Programowana macierz układów analogowych

13

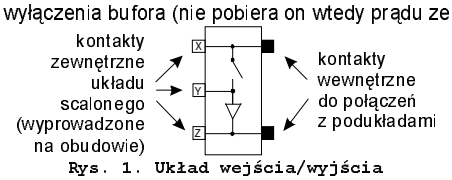
Ćwiczenie opracowali: mgr inż. Bogdan Pankiewicz i mgr inż. Marek Wójcikowski

1. Wstęp

Układ **FPAA** (ang. ***F**ield*[1] ***P**rogrammable **A**nalog **A**rray* = programowana macierz analogowa) firmy **Motorola** służy do szybkiego realizowania projektów podstawowych bloków analogowych. Układ został zbudowany w technice **przełączanych pojemności**, w której pojemności przełączane cyklicznie kluczami pełnią funkcję rezystorów. Przy wykorzystaniu przełączanych pojemności i wzmacniacza operacyjnego możliwe jest zbudowanie podstawowego wzmacniacza o wzmocnieniu zależnym od wartości pojemności, a także innych bardziej skomplikowanych układów. Układ scalony FPAA zawiera 6864 klucze elektroniczne i jest sprzedawany razem z oprogramowaniem *EasyAnalog* służącym do łatwego programowania ustawień kluczy.

2. Opis układu FPAA

W układzie mamy do dyspozycji 20 stref analogowych. Każda strefa zawiera jeden wzmacniacz operacyjny i pięć kondensatorów. Każdy kondensator składa się z zestawu 255 małych pojemności dołączanych poprzez klucze - w ten sposób każdy z pięciu kondensatorów może mieć jedną z 255 wartości. Klucze ustawiające pojemności są "statyczne" - ustawiane są jednorazowo podczas programowania. W układzie występują również klucze "dynamiczne", realizujące cykliczne (z określoną częstotliwością) przełączanie pojemności, co sprawia, że pojemność wraz z kluczami pełni funkcję rezystora. Jeszcze inne klucze, także dynamiczne, mogą być sterowane fazą sygnału wejściowego. Oprócz tego w każdej strefie występują dodatkowe klucze statyczne umożliwiające różne połączenia wzmacniacza operacyjnego i kondensatorów w ramach jednego pola. Inne klucze statyczne zapewniają możliwość połączenia pomiędzy sąsiednimi strefami (połączenia takie nie zawsze są możliwe, gdyż może się zdarzyć, że wszystkie klucze zostaną wykorzystane do innych celów). W układzie scalonym umieszczono też połączenia (magistrale poziome i pionowe) przebiegające przez cały układ, co umożliwia połączenie odległych stref. Do połączenia z układami zewnętrznymi służy 13 uniwersalnych wejść/wyjść wyposażonych w klucze i bufory. Klucze możemy ustawiać w zależności od potrzeby; istnieje też możliwość wyłączenia bufora (nie pobiera on wtedy prądu ze źródła zasilania).



Rys. 1. Układ wejścia/wyjścia

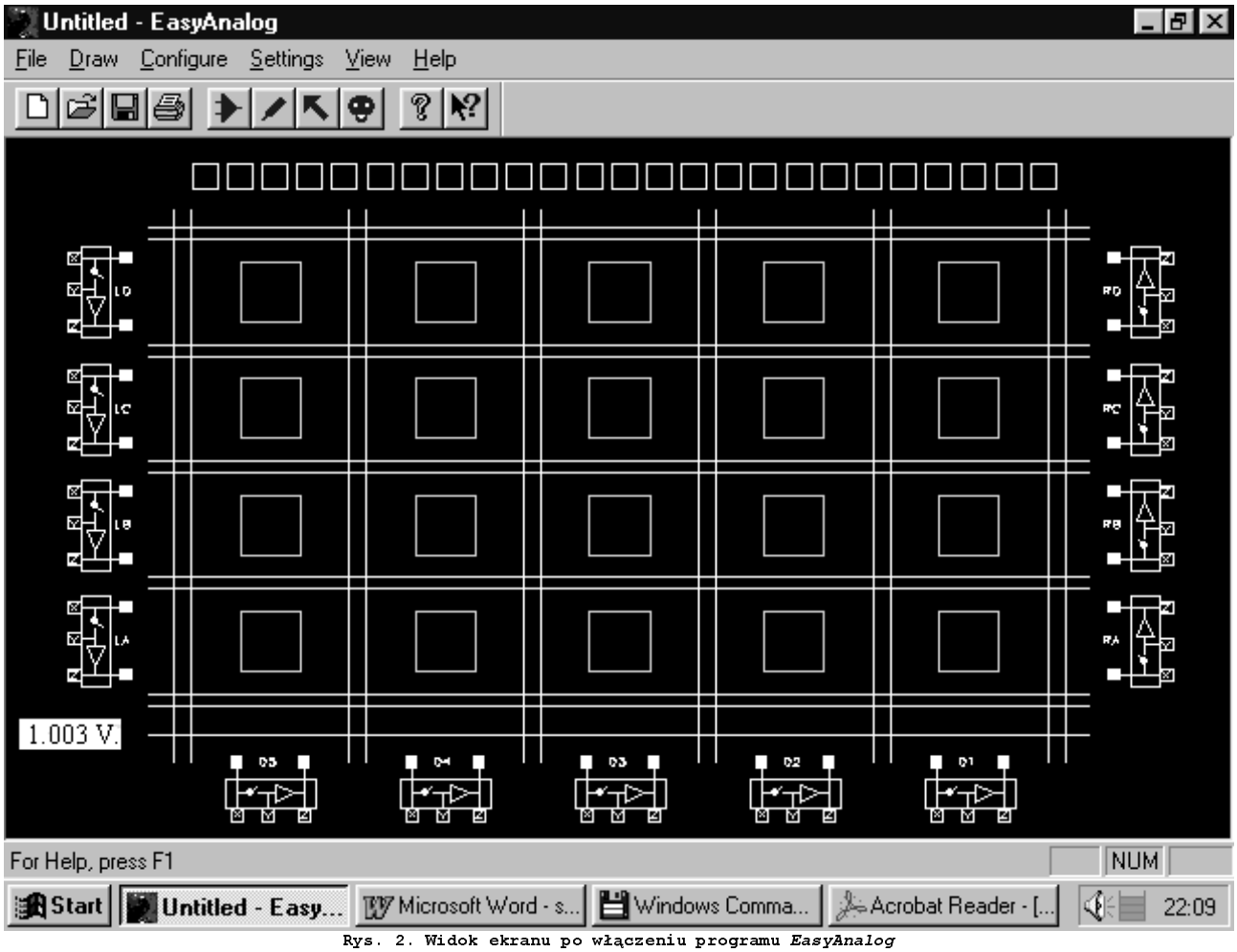
Układ zasilany jest pojedynczym napięciem +5V względem **ziemi**. Do obróbki sygnałów wewnątrz układu korzysta się z **masy sygnałowej**, która generowana jest poprzez podział napięcia zasilającego - stąd potencjał **masy sygnałowej** względem **ziemi** wynosi +2.5V. Napięcia wszystkich sygnałów odnoszą się do masy sygnałowej, stąd największa amplituda sygnału wynosi ±2.5V.

