

Projektowanie filtrów analogowych do modułów cyfrowego przetwarzania sygnałów

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dydaktyczne projektowania, symulacji oraz testowania analogowych filtrów wejściowych i wyjściowych przeznaczonych do układów cyfrowego przetwarzania sygnałów. Prace projektowe ułatwiają pakiety oprogramowania. Prototypowe filtry można testować z wykorzystaniem płytki stykowej lub modułów ewaluacyjnych np. System Lab Kit ASLK. W artykule pokazano możliwości szybkiego sprawdzenia poprawności działania takich filtrów za pomocą systemu Analog Discovery 2 oraz oprogramowania WaveForms.

Abstract. The article presents selected didactic issues of design, simulation, and testing of analog input and output filters intended for digital signal processing systems. The design process of such filters is facilitated by software packages. Designed filters can be tested using the so-called breadboard or evaluation modules, e.g., System Lab Kit ASLK. The possibility of quickly checking the correctness of such filters using the Analog Discovery 2 system and the WaveForms software has been shown. (**Designing of analog filters for digital signal processing modules.**)

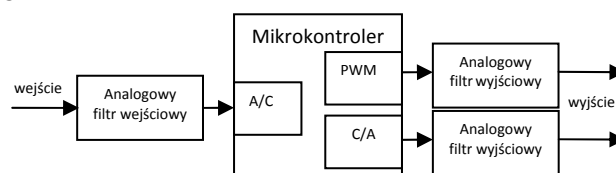
Słowa kluczowe: cyfrowe przetwarzanie sygnałów, CPS, filtry antyaliasingowe i rekonstrukcyjne.

Keywords: digital signal processing, DSP, anti-aliasing and reconstruction filters.

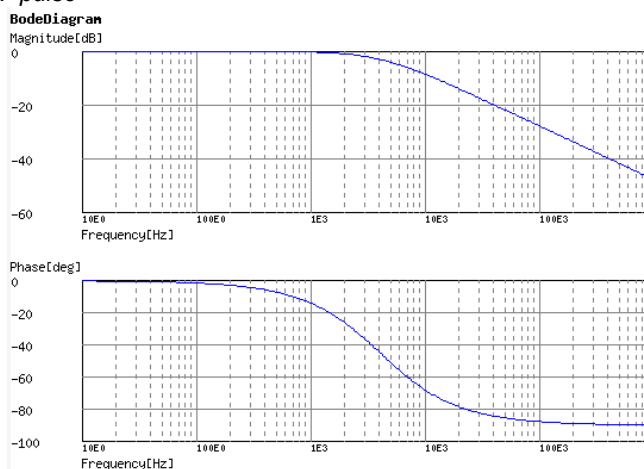
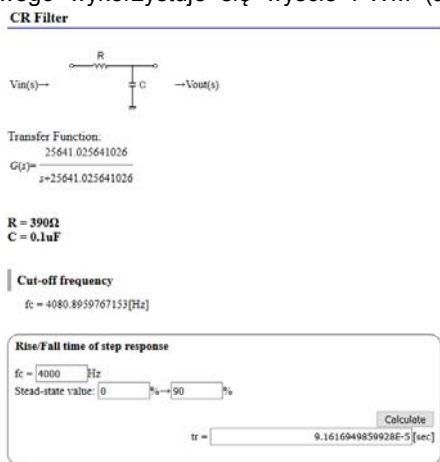
Wprowadzenie

Współczesne mikrokontrolery umożliwiają łatwą akwizycję sygnałów analogowych dzięki wbudowanym przetwornikom analogowo-cyfrowym. Można powiedzieć, że standardem jest dostępność przetwornika z rozdzielczości 10-bitów w mikrokontrolerach 8-bitowych lub rozdzielczości 12-bitów w przypadku mikrokontrolerów 32-bitowych. W niektórych rozwiązaniach dostępne są także przetworniki cyfrowo-analogowe - przykładowo w układ STM32F407 jest wbudowany 12-bitowy przetwornik C/A [1]. W mikrokontrolerach 8-bitowych do odtwarzania sygnału analogowego wykorzystuje się wyjście PWM (ang. *pulse*

width modulation) lub dołącza się zewnętrzny przetwornik C/A.



