propagacji sygnału przez resztę układu.

## 4 Oprogramowanie

Czas przejść do opisu kodu źródłowego. W pliku `sine_tab.cpp` znajduje się definicja tabeli funkcji sinus. Składa się ona z  $N_{smp} = 1024$  próbek, a wartość i-tej próbki

---

<sup>3</sup>Zakładam  $\phi \propto I$

zdefiniowana jest w następujący sposób:

$$f(i) = 2^N + \left\lfloor (2^N - 1) \times \sin \left( \frac{2\pi \times i}{N_{smp}} \right) \right\rfloor \quad (5)$$

$$f(i) = 128 + \left\lfloor 127 \times \sin \left( \frac{2\pi \times i}{1024} \right) \right\rfloor \quad (6)$$

Każda próbka jest 8-bitową liczbą całkowitą z zakresu  $\in \{1 \dots 255\}$ , jednocześnie tabela przedstawia cały jeden okres funkcji sinus, poza wartością  $\sin(2\pi)$ . Następną próbki stanowi wartość  $\sin(0)$ . Dzięki temu reprodukowany sygnał nie zawiera błędów co okres.

Zadaniem oprogramowania mikrokontrolera pozostaje wczytanie kolejnych wartości z pamięci, a następnie ustawienie pinów na odpowiedni stan. Wykorzystując 8-bitową naturę architektury AVR możliwe jest ustawienie stanu całego rejestru (tj. grupy 8 pinów) poprzez pojedynczy zapis do obszaru peryferialnego pamięci (Linia 35)

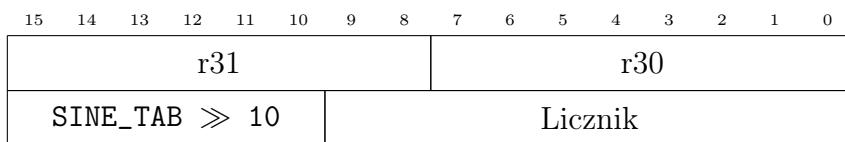
W tym miejscu napotykamy jednak pewien problem, synteza powyższego sygnału wymaga produkcji ponad miliona próbek na sekundę, tym czasem zastosowany mikroprocesor jest przystosowany do pracy przy częstotliwości nie przekraczającej 24 MHz. Przy zastosowanym generatorze kwarcowym o częstotliwości pracy 12.288 MHz oznacza to, że mamy dokładnie **12** cykli maszynowych na wygenerowanie następnej próbki, co więcej aby zachować precyze częstotliwości musimy wykorzystać wszystkie 12 cykli za każdym razem. Stąd też decyzja o implementacji całego algorytmu bezpośrednio w niskopoziomowym assemblerze. Pozwala to na dokładną kontrolę nad czasem wykonania całego cyklu, a jednocześnie umożliwia szereg optymalizacji będących poza zasięgiem kompilatora.

Kolejne bajty pobierane są przez instrukcje ld (Linia 32), która jednocześnie inkrementuje wskaźnik tworzony przez parę rejestrów r30 i r31.

Problemem pozostaje jedynie wydajne zawijanie wskaźnika po dotarciu do 1024-tej wartości. Ponownie wykorzystując 8-bitową nature układów AVR, możliwe jest bardzo wydajne rozwiążanie tego problemu.

Jednym z atrybutów udostępnianych przez kompilator GCC jest `__attribute__((aligned (1024)))`, który pozwala na wymuszenie wyrównania pozycji pierwszego bajtu danej zmiennej do wielokrotności liczby podanej jako argument. Oznacza to iż pozycja tablicy w pamięci przyjmuje postać  $A \times 1024$ .

Tak więc, niższy bajt 16-bitowego wskaźnika będzie ulegał stałym zmianą na całej swojej długości, natomiast w bajcie wyższym, dzięki wyrównaniu tabeli, zmieniać się będą jedynie dwa najniższe bity (Rys. 5).



Rysunek 5: Schemat rozkładu bitów we wskaźniku

Jedynie co tak na prawdę musimy robić to nie pozwolić na zmianę stanu 6 najwyższych bitów wskaźnika. Możemy to osiągnąć używając sprytnej sztuczki, zajmującej

łącznie 2 cykle zegarowe (Linia 38).

$$r31' = ((r31 \wedge 11_{bin}) \vee r20) \quad (7)$$

Po pierwsze zerujemy sześć najwyższych bitów górnego rejestru instrukcją ANDI z liczbą  $3_{dec}$ . Następnie instrukcja OR przywraca poprawny stan wyższych bitów, które na początku działania programu zostały zapisane w rejestrze 20 (Linijka 26).