3. Oprogramowanie EasyAnalog

Oprogramowanie *EasyAnalog* ma wbudowaną bibliotekę z informacjami o sposobach połączeń kluczy w jednej lub dwóch sąsiednich stref w celu uzyskania wybranego podukładu analogowego. Użytkownik nie musi zatem dbać o wewnętrzne ustawienia każdego klucza, a operuje tylko symbolicznymi blokami przedstawiającymi elementarny podukład.
Do użytkownika należy wybranie podukładów z biblioteki, odpowiednie ich połączenie przy pomocy "przewodów" oraz ustawienie parametrów każdego podukładu. Następnie gotowy projekt wystarczy przesłać łączem z komputera do układu FPAA i... wypróbować działanie układu na stanowisku pomiarowym.
Po włączeniu programu widzimy 20 wolnych stref do zaprogramowania. Naokoło nich (z lewej, prawej i od dołu) znajduje się 13 wejść/wyjść wraz z buforami.
Pionowe i poziome podwójne linie rozmieszczone pomiędzy strefami to "przewody" służące do połączeń pomiędzy odległymi podukładami. Dodatkowo na dole znajduje się magistrala (oznaczona kolorem żółtym) rozprowadzająca napięcie z programowalnego źródła napięcia stałego, które można ustawiać w zakresie od ok. -2V do 2V.

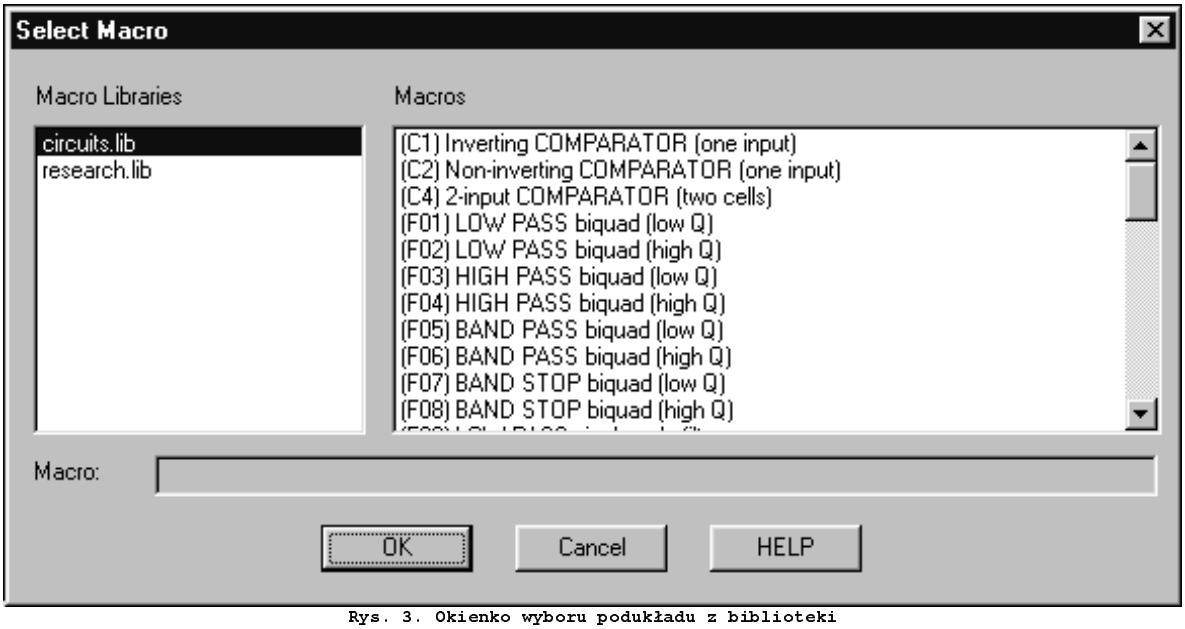
W celu zaprogramowania nowego układu należy:
- wybrać i rozmieścić podukłady;
- określić parametry podukładów;
- połączyć podukłady i wejścia/wyjścia przy pomocy "przewodów";
- przesłać projekt do układu scalonego;
- sprawdzić działanie układu.