Rys. 1. System cyfrowego przetwarzania sygnałów



Rys. 2. Przykładowy projekt filtra dolnoprzepustowego (<http://sim.okawa-denshi.jp/en/CRtool.php>)

Przy korzystaniu z mikrokontrolerów trzeba jednak pamiętać, że najczęściej nie posiadają one wbudowanych filtrów antyaliasingowych (na wejściu) oraz filtrów rekonstrukcyjnych (na wyjściu), które powinny być zastosowane w systemie przetwarzania sygnałów (rys. 1). Brak takich filtrów wymaga ich samodzielnego zbudowania, ale jednocześnie umożliwia zaprojektowanie rozwiązań dostosowanych do indywidualnych potrzeb projektanta systemu.

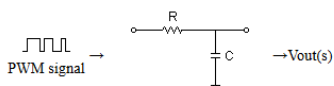
Do zaprojektowania filtrów analogowych najwygodniej jest skorzystać ze specjalistycznego oprogramowania, które oblicza wartości poszczególnych elementów, a także wykreśla charakterystyki częstotliwościowe. Dostępne w sieci oprogramowanie może działać w trybie on-line (bezpośrednio na stronie internetowej) lub jako pakiety wymagające instalowania na komputerze. W artykule pokazano wybrane aspekty projektowania i badania filtrów,

które są omawiane na przedmiocie „Programowalne układy cyfrowe i procesory sygnałowe” prowadzonym dla studentów kierunku Automatyka i Robotyka.

Oprogramowanie OKAWA ELECTRIC DESIGN

Oprogramowanie "Filter Design and Analysis" na stronie [2] umożliwia zaprojektowanie prostych filtrów RC (1 i 2 rzędu), LR, RLC oraz filtrów aktywnych np. Sallen-Key. Oprogramowanie działa w trybie on-line i pozwala zarówno na obliczanie elementów dla zadanej częstotliwości jak i analizę przy zadanych wartościach elementów. Przykładowy projekt filtra dolnoprzepustowego pokazano na rys. 2. Oprogramowanie umożliwia przygotowanie także prostego filtra do filtracji sygnału PWM (rys. 3). Pewną niedogodnością tego oprogramowania są pojawiające się reklamy, które należy zablokować.

RC Filter



Transfer Function:

$$G(s) = \frac{18849.555921539}{s + 18849.555921539}$$

- Cut-off frequency**
 $f_c = 3000[\text{Hz}]$
- Final Vout value of the step response (without a ripple)**
 $g(\infty) = 2.5[\text{V}]$
- Peak-to-peak ripple voltage**
 $\Delta V_{pk-pk} = 2.1959988885398[\text{V}](\text{Duty}=50\%)$
- Settling time 0%→90% (0V→2.25V) (without a ripple)**
 $t_r = 0.00012215593314657[\text{sec}]$

$f_{\text{PWM}} = 10\text{k} [\text{Hz}]$
 Duty Step 0% → 50 [%]
 PWM signal voltage:
 $V_L = 0 [\text{V}]$ $V_H = 5 [\text{V}]$

R and C values of filter | Cut-off frequency

Cut-off frequency $f_c = 3000 [\text{Hz}]$
 R and C values
 $R = \text{ } \Omega$ $C = \text{ } \text{F}$

p:pico, n:nano, u:micro, k:kilo, M:mega

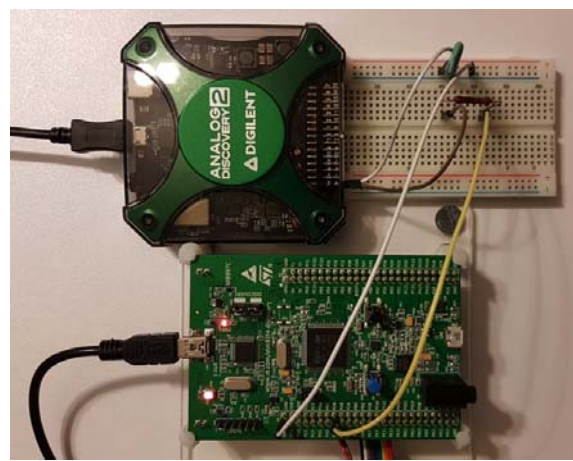
Calculate

Rys. 3. Przykładowy projekt filtra wygładzającego PWM (<http://sim.okawa-denshi.jp/en/PWMtool.php>)

