

Dariusz ZAŁĘSKI, Bogdan BARTOSIŃSKI, Romuald ZIELONKO

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI, KATEDRA OPTOELEKTRONIKI I SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH

Nowe zastosowania sygnałów komplementarnych o projektowanych kształtach do testowania elektronicznych systemów wbudowanych**Mgr inż. Dariusz ZAŁĘSKI**

Ukończył Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej w 2004 roku. Jest doktorantem w Katedrze Optoelektroniki i Systemów Elektronicznych, Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej. Główne zainteresowania dotyczą diagnostyki analogowych układów elektronicznych, w szczególności będących składowymi elektronicznych mieszanych-sygnałowo systemów wbudowanych.



e-mail: dzaleski@eti.pg.gda.pl

Prof. dr inż. Romuald ZIELONKO

Absolwent (1959) Wydziału Łączności Politechniki Gdańskiej. Profesor zwyczajny PG od 1990 r. Autor ponad 160 publikacji, 19 patentów i jednej książki z zakresu metrologii i diagnostyki elektronicznej. Promotor 10 doktorów. Kierownik Katedry Miernictwa Elektronicznego Politechniki Gdańskiej (1991–2007); wiceprzewodniczący Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej PAN; redaktor naczelny kwartalnika PAN „Metrology and Measurement Systems”.



e-mail: zielonko@eti.pg.gda.pl

Dr inż. Bogdan BARTOSIŃSKI

Ukończył studia na Wydziale Elektroniki Politechniki Gdańskiej w 1974 roku. W 1985 r. obronił pracę doktorską. Obecnie pracuje jako adiunkt w Katedrze Optoelektroniki i Systemów Elektronicznych. Autor ponad 40 publikacji z zakresu metrologii i diagnostyki elektronicznej. Zainteresowania naukowe to diagnostyka układów mieszanych sygnałowo, a w szczególności magistrale testujące.



e-mail: bbart@eti.pg.gda.pl

1. Wprowadzenie

W ostatnich latach obserwuje się szybki rozwój i wzrost zastosowań elektronicznych systemów wbudowanych (embedded systems) zawierających inteligentną jednostkę sterującą, zrealizowaną najczęściej w postaci mikrokontrolera. Dominującą klasę systemów wbudowanych stanowią obecnie systemy mieszane sygnałowo, bowiem informacje najczęściej są pozyskiwane za pomocą czujników analogowych, których sygnały są kondycjonowane i przenoszone w torach analogowych, a obróbka danych jest realizowana w układach cyfrowych. Efektywnym sposobem testowania systemów wbudowanych, obok wykorzystania magistrali testującej mieszanej sygnałowo IEEE 1149.4, jest wprowadzenie do ich struktury testerów wewnętrznych BIST (Built-in Self-Test), co dotychczas pociągało za sobą nadmiarowość układową, a w konsekwencji powiększało złożoność systemu i jego koszt.

Obecnie nowe generacje mikrokontrolerów (m.in. AT91SAM, PIC18F452) posiadają bogate zasoby układów peryferyjnych zamkniętych w jednym chipie scalonym (przetworniki A/C i C/A, dzielniki częstotliwości, liczniki, komparatory), z których można skonfigurować testery wbudowane BIST, bez dodatkowych układów. Możliwość tę wykorzystano do realizacji układu BIST opartego na zaproponowanych do testowania na przełomie lat 80 i 90-tych [1] sygnałach komplementarnych, które dotychczas nie były szerzej wykorzystywane z powodu trudności ich generacji wynikającej z ówczesnego stanu technologii. Opracowany układ BIST dla filtrów dolnoprzepustowych 2 i 4 rzędu przebadano symulacyjnie oraz zweryfikowano doświadczalnie.