[1] słowo *field* oznacza tutaj, że układ jest programowany poza fabryką - tj. u użytkownika



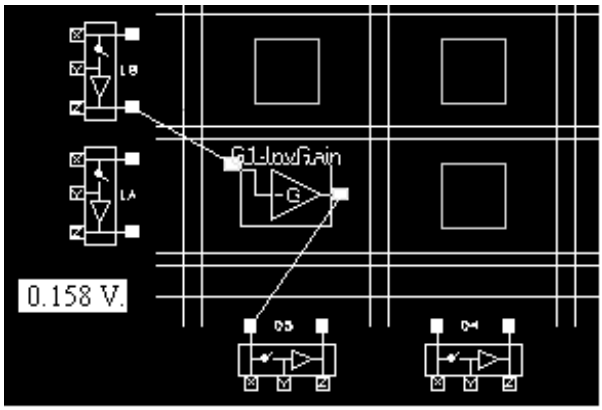
Rys. 2. Widok ekranu po włączeniu programu *EasyAnalog*

Aby wybrać podukład należy kliknąć myszką na symbolu , pojawi się wtedy okno wyboru podukładu (rys.3).



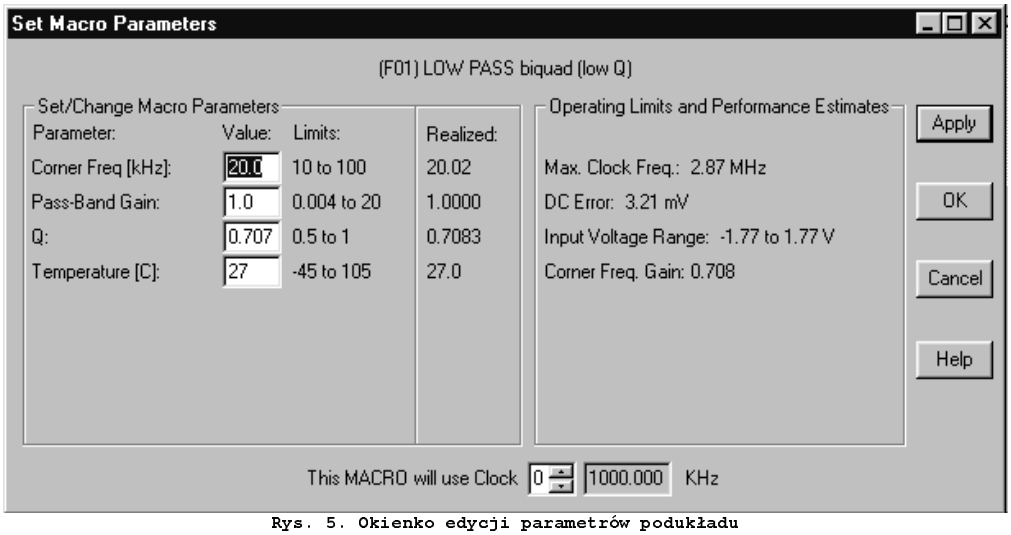
Rys. 3. Okienko wyboru podukładu z biblioteki

Wybrany podukład można rozmieszczać dowolną ilość razy ustawiając myszkę w żądanych strefach i naciskając lewy przycisk myszy. Przykładowo rozmieszczony układ wzmacniacza odwracającego w lewej dolnej strefie przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Przykładowe umiejscowienie podukładu

Aby przejść do trybu rysowania połączeń, należy nacisnąć przycisk "w" lub kliknąć lewym przyciskiem myszy na symbolu (kursor zmieni swój kształt). Naciskając i trzymając lewy przycisk myszy możemy łączyć końcówki podukładów z wejściami, wyjściami oraz z magistralami pionowymi i poziomymi (można także łączyć przewody pionowe z poziomymi w miejscu ich przecięcia). Jeśli połączenie jest możliwe, to dany element zmieni swój kolor, gdy znajdzie się pod kursorem. Niektóre połączenia mogą nie zostać zrealizowane, ze względu na brak kluczy, które już zostały wykorzystane np. do utworzenia podukładu.
W trybie rysowania połączeń możemy też dokonać edycji parametrów poszczególnych podukładów. Okienko zawierające parametry podukładu otwiera się po umieszczeniu kursora nad wybranym podukładem i naciśnięciu prawego przycisku myszki.