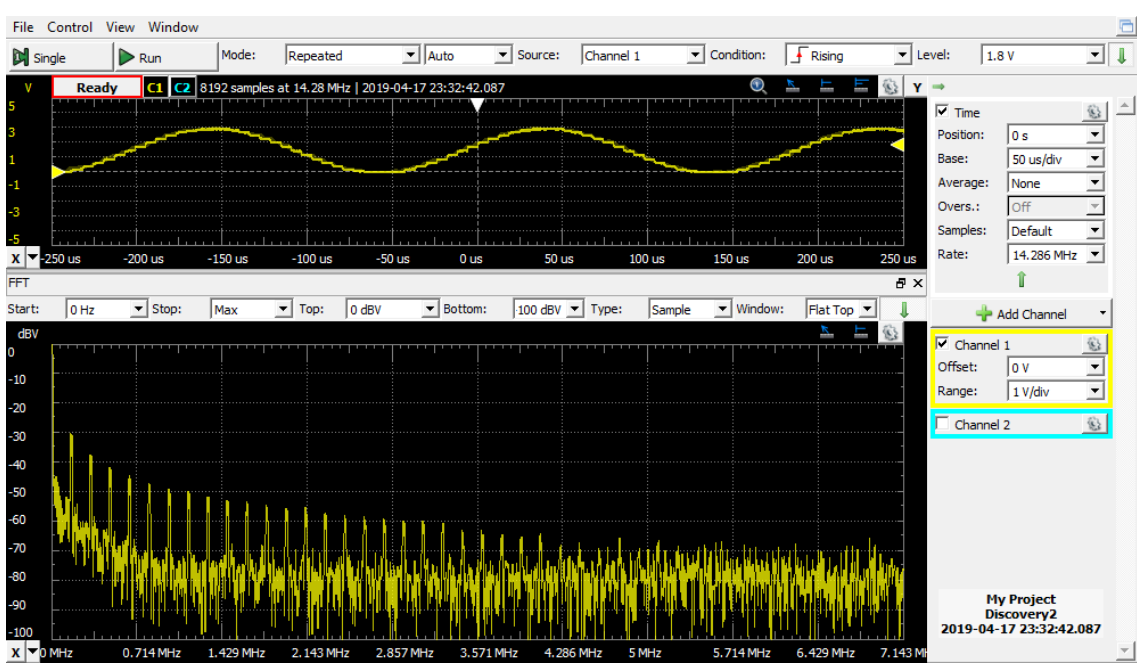
W celu zilustrowania działania filtra RC (6.2 kΩ i 1 nF), mającego za zadanie wygładzanie sygnału z przetwornika C/A modułu STM32F407 (rys. 4), uruchomiono program do generacji sygnału sinusoidalnego z użyciem tablicy wartości próbek:

```
const uint16_t Sine12bit[32] = {2047, 2447, 2831, 3185, 3498,
3750, 3939, 4056, 4095, 4056, 3939, 3750, 3495, 3185, 2831,
2447, 2047, 1647, 1263, 909, 599, 344, 155, 38, 0, 38, 155, 344,
599, 909, 1263, 1647};
```