2. Podstawy teoretyczne projektowania sygnałów komplementarnych

Istotą metody jest pobudzenie układu testowanego sygnałem o specjalnie zaprojektowanym kształcie, tzw. sygnałem komplementarnym, którego parametry są ściśle dopasowane do nominalnych położenia biegunów jego transmitancji [2, 3]. Sygnał komplementarny składa się z sekwencji $(n+1)$ impulsów o przemiennej polaryzacji, gdzie n jest liczbą biegunów. Pierwszy z impulsów wprowadza układ w określony stan przejściowy, natomiast następne powodują kompensację tego stanu tak, iż w momencie zakończenia ostatniego impulsu z sekwencji odpowiedź osiąga zero i pozostaje na tym poziomie.

Zerowa wartość odpowiedzi w momencie zakończenia pobudzenia oraz jej pozostawanie w zerze w określonym przedziale czasu po zakończeniu pobudzenia jest jednoznaczny

Streszczenie

W pracy przedstawiono koncepcję zastosowania sygnałów komplementarnych o projektowanych kształtach do testowania części analogowych elektronicznych systemów wbudowanych, za pomocą BISTów wykorzystujących ograniczone środki mikrokontrolera sterującego. Istotą metody jest pobudzenie układu testowanego sygnałem komplementarnym o specjalnie zaprojektowanym kształcie, którego parametry są dopasowane do nominalnych położenia biegunów transmitancji układu. Wyzerowanie sygnału odpowiedzi w określonym przedziale czasu po zakończeniu pobudzenia świadczy o sprawności układu. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych oraz weryfikacji praktycznej metody na przykładzie dolnoprzepustowego filtru 2 i 4 rzędu.

Słowa kluczowe: testowanie, elektroniczne systemy wbudowane, sygnały komplementarne, projektowanie kształtu sygnału, mikrokontrolery.

The new application of shape-designed complementary signals for diagnostic of electronic embedded systems**Abstract**

The article presents the idea of using the shape-designed complementary signals for testing analog parts of electronic mixed-signal embedded systems employing limited resources of microcontroller that controls the system. The essence of the proposed method is stimulation of Circuit Under Test (CUT) with particular shape-designed complementary signal which parameters are matched to the nominal position of circuit transmittance poles. Vanishing the CUT response in time and after the moment of finishing the stimulation indicates absence of faults. The paper presents results of simulation researches and practical verification of the method on examples of 2nd and 4th order low-pass filters.

Keywords: testing, electronic embedded systems, complementary signals, shape design of signals, microcontrollers.

dowodem prawidłowego położenia biegunów układu i poprawności jego parametrów (charakterystyki częstotliwościowej). Jeżeli układ testowany na skutek uszkodzenia posiada bieguny różne od nominalnych, jego odpowiedź po zakończeniu pobudzenia będzie różna od zera.

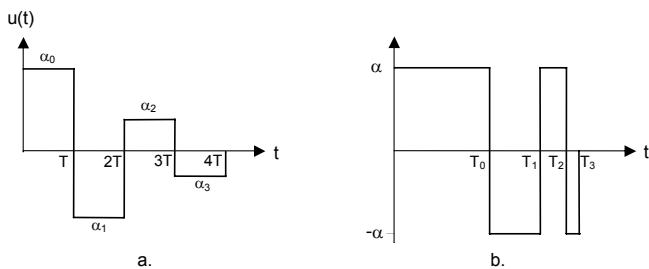
W celu wyprowadzenia zależności pomiędzy położeniami biegunów transmitancji i parametrami sygnału komplementarnego wykorzystujemy możliwość sprowadzenia liniowego układu dynamicznego do stanu zerowego, w zadanym czasie $t=t_f$, za pomocą odpowiednio dobranego pobudzenia. Pobudzenie takie jest nazywane sygnałem dopasowanym lub komplementarnym.

W ogólnym przypadku sygnał komplementarny można opisać wyrażeniem:

$$u_n(t) = \alpha_0 E(t) - \alpha_1 E(t - T_0) + \dots + (-1)^n \alpha_n E(t - T_{n-1}), \quad (1)$$

gdzie: $E(t - T_i)$, $i=0, 1, \dots, n$ – pewna funkcja dana w przedziale $[T_i, T_{i+1}]$ i zerowa na zewnątrz, α_i , T_i – amplitudowe i czasowe parametry sygnału, n – liczba biegunów, rząd sygnału.