Rys. 5. Okienko edycji parametrów podukładu

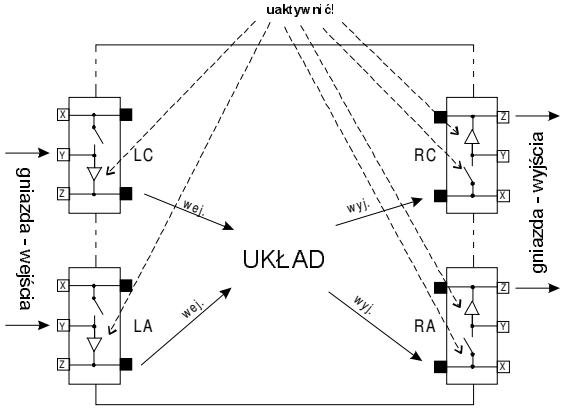
Standardowo po włączeniu programu wszystkie bufory rozmieszczone w blokach wejścia/wyjścia są wyłączone. Aby je uaktywnić należy w trybie rysowania kliknąć na wybranym buforze myszką. Bufor zmieni kolor na czerwony, co oznacza, że jest on aktywny. W podobny sposób można zmieniać ustawienie kluczy w blokach wejścia/wyjścia.

Jeśli chcemy usunąć połączenie lub cały podukład to należy przejść do trybu kasowania (nacisnąć).

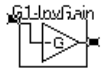
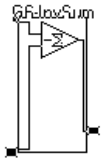
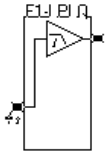
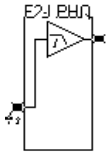
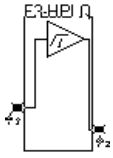
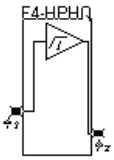
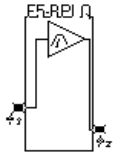
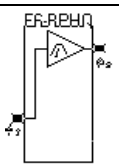
Po zakończeniu projektu możemy go zapisać na dysk (polecenie **File/Save**), a następnie przesłać do układu scalonego poleceniem **Configure/Write configuration data to Serial Port (Ctrl+W)**.

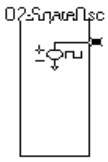
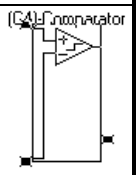
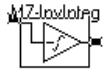
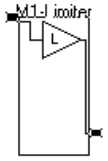
4. Opis podukładów

W ćwiczeniu będą wykorzystane podukłady przedstawione w tablicy 1.
Na zewnątrz wyprowadzone są następujące końcówki:
wejścia:
końcówka Y układu LA
końcówka Y układu LC
wyjścia:
końcówka Z układu RA
końcówka Z układu RC
Sygnały należy przeprowadzić poprzez bufory, stąd wewnątrz układu należy wykorzystać następujące końcówki:
wejścia:
końcówka Z układu LA
końcówka Z układu LC
wyjścia:
końcówka X układu RA
końcówka X układu RC
Uwaga: należy uaktywnić nastepujące elementy:
- w blokach LA i LC: bufory (bufory czerwone, klucze rozwarte);
- w blokach RA i RC: bufory oraz klucze (bufory czerwone, klucze zwarte).



Zestawienie parametrów podukładów — Tablica 1

Nazwa podukładu	Opis	Symbol
G1 Wzmacniacz odwracający (*Inverting Gain Stage*)	Wzmacniacz odwracający o wzmocnieniu: $\frac{V_{out}}{V_{in}} = -G$ (1) Wzmocnienie G można ustawiać (patrz przykład okienka z parametrami - rys.5) w zakresie od ok. 0.004 do 20 V/V.	
G4 Wzmacniacz odwracający /z kompensacją napięcia niezrównoważenia w jednej fazie/ (*Inverting Gain Stage /offset compensated in one phase/*)	Układ działa tak samo jak G1, z tym, że dodatkowo sygnał wyjściowy w fazie ϕ_2 sygnału zegarowego posiada kompensację napięcia niezrównoważenia. Zakres regulacji wzmocnienia G wynosi: 0.004-20.0V/V.	
G6 Wzmacniacz sumujący odwracający (*Inverting Sum Amplifier*)	Wzmacniacz sumujący na wejściu dwa sygnały, każdy z tych sygnałów jest skalowany przez współczynnik odpowiednio G1 i G2 zgodnie ze wzorem: $V_{out} = -G_1 V_{in1} - G_2 V_{in2}$ (2) Zakres regulacji wzmocnienia G_1 i G_2 wynosi: 0.004-20.0V/V.	
F1 Filtr bikwadratowy dolnoprzepustowy /mała dobroć/ (*Low Pass biquad /low Q/*)	Funkcja przenoszenia układu: $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{4\pi^2 f_0^2 G}{s^2 + \frac{2\pi f_0}{Q} s + 4\pi^2 f_0^2}$ (3) Częstotliwość graniczna f_0 określona jest jako taka częstotliwość, dla której wzmocnienie wynosi GQ[V/V], gdzie G jest wzmocnieniem w pasmie przepustowym a Q jest dobrocią filtru. Zakres ustawień: f_0: 8.0-100kHz; G: 0.004-20.0 V/V; Q: 0.5-1.0	
F2 Filtr bikwadratowy dolnoprzepustowy /duża dobroć/ (*Low Pass biquad /high Q/*)	Funkcja przenoszenia układu: $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{4\pi^2 f_0^2 G}{s^2 + \frac{2\pi f_0}{Q} s + 4\pi^2 f_0^2}$ (4) Częstotliwość graniczna f_0 określona jest jako taka częstotliwość, dla której wzmocnienie wynosi GQ[V/V], gdzie G jest wzmocnieniem w pasmie przepustowym a Q jest dobrocią filtru. Zakres ustawień: f_0: 10.0-100kHz; G: 0.004-20.0 V/V; Q: 1.0-20.0	
F3 Filtr bikwadratowy górno-przepustowy /mała dobroć/ (*High Pass biquad /low Q/*)	Funkcja przenoszenia układu: $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{Gs^2}{s^2 + \frac{2\pi f_0}{Q} s + 4\pi^2 f_0^2}$ (5) Częstotliwość graniczna f_0 określona jest jako taka częstotliwość, dla której wzmocnienie wynosi GQ[V/V], gdzie G jest wzmocnieniem w pasmie przepustowym a Q jest dobrocią filtru. Zakres ustawień: f_0: 8.0-100kHz; G: 0.004-20.0 V/V; Q: 0.5-1.0	
F4 Filtr bikwadratowy górno-przepustowy /duża dobroć/ (*High Pass biquad /high Q/*)	Funkcja przenoszenia układu: $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{Gs^2}{s^2 + \frac{2\pi f_0}{Q} s + 4\pi^2 f_0^2}$ (6) Częstotliwość graniczna f_0 określona jest jako taka częstotliwość, dla której wzmocnienie wynosi GQ[V/V], gdzie G jest wzmocnieniem w pasmie przepustowym a Q jest dobrocią filtru. Zakres ustawień: f_0: 8.0-100kHz; G: 0.004-20.0 V/V; Q: 1.0-20.0	
F5 Filtr bikwadratowy środkowo-przepustowy /mała dobroć/ (*Band Pass biquad /low Q/*)	Funkcja przenoszenia układu: $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{2\pi f_0 \frac{G}{Q} s}{s^2 + \frac{2\pi f_0}{Q} s + 4\pi^2 f_0^2}$ (7) Częstotliwość f_0 jest to częstotliwość środkowa filtru, G jest wzmocnieniem w paśmie przepustowym a Q jest dobrocią filtru. Zakres ustawień: f_0: 8.0-100kHz; G: 0.004-20.0 V/V; Q: 0.5-1.0	
F6 Filtr bikwadratowy środkowo-przepustowy /duża dobroć/ (*Band Pass biquad /high Q/*)	Funkcja przenoszenia układu: $\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{2\pi f_0 \frac{G}{Q} s}{s^2 + \frac{2\pi f_0}{Q} s + 4\pi^2 f_0^2}$ (8)	