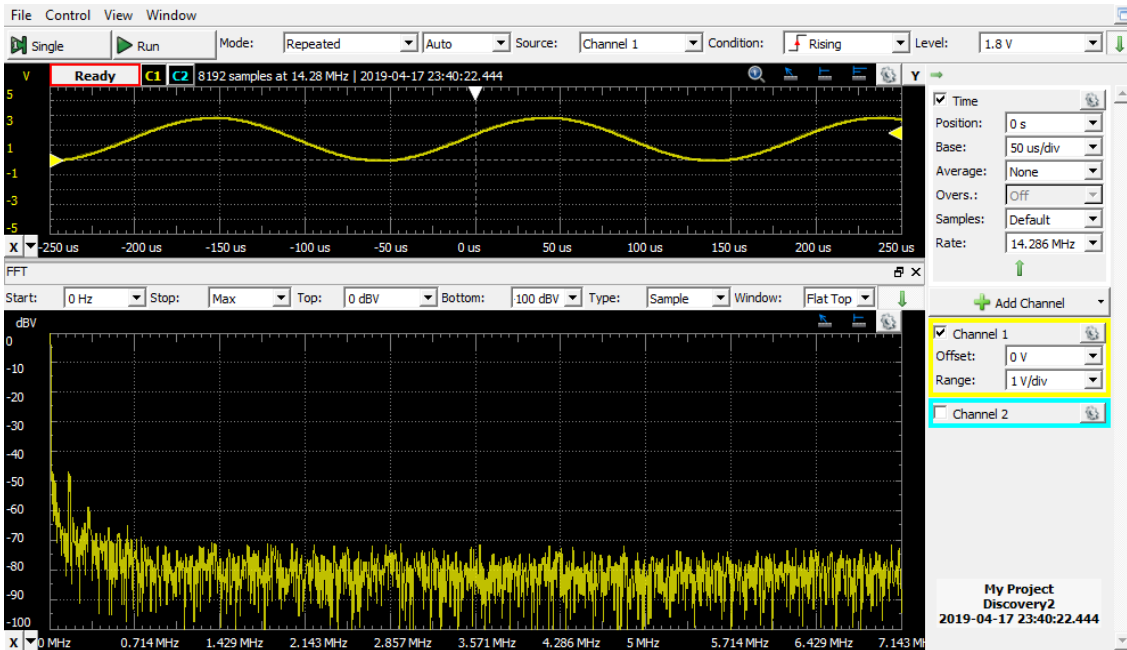
Do zbadania wpływu filtra na generowany sygnał wykorzystano system Digilent Analog Discovery 2 oraz oprogramowanie WaveForms, które integruje w sobie m.in. generator sygnału i oscyloskop 2-kanalowy, a także pozwala na wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych w zakresie od 1 Hz do 10 MHz [3]. Rysunki 5 i 6 pokazują przebieg oraz analizę FFT sygnału, odpowiednio bez i z zastosowaniem filtra RC.



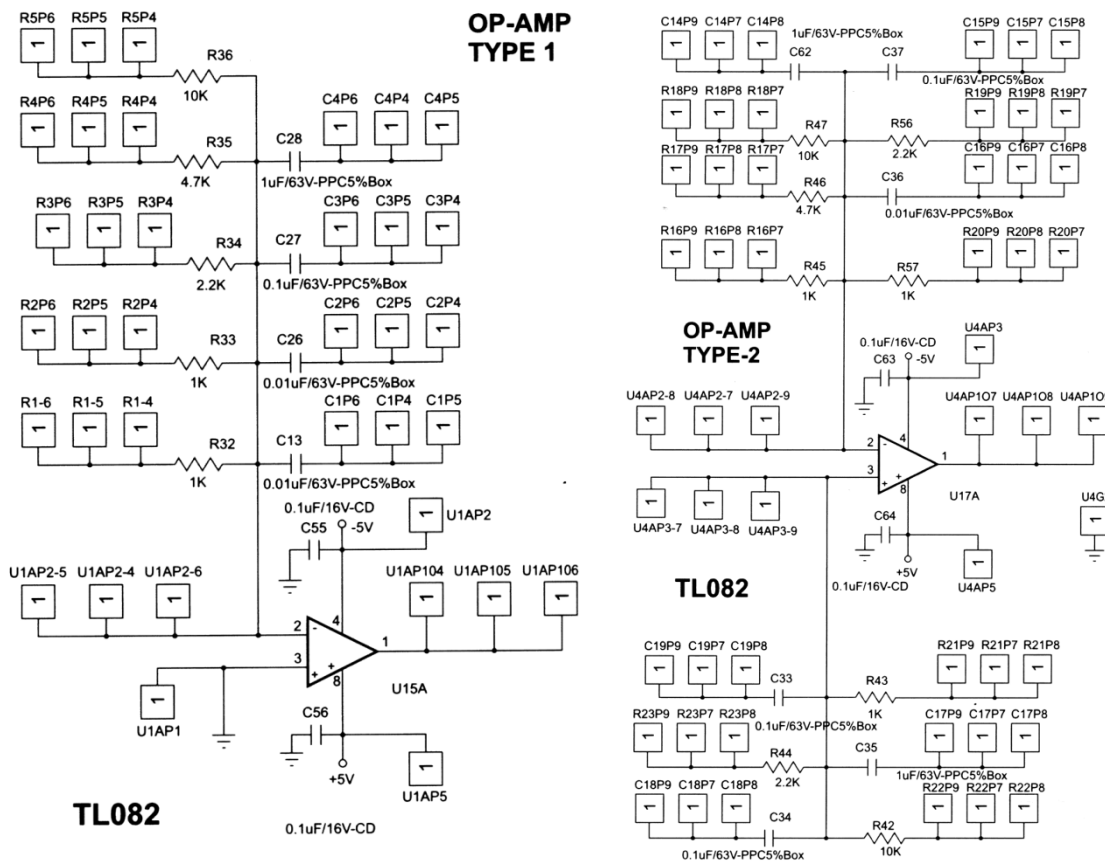
Rys. 4. Moduł STM32F407 generujący sygnał sinusoidalny mierzony za pomocą układu Analog Discovery 2