## 4.1 Kod źródłowy

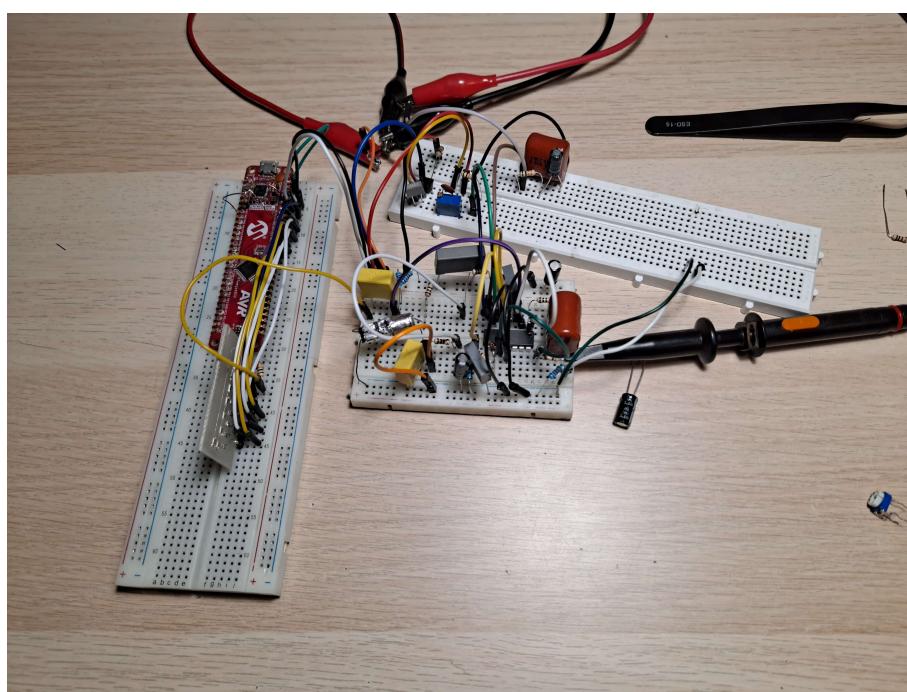
```
1 ;© Szymon Januszek 2023
2 #include <avr/io.h>
3 #include "config.h"
4
5 .extern SINE_TAB
6 .global main
7
8 main:
9   ;temporarily use r1 for ZERO
10  eor r1, r1
11
12  ;select external clock as Main Clock source
13  ldi r16, 0xD8; MAGIC VALUE
14  ldi r17, 0x83
15  out CPU_CCP, r16
16  sts CLKCTRL_MCLKCTRLA, r17; use external clock
17
18  out CPU_CCP, r16
19  sts CLKCTRL_MCLKCTRLB, r1; disable prescaler
20
21  ;set port direction and clear
22  ldi r16, 0xFF
23  sts PORTD_DIRSET, r16
24  out PORT_OUT, r1
25
26  ;load pointer to Z reg. pair
27  ldi r20, hi8(SINE_TAB)
28  mov r31, r20
29  mov r30, r1
30
31 loop:
32  ;pull next byte out of memory and increment the pointer
33  ld r2, Z+
34
35  ;output data
36  out PORT_OUT, r2
37
38  ;cyclize data pointer
```

```

39      andi r31, 0x03
40      or r31, r20
41
42      ;pad for 12.288 MHz
43      nop
44      nop
45      nop
46      nop
47
48      rjmp loop

```

## 5 Eksperymenty



Rysunek 6: złożony układ eksperymentalny

Przedstawiony układ został przetestowany z następującymi różnicami względem schematu:

- Mikrokontroler: ATMega4809
- Rezystory drabiny R-2R:  $10\text{ k}\Omega$ ,  $20\text{ k}\Omega$

Układ ATMega4809 zachowuje pełną kompatybilność kodu źródłowego z AVR32DA28, gdyż oba mikrokontrolery bazują na tej samej wersji architektury AVR.

Generator w czasie pracy pobierał ok  $7\text{ mA}$ . Amplituda była poprawnie kontrolowana oraz zachowywała stabilność przy zmiennym obciążeniu w zakresie  $1\text{ k}\Omega$ - $10\text{ k}\Omega$ . Układ stabilizował się po ok 1-2 sekundach od zmiany obciążenia.

Użyty oscyloskop nie pozwolił na użyteczny pomiar poziomu zniekształceń.

## Źródła

- [1] CC BY-SA 2.0. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:R2r-ladder.png>.
- [2] Microchip corp. *AVR32DA Final Data Sheet*. URL: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ProductDocuments/DataSheets/AVR32DA28-32-48-Data-Sheet-40002228B.pdf>.



Rysunek 7: Kot autora wspomagający proces twórczy