	Częstotliwość f_0 jest to częstotliwość środkowa filtru, G jest wzmocnieniem w paśmie przepustowym a Q jest dobrocią filtru. Zakres ustawień: f_0: 4.0-100kHz; G: 0.004-20.0 V/V; Q: 1.0-20.0	
O2 Generator sygnału prostokątnego (*Square Wave Oscillator*)	Częstotliwość oscylacji: 0.98-250kHz	
C4 Komparator o dwóch wejściach (*2-Input Comparator*)	$V_{out} = \begin{cases} +2.5V \text{ dla } V_{in1} > V_{in2} \\ -2.5V \text{ dla } V_{in1} < V_{in2} \end{cases}$ (9)	
M6 Integrator	$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{0.2\pi f_c G}{s}$ (10) G jest to wzmocnienie dla częstotliwości równej 1/10 częstotliwości zegara (w ćwiczeniu częstotliwość zegara wynosi: f_{clk}=1MHz). Zakres regulacji G: 0.01 -20.0 V/V.	
M7 Integrator odwracający (*Inverting Integrator*)	$\frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = -\frac{0.2\pi f_c G}{s}$ (11) G jest to wzmocnienie dla częstotliwości równej 1/10 częstotliwości zegara (w ćwiczeniu częstotliwość zegara wynosi: f_{clk}=1MHz). Zakres regulacji G: 0.01 -20.0 V/V.	
M1 Ogranicznik (*Limiter*)	Napięcie wyjściowe będzie ograniczone w zakresie od $-GV_L$ do GV_L. V_L - napięcie ograniczające, może być ustawione w zakresie: 0.1-2.5V, G - wzmocnienie ogranicznika, zakres regulacji: 0.004-20.0 V/V	

5. Pomiary

a) Zaprogramować układ wzmacniacza zgodnie z tablicą 2. Pomierzyć wzmocnienie i pasmo wzmacniacza przy napięciu wejściowym równym $V_{INsk} = 0.3V / Gain$, gdzie *Gain* jest zadaną wartością wzmocnienia. Pomiar wykonać w rastrze częstotliwości 1, 2, 4, 8, 10 w zakresie od 400Hz do 400kHz.

Zadania pomiarowe - wzmacniacz — Tablica 2

Nr grupy	Nazwa podukładu	Zadane parametry
1	G1	Gain (wzmocnienie)= -0.25 V/V
2	G1	Gain (wzmocnienie)= -0.5 V/V
3	G1	Gain (wzmocnienie)= -1 V/V
4	G1	Gain (wzmocnienie)= -2 V/V
5	G1	Gain (wzmocnienie)= -4 V/V
6	G1	Gain (wzmocnienie)= -8 V/V
7	G4	Gain (wzmocnienie)= -0.25 V/V
8	G4	Gain (wzmocnienie)= -0.5 V/V
9	G4	Gain (wzmocnienie)= -1 V/V
10	G4	Gain (wzmocnienie)= -2 V/V
11	G4	Gain (wzmocnienie)= -4 V/V
12	G4	Gain (wzmocnienie)= -8 V/V