Rys. 5. Sygnał na wyjściu przetwornika C/A – widok w oprogramowaniu WaveForms



Rys. 6. Sygnał po filtracji filtrem RC – widok w oprogramowaniu WaveForms



Rys. 7. Schematy obwodów wzmacniaczy operacyjnych na płycie ASLkV2010 [6]

Oprogramowanie TEXAS INSTRUMENTS TINA-TI, FILTERPRO oraz moduł elektroniczny ASLKV2010

Interesującym pakietem przygotowanym przez firmę Texas Instruments do projektowania aktywnych filtrów analogowych jest oprogramowanie FilterPro [4], TINA-TI [5] oraz moduł elektroniczny TI Analog System Lab Kit (ASLK) [6], który zawiera aktywne elementy elektroniki analogowej. Wśród tych elementów znajduje się 8 wzmacniaczy operacyjnych, 3 analogowe układy mnożące i 2 przetworniki

cyfrowo-analogowe. Zestaw tych narzędzi programowo-sprzętowych pozwala na wygodne eksperymenty z filtrami aktywnymi RC.

Program FilterPro pozwala zaprojektować filtr dla częstotliwości do 1 MHz na podstawie niezbędnych parametrów wprowadzonych przez użytkownika. Wyborowi podlega typ filtru (dolnopasmowy, górnopasmowy, pasmowoprzepustowy, pasmowozaporowy oraz wszechprzepustowy), specyfikacja częstotliwości granicznych oraz

wartości transmitancji w tych punktach, typ aproksymacji (Bessela, Butterwortha, Czebyszewa, liniowej fazy oraz Gaussa) oraz topologia (Sallen-Key lub z wielokrotnym sprzężeniem zwrotnym). Program generuje schemat filtru, wykreśla jego charakterystykę amplitudową, fazową oraz dokonuje wyliczenia rezystancji i pojemności filtru do rzędu 10-tego włącznie. Tolerancja rezystancji lub pojemności może być wybrana w zakresie od 0 do 20 %. W programie pozwolono użytkownikowi na modyfikację wartości wybranej rezystancji lub pojemności, ale tylko jednej, co oznacza, że wartości elementów pasywnych są właściwie narzucone. Program ten nie nadaje się do obserwacji charakterystyki transmitancji dowolnie dobranych elementów w przeciwieństwie do programu TINA-TI.

Program TINA-TI to narzędzie wzorowane na symulatorze SPICE. Od użytkownika oczekuje się określenia schematu połączeń, wyboru poszczególnych elementów elektronicznych. TINA-TI symuluje działanie układu, generując między innymi charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową oraz fazowo-częstotliwościową. Możliwość swobodnej symulacji pozwala oszacować przebieg charakterystyk w sytuacjach odstępstwa parametrów elementów od wartości wyznaczonych przez projekt. To właśnie układy filtrów wymagają precyzyjnych elementów w celu osiągnięcia założeń projektu.

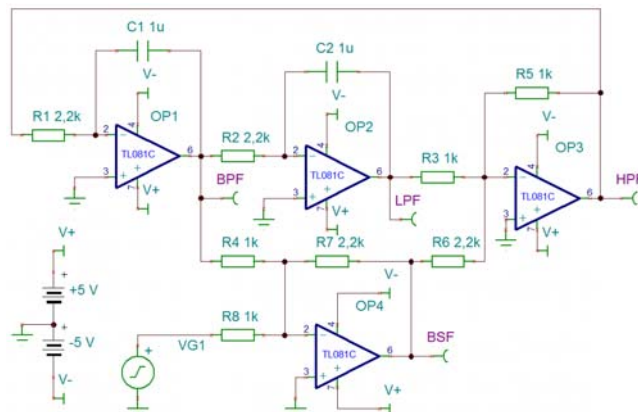
Zdobywanie doświadczenia w konstruowaniu filtrów analogowych wymaga eksperymentów ze sprzętem. Interesującą propozycją jest moduł elektroniczny TI Analog System Lab Kit [6]. Na płycie modułu zamontowano niezbędne elementy elektroniczne takie jak wzmacniacze operacyjne, rezystory i kondensatory. Elementy te częściowo połączono. Schemat tych częściowych połączeń pokazano na rys. 7.