Z przyczyn analitycznych, a także technicznych, rozważa się tylko sygnały α_T -parametrowe (stało-okresowe) lub T_T -parametrowe (stało-amplitudowe). Posiadają one postać sekwencji impulsów z przemienną polaryzacją o kształcie opisanym przez funkcję $E(t)$ (np. stała, typu "ramp", wielomianowa). Przykłady obu rodzajów sygnałów 3 rzędu są pokazane na rys. 1.



Rys. 1. Sygnały komplementarne 3 rzędu (a) α_T -parametrowe (stały czas trwania impulsów) i (b) T_T -parametrowe (stała amplituda).

Fig. 1. Third order complementary signals (a) α_T -parameters (constant width) and (b) T_T -parameters (constant-amplitude).

Sygnał komplementarny, pobudzając badany układ, powinien wyzerować jego odpowiedź po zakończeniu ostatniego z impulsów. Kryterium to jest podstawą do wyznaczenia zależności między biegunami testowanego układu, a parametrami sygnału. Odpowiedź układu wyznacza się metodą przestrzeni stanów, przy ograniczeniu rozważań do układów liniowych, stacjonarnych o jednym wejściu i jednym wyjściu o transmitancji operatorowej

$$G(s) = \frac{b^m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad (2)$$

gdzie: n - liczba biegunów, m - liczba zer, $n > m$,

których charakterystyki częstotliwościowe są zdeterminowane przez bieguny ich transmitancji. Do klasy tej należą układy dolnoprzepustowe i środkowoprzepustowe, nie posiadające zer transmitancji różnych od zera, których transmitancje mają postać wymienionych niżej czynników lub ich iloczynów:

$$\frac{1}{s + \omega_n}, \quad \frac{\omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2}, \quad \frac{\frac{\omega_n}{Q}s}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2}. \quad (3)$$

Jest to szeroka klasa układów, do których należy wiele środkowo- i dolnoprzepustowych filtrów aktywnych RC, środkowoprzepustowe filtry LC. Układy takie można opisać [3] w przestrzeni stanów układem równań:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu, \\ y &= Cx, \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie: x - wektor stanu, y - odpowiedź układu, A - macierz układu, B - macierz wymuszeń, C - macierz odpowiedzi.

Wektor stanu $x(t)$ będący rozwiązaniem równania (4) można wyrazić za pomocą pobudzenia $u(t)$ i macierzy podstawowej układu e^{At} w następujący sposób:

$$x(t) = e^{A(t-t_0)} x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau. \quad (5)$$

W momencie zakończenia pobudzenia t_f odpowiedź układu jest dana wyrażeniem

$$y(t_f) = Cx(t_f). \quad (6)$$

Warunkiem zanikania odpowiedzi układu dla czasu $t \geq t_f$ jest zerowa wartość wektora stanu $x(t_f)$. Przyrównując do zera wyrażenie (5) i zakładając zerowe warunki początkowe $x(t_0=0)=0$ oraz że macierz A jest nieosobliwa, otrzymamy dla sygnałów α_T -parametrowych następujące związki pomiędzy parametrami sygnału komplementarnego, a położeniami biegunów:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= -\sum_{i=1}^n \exp(s_i T), \\ &\vdots \\ \alpha_n &= (-1)^n \exp\left[\sum_{i=1}^n \exp(s_i T)\right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Związki te są wykorzystane jako wzory obliczeniowe do projektowania parametrów sygnałów α_T -parametrowych do nominalnego położenia biegunów układu testowanego.