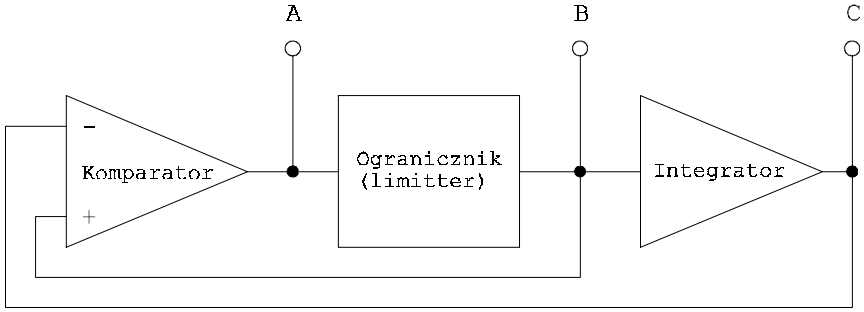
b) Zaprogramować układ filtru zgodnie z tablicą 3. Pomierzyć amplitudowe charakterystyki częstotliwościowe. Pomiar wykonać w rastrze częstotliwości 1, 2, 4, 8, 10 w zakresie od 400Hz do 400kHz. Należy znaleźć częstotliwości 3dB oraz ewentualne punkty charakterystyczne. Pomiar wykonać dla jednej wartości napięcia wejściowego wybranego z zakresu $V_{INsk} = 0.1V \div 1V$, w ten sposób aby nie przekroczyć dopuszczalnego poziomu szacowanego przez program *EasyAnalog*.

Zadania pomiarowe - filtr — Tablica 3

Nr grupy	Nazwa podukładu	Zadane parametry
1	F1, F3, F5	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 1 V/V, Corner freq.=10kHz, Q=0.707
2	F1, F3, F5	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 1 V/V, Corner freq.=20kHz, Q=0.707
3	F1, F3, F5	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 1 V/V, Corner freq.=40kHz, Q=0.707
4	F1, F3, F5	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 2 V/V, Corner freq.=10kHz, Q=0.707
5	F1, F3, F5	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 2 V/V, Corner freq.=20kHz, Q=0.707
6	F1, F3, F5	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 2 V/V, Corner freq.=40kHz, Q=0.707
7	F2, F4, F6	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 1 V/V, Corner freq.=10kHz, Q=3
8	F2, F4, F6	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 1 V/V, Corner freq.=20kHz, Q=3

9	F2, F4, F6	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 1 V/V, Corner freq.=40kHz, Q=3
10	F2, F4, F6	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 1 V/V, Corner freq.=10kHz, Q=10
11	F2, F4, F6	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 1 V/V, Corner freq.=20kHz, Q=10
12	F2, F4, F6	Pass-Band Gain (wzmocnienie)= 1 V/V, Corner freq.=40kHz, Q=10

c) Zaprojektować generator przebiegów prostokątnych i trójkątnych (o parametrach podanych w tablicy 4), w oparciu o schemat blokowy z rys. 6.



Rys. 6. Schemat blokowy generatora.

Zadania pomiarowe - generator 1 Tablica 4

Nr grupy	Zadane parametry
1	Amplituda przebiegów generowanych=1V, częstotliwość=10kHz
2	Amplituda przebiegów generowanych=2V, częstotliwość=10kHz
3	Amplituda przebiegów generowanych=3V, częstotliwość=10kHz
4	Amplituda przebiegów generowanych=4V, częstotliwość=10kHz
5	Amplituda przebiegów generowanych=1V, częstotliwość=20kHz
6	Amplituda przebiegów generowanych=2V, częstotliwość=20kHz
7	Amplituda przebiegów generowanych=3V, częstotliwość=20kHz
8	Amplituda przebiegów generowanych=4V, częstotliwość=20kHz
9	Amplituda przebiegów generowanych=1V, częstotliwość=40kHz
10	Amplituda przebiegów generowanych=2V, częstotliwość=40kHz
11	Amplituda przebiegów generowanych=3V, częstotliwość=40kHz
12	Amplituda przebiegów generowanych=4V, częstotliwość=40kHz

d) Zaprogramować dwa następujące układy:
(1)-generator przebiegów prostokątnych,
(2)-generator (1) którego wyjście doprowadzone jest do filtru dolnoprzepustowego.
Parametry poszczególnych bloków podane są w tablicy 5. Należy odrysować kształty przebiegów oraz zmierzyć zawartość harmonicznych sygnału prostokątnego oraz sygnału za filtrem dolnoprzepustowym.

Zadania pomiarowe - generator 2 Tablica 5

Nr grupy	Nazwa podukładu	Zadane parametry
1	O2, F1	Częstotliwość generatora=4kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=10kHz, Q=0.707
2	O2, F1	Częstotliwość generatora=8kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=10kHz, Q=0.707
3	O2, F1	Częstotliwość generatora=16kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=16kHz, Q=0.707
4	O2, F1	Częstotliwość generatora=16kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=20kHz, Q=0.707
5	O2, F1	Częstotliwość generatora=20kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=20kHz, Q=0.707
6	O2, F1	Częstotliwość generatora=25kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=20kHz, Q=0.707
7	O2, F2	Częstotliwość generatora=4kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=10kHz, Q=2
8	O2, F2	Częstotliwość generatora=8kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=10kHz, Q=2
9	O2, F2	Częstotliwość generatora=16kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=16kHz, Q=2
10	O2, F2	Częstotliwość generatora=16kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=20kHz, Q=4
11	O2, F2	Częstotliwość generatora=20kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=20kHz, Q=4
12	O2, F2	Częstotliwość generatora=25kHz, Pass-Band Gain=0.25V/V, Corner freq.=20kHz, Q=4