Widoczne na schemacie kwadraty z cyfrą 1 oznaczają punkty łączeniowe w postaci szpilek (ang. *goldpin*), które można wykorzystać do niezbędnych połączeń.

Na schematach (rys. 7) można zauważyć, że dostępne rezystancje to 1K, 2K2, 4K7 i 10K, a dostępne pojemności to 0.01 μ F, 0.1 μ F i 1 μ F. Tak „skąpy” zbiór dostępnych wartości nie pozwala na konfigurację dowolnie wybranego filtru jednak konstrukcja płyty umożliwia dołączenie elementów zewnętrznych.

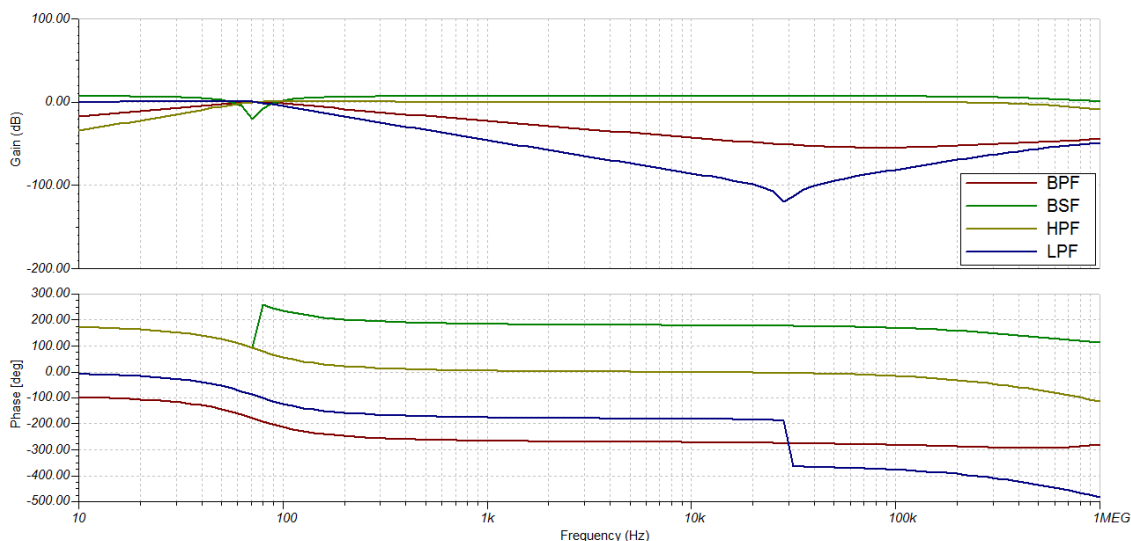
Dla zilustrowania przykładowego projektu przedstawiono symulację i pomiary filtru uniwersalnego, 2-go rzędu, wykorzystującego wyłącznie elementy dostępne na płycie. Schemat filtru, którego wykonanie umożliwiają obwody z rys. 7, pokazano na rys. 8. Filtr ten można wykorzystać jako dolnoprzepustowy, górnoprzepustowy,

pasmostopowy i pasmostopowy. Charakterystykę częstotliwościową tego filtru uzyskano wykonując symulację w programie TINA-TI (*Analysis*→*AC Analysis*→*AC Transfer Characteristic*) – wykres zamieszczono na rys. 9.