Wadą sygnałów α_T -parametrowych, z punktu widzenia techniki ich generacji, jest konieczność użycia do generacji przetwornika cyfrowo analogowego o dużej rozdzielczości i szybkości działania. Wady tej nie posiadają sygnały T_T -parametrowe (rys. 1b) o stałych poziomach i programowanych czasach trwania impulsów. Dla sygnałów tych wyprowadzono, metodami przestrzeni stanów, następujące związki między parametrami sygnału T_k , a nominalnymi położeniami biegunów:

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^{n-1} 2(-1)^k e^{-s_k T_k} + (-1)^n e^{-s_n T_n} - 1 &= 0, \\ &\vdots \\ \sum_{k=0}^{n-1} 2(-1)^k e^{-s_k T_k} + (-1)^n e^{-s_n T_n} - 1 &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Tworzą one układ n równań nieliniowych z n niewiadomymi T_k , którymi są czasy zakończenia poszczególnych impulsów. Wartości T_k ($k=1, 2, \dots, n$) są uzależnione od nominalnych położen biegunów s_i , jak również od doboru czasu trwania pierwszego impulsu T_0 .

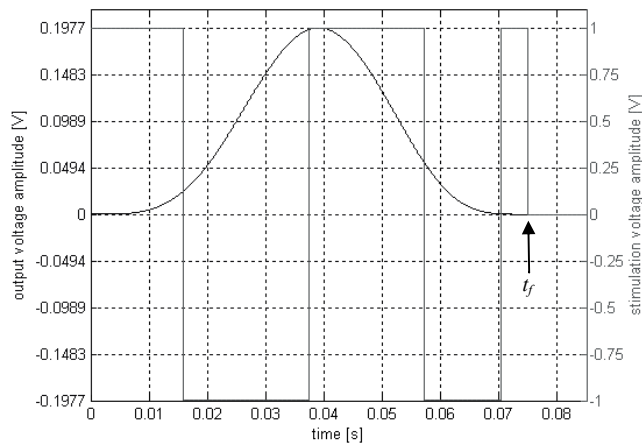
Równań (8) nie można rozwiązać analitycznie i otrzymać w ten sposób wygodnych w użyciu wzorów projektowych na obliczanie sygnału komplementarnego. Parametry T_k należy obliczać bezpośrednio z równań (8) metodami numerycznymi.

Dla ułatwienia procesu projektowania sygnałów komplementarnych, zarówno α_T -parametrowych jak i T_T -parametrowych, opracowano program komputerowy w środowisku Matlab umożliwiający obliczanie parametrów α_T z zależności (7) oraz wyznaczanie parametrów T_k drogą rozwiązania układu równań nieliniowych (8).

3. Badania symulacyjne sygnałów

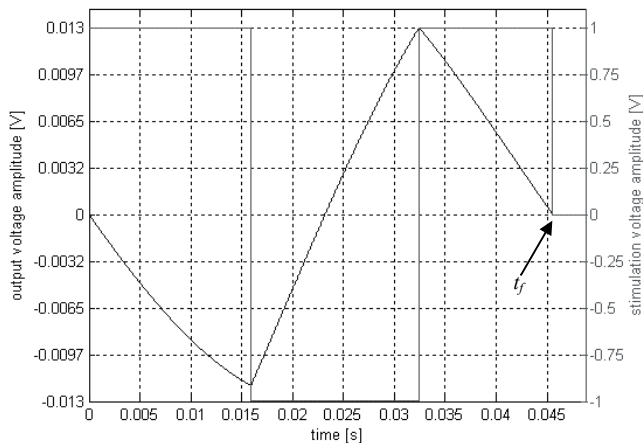
Ze względu na łatwość generacji oraz brak przetwornika C/A w używanym do badań mikrokontrolerze ATmega16 [4] obiektem dalszych zainteresowań były sygnały T_r -parametrowe. Dla tych sygnałów przebadano symulacyjnie ich właściwości metrologiczne. Wyznaczanie parametrów sygnałów oraz badanie ich właściwości metrologicznych przeprowadzono w środowisku Matlab.

Przykłady odpowiedzi na pobudzenie T_r -parametrowym sygnałem komplementarnym filtra dolnoprzepustowego 4 rzędu oraz filtra środkowoprzepustowego 2 rzędu przedstawiono odpowiednio na rys. 2 i rys. 3.



Rys. 2. Odpowiedź dolnoprzepustowego filtra Butterwortha 4 rzędu na pobudzenie dopasowanym sygnałem T_r -parametrowym.

Fig. 2. The response of 4th order Butterworth low-pass filter to matched T_r -parameter complementary signal.