6. Opracowanie wyników

Dla poszczególnych punktów pomiarowych (a - d) należy:
a) Porównać parametry zaprogramowane z otrzymanymi z pomiarów.
b) Przedstawić wyniki pomiarów i obliczeń teoretycznych na wspólnych wykresach. Obie osie pionowa i pozioma powinny być w skali logarytmicznej (tzn. oś pionowa powinna być w skali logarytmicznej a wzmocnienie wyrażone w [V/V] lub w skali liniowej lecz wówczas wzmocnienie wyrażone w [dB]). Należy skomentować ewentualne rozbieżności.
c) Porównać i skomentować teoretyczne i pomierzone parametry zaprojektowanego generatora.
d) Porównać i skomentować teoretyczne i pomierzone wartości zawartości harmonicznych THD (ang. *Total Harmonic Distortion*).

7. Teoria

Ad. 5a) W tym punkcie nie wykonuje się obliczeń teoretycznych.
Ad. 5b) Amplitudowe charakterystyki częstotliwościowe można otrzymać poprzez wykreślenie modułu transmitancji przy podstawieniu $s = j\omega = j2\pi f$. Transmitancje poszczególnych sekcji oraz ich moduły przedstawione są w tablicy 6.

Transmitancje filtrów — Tablica 6

Typ sekcji	Transmitancja	Moduł transmitancji
Dolnoprzepustowa	$T_{LP}(s)=\dfrac{-4\pi^2 f_o^2 G}{s^2+\dfrac{2\pi f_o}{Q}s+4\pi^2 f_o^2}$ (12)	$\lvert T_{LP}(j\omega)\rvert=\dfrac{f_o^2 G}{\sqrt{\left(f_o^2-f^2\right)^2+\left(\dfrac{f_o}{Q}f\right)^2}}$ (13)
Pasmowa	$T_{BP}(s)=\dfrac{2\pi f_o \dfrac{G}{Q}s}{s^2+\dfrac{2\pi f_o}{Q}s+4\pi^2 f_o^2}$ (14)	$\lvert T_{BP}(j\omega)\rvert=\dfrac{G\dfrac{f_o}{Q}f}{\sqrt{\left(f_o^2-f^2\right)^2+\left(\dfrac{f_o}{Q}f\right)^2}}$ (15)
Górnoprzepustowa	$T_{HP}(s)=\dfrac{Gs^2}{s^2+\dfrac{2\pi f_o}{Q}s+4\pi^2 f_o^2}$ (16)	$\lvert T_{HP}(j\omega)\rvert=\dfrac{f^2 G}{\sqrt{\left(f_o^2-f^2\right)^2+\left(\dfrac{f_o}{Q}f\right)^2}}$ (17)

Gdzie: f_o jest częstotliwością charakterystyczną (*corner frequency*) Q-dobroć (*quality factor*), G- wzmocnienie dla pasma przepustowego (*gain*).

Ad. 5c) Przebiegi czasowe generatora z rys. 6 przedstawiono na rys. 7. Blok integratora, po scałkowaniu przebiegu prostokątnego (z węzła B) daje w wyniku przebieg trójkątny. Amplitudy przebiegów w węzłach B i C ustalane są poziomem ograniczania bloku ogranicznika. Amplituda napięcia w pkt. A jest ograniczona napięciem zasilającym (w naszym przypadku jest to 2.5V). Napięcie w pkt. C można określić z równania opisującego integrator:

$$v_c(t)=\frac{1}{\tau}\int_0^t v_B(t)\,dt+v_c(0)\,, \tag{18}$$

gdzie τ jest stałą czasową integratora, $v_c(0)$ jest napięciem początkowym (war. zerowy). Zakładając, że całkowanie odbywa się na przebiegu prostokątnym o amplitudzie V_B, czas (T/2) potrzebny na zmianę poziomu w węźle C, od wartości - V_B od + V_B (czyli połowa okresu) można określić z równania:

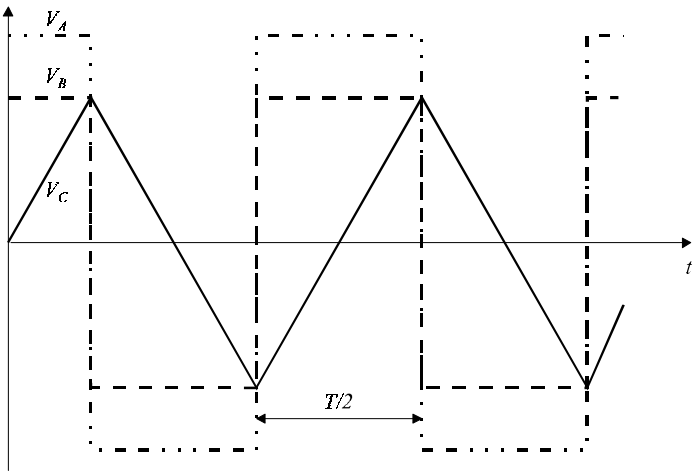
$$2V_B=\frac{1}{\tau}\frac{T}{2}V_B \tag{19}$$

Stąd, okres drgań generatora jest równy:

$$T=4\tau \tag{20}$$

W niniejszym ćwiczeniu nie programuje się bezpośrednio stałej czasowej integratora, lecz zamiennie można zaprogramować parametr $G_{0,1}$ będący wzmocnieniem dla częstotliwości 1/10 zegara (ang. *gain at fc/10*). Odwrotność stałej czasowej integratora jest równa pulsacji wzmocnienia jednostkowego, stąd $\tau=\dfrac{10}{2\pi f_C G_{0,1}}$. (21)

W ćwiczeniu częstotliwość zegara ustalona jest na 1MHz.