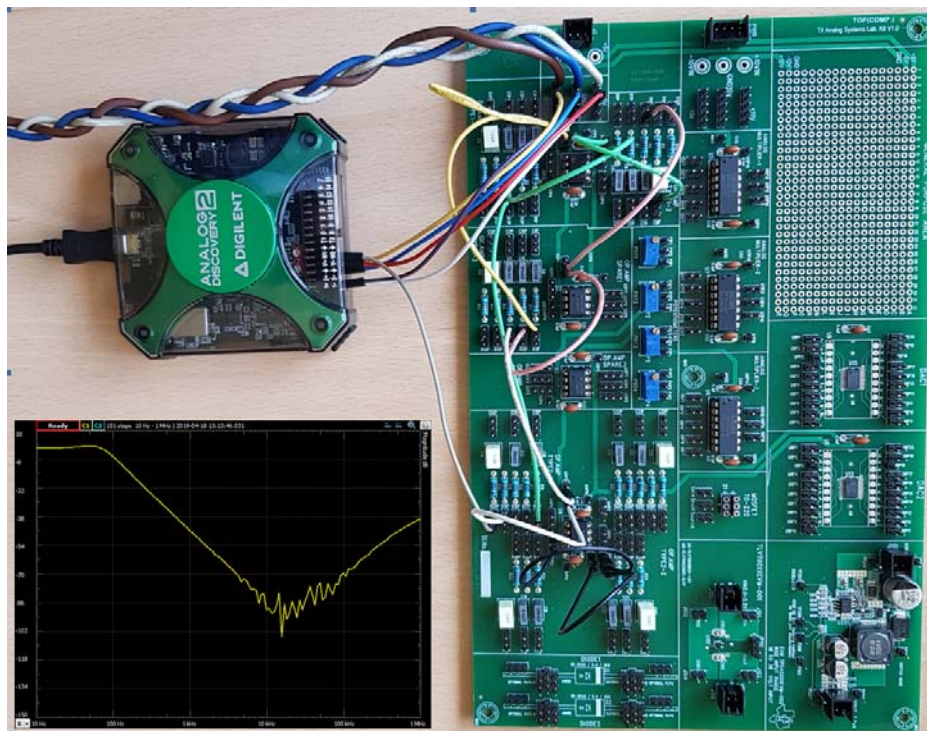


Rys. 8. Schemat filtru uniwersalnego wykorzystującego obwody na płycie ASLKV2010 (rodzaj filtru określają dostępne wyjścia: BPF-pasmostopowy, LPF-dolnoprzepustowy, HPF-górnoprzepustowy, BSF-pasmostopowy, pulsacja graniczna $\omega=1/R_1C_1$)

Charakterystyki pokazane na rys. 9 obrazują efekt ograniczonych możliwości technicznych zastosowanego wzmacniacza operacyjnego (TL081). W pobliżu punktu 30 kHz, filtr dolnoprzepustowy (LPF) osiąga największe tłumienie po czym przy dalszym wzroście częstotliwości tłumienie filtru maleje. Ostateczna weryfikacja wyników symulacji możliwa była po wykonaniu rzeczywistego filtru zawierającego elementy widoczne na rys.8. Widok układu eksperymentalnego przedstawiono na rys. 10. Na rys. 10 jest widoczna płyta ASLKV2010, która jest wcześniejszą wersją obecnie oferowanej płyty TI Analog System Lab Kit. Charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową uzyskano za pomocą urządzenia Digilent Analog Discovery 2 [3]. Charakterystykę omawianego filtru umieszczono w lewym dolnym rogu rysunku. Można zauważyć, że w przebiegu charakterystyki widoczne jest miejsce, które wystąpiło również we wcześniejszych symulacjach, gdzie transmitancja filtru po osiągnięciu minimum zaczyna wzrastać.



Rys. 9. Charakterystyki częstotliwościowe filtru uniwersalnego uzyskane w TINA-TI



Rys. 10. Rzeczywista realizacja filtru w wykorzystaniu płyty ASLKv2010 oraz charakterystyka amplitudowa uzyskana analizatorem Digilent Analog Discovery 2

W rzeczywistym układzie efekt minimum widoczny na rys. 10 wystąpił w punkcie 20 kHz, -90 dB (w symulacjach na rys. 9, dla filtru dolnoprzepustowego LPF punkt ten leży bliżej częstotliwości 30 kHz i osiąga ponad 100 dB). Rzeczywista weryfikacja układu filtru potwierdziła wyniki uzyskane na etapie symulacji, wskazując na praktyczne znaczenie tego narzędzia, którym jest symulator TINA-TI.

Omówiony powyżej projekt filtru uniwersalnego jest przykładem pomysłu, który można wykorzystać w procesie dydaktycznym związanym z układową elektroniką praktyczną. Oprogramowanie TINA-TI i FilterPro dostępne jest nieodpłatnie więc pozwala nie tylko na organizację laboratorium oraz na wykorzystanie przez studentów poza laboratorium bez dodatkowych kosztów finansowych. Płyta TI Analog System Lab Kit jest interesującym rozwiązaniem dla umożliwienia eksperymentów laboratoryjnych, które można wielokrotnie powtarzać, a każdorazowe rozłączanie i powtórne łączenie obwodów nie wywołuje znaczącego zagrożenia ich mechanicznego uszkodzenia.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości szybkiego zaprojektowania filtrów analogowych, które zapewniają właściwy proces akwizycji lub rekonstrukcji sygnału analogowego. Oprócz przedstawionych rozwiązań, także inni wiodący producenci układów elektronicznych (np. [7, 8]) oferują pakiety oprogramowania, które uwalniają projektanta od obliczeń wartości elementów, pozwalając na koncentrację się na właściwościach zaprojektowanego rozwiązania.

Zaprezentowane aspekty projektowania filtrów analogowych w połączeniu z możliwością realizacji filtrów cyfrowych z użyciem procesorów sygnałowych [9, 10] pozwalają zdobyć umiejętności konstruowania pełnego systemu cyfrowego przetwarzania sygnałów [11, 12].

Autorzy: dr inż. Tomasz Marciniak, dr inż. Damian Cetnarowicz, dr inż. Paweł Pawłowski, prof. dr hab. inż. Adam Dąbrowski, Wydział Informatyki, Instytut Automatyki i Robotyki, Zakład Układów Elektronicznych, i Przetwarzania Sygnałów, Politechnika Poznańska, ul. Jana Pawła II 24, 60-965 Poznań, E-mail:

tomasz.marciniak, damian.cetnarowicz, pawel.pawlowski, adam.dabrowski@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] STM32F4DISCOVERY Discovery kit with STM32F407VG MCU, October 2016, <https://www.st.com/en/evaluation-tools/stm32f4discovery.html>.
- [2] Filter Design and Analysis, <http://sim.okawa-denshi.jp/en/Fkeisan.htm>.
- [3] The Analog Discovery 2: A portable USB laboratory for everyone, <https://analogdiscovery.com/>
- [4] FilterPro™ User's Guide User's Guide, Texas Instruments, February 2011, <http://www.ti.com/lit/an/sbfa001c/sbfa001c.pdf>
- [5] SPICE-based analog simulation program TINA-TI <http://www.ti.com/tool/tina-ti>
- [6] Analog System Lab Kit (ASLK) <https://university.ti.com/en/faculty/teaching-materials-and-classroom-resources/ti-based-teaching-kits-for-analog-and-power-design/analog-system-lab-kit-pro>
- [7] FilterLab 2.0 User's Guide Microchip Technology Inc. 2003 <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/51419a.pdf>.
- [8] K. Padmanabhuni, Confused About Choosing the Right Amplifier for Your Filter? Here's the Answer to Put an End to Your Worries—the Analog Filter Wizard Design Tool! <https://www.analog.com/media/en/analog-dialogue/studentzone/studentzone-10-2017.pdf>
- [9] A. Dąbrowski, D. Cetnarowicz, T. Marciniak, P. Pawłowski, A. Sęk, E. Skrodzka, "DSP Realization of Directional Filters for Speech Enhancement", 8th IEEE International Conference on Methods in Automation and Robotics – MMAR'2002, p. 523-528, 2-5 September 2002, Szczecin, Poland.
- [10] D. Cetnarowicz, A. Dąbrowski, R. Długosz, T. Marciniak, "Analog versus digital FIR filters", SIGNAL PROCESSING '2002, Poland Section, Chapter Circuits and Systems IEEE, p. 63-68, 11 October 2002, Poznań, Poland.
- [11] D. Cetnarowicz, A. Dąbrowski, Design Principles For FIR SC GSM Channel Filters, Proc. of the 7th International Conference MIXED DESIGN OF INTEGRATED CIRCUITS AND SYSTEMS, p.419-424, Gdynia-Poland, 15-17 June 2000.
- [12] T. Marciniak, A. Dąbrowski, "Nauczanie zagadnień cyfrowego przetwarzania sygnałów z zastosowaniem modułów z mikrokontrolerem", Przegląd Elektrotechniczny, R 94, Nr 9/2018.