Rys. 7. Przebiegi napięć w węzłach A, B i C generatora z rys. 6.

Ad. 5d) Ta część ćwiczenia ma na celu przypomnienie definicji współczynnika zniekształceń nieliniowych oraz jego praktyczne pomiary i obliczenia dla niektórych sygnałów. Współczynnik ten nazywany jest także współczynnikiem zawartości harmonicznych (THD). Każdy ciągły sygnał okresowy $v(t)$ można przedstawić w postaci zespolonego szeregu Fouriera:

$$v(t)=\sum_{n=-\infty}^{+\infty}c_n e^{j\frac{n\pi t}{T/2}}\,,\ \text{gdzie}\ c_n=\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}v(t)e^{-j\frac{n\pi t}{T/2}}dt\ \text{dla}\ n=0,\pm1,\pm2,\ldots\,,\ \text{T - okres sygnału} \tag{22}$$

Ze względu na równość $c_n=c_{-n}^*$, szereg dwustronny można zastąpić następującym szeregiem jednostronnym

$$v(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{+\infty}\left[c_n e^{j\frac{n\pi t}{T/2}} + c_n^* e^{-j\frac{n\pi t}{T/2}}\right] = c_0 + \sum_{n}^{+\infty} C_n \cos(n2\pi t / T + \varphi_n) \quad , \tag{23}$$

gdzie $c_0 = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} v(t)dt$ i jest wartością średnią sygnału w jednym okresie, $C_n = 2|c_n|$, $\varphi_n = \arg(c_n)$. Ciąg współczynników C_n jest więc ciągiem amplitud składowych kolejnych harmonicznych sygnału *v(t)*.
Współczynnik THD jest definiowany jako:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} C_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{+\infty} C_n^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} C_n^2}/\sqrt{2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{+\infty} C_n^2}/\sqrt{2}} = \frac{V_{harm-sk}}{V_{sk}} \tag{24}$$

gdzie współczynniki C_n są kolejnymi amplitudami harmonicznych sygnału rozpatrywanego. Dzieląc licznik i mianownik pierwiastka przez $\sqrt{2}$ widać, że współczynnik THD jest w rzeczywistości stosunkiem wartości skutecznej harmonicznych od n=2 do ∞ w stosunku do wartości skutecznej sygnału.

W ćwiczeniu mierzona jest wartość THD dla sygnału prostokątnego oraz filtrowanego sygnału prostokątnego. Dla fali prostokątnej o amplitudzie V_A współczynniki C_n wyrażone są zależnością (można to sprawdzić wykorzystując powyższe zależności całkowe):

$$C_0 = 0 \ , \quad C_n = \frac{2V_A[1-(-1)^n]}{n\pi} \ . \tag{25}$$

Wartość skuteczna przebiegu prostokątnego jest równa jego amplitudzie stąd:

$$V_{sk} = V_A = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{+\infty} C_n^2}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{C_1^2 + \sum_{n=2}^{+\infty} C_N^2}}{\sqrt{2}} \ , \tag{26}$$

co po przekształceniach daje $\sum_{n=2}^{+\infty} C_N^2 = 2V_A^2 - C_1^2 = 2V_A^2\left[1 - \frac{8}{\pi^2}\right]$, (27)

tak więc współczynnik THD dla fali prostokątnej jest równy:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} C_n^2}/\sqrt{2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{+\infty} C_n^2}/\sqrt{2}} = \frac{V_{harm-sk}}{V_{sk}} = \frac{\sqrt{2V_A^2\left[1-\frac{8}{\pi^2}\right]}}{\sqrt{2}V_A} = \sqrt{1-\frac{8}{\pi^2}} = 43{,}52\% \tag{28}$$

Określenie THD dla sygnału wychodzącego z filtru dolnoprzepustowego należy wykonać w sposób przybliżony dla pierwszych 11-tu harmonicznych. Obliczenia należy wykonać wg tablicy 7.

Przykład tabeli do obliczeń THD **Tablica 7**

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
C_n / V_A											
$C_n / V_A * \lvert T_{LP}(j\omega)\rvert$											
$\left[C_n / V_A * \lvert T_{LP}(j\omega)\rvert\right]^2$											

Wartość modułu transmitancji $|T_{LP}(j\omega)|$ należy wyznaczyć korzystając ze wzoru z Tab. 6 podstawiając $f = nf_g$, gdzie f_g jest częstotliwością drgań generatora. Współczynnik THD należy przybliżyć wzorem (29).

$$THD \approx \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{11}\left[\frac{C_n}{V_A}|T(j\omega)|\right]^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{11}\left[\frac{C_n}{V_A}|T(j\omega)|\right]^2}} \tag{29}$$

Literatura:

[1] "*EasyAnalog*™ Design Software - User's Manual", Motorola Inc. 1997, USA.
[2] A. Guziński, „Linowe elektroniczne układy analogowe" WNT 1992.
[3] A. Filipkowski, „Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe", WNT 1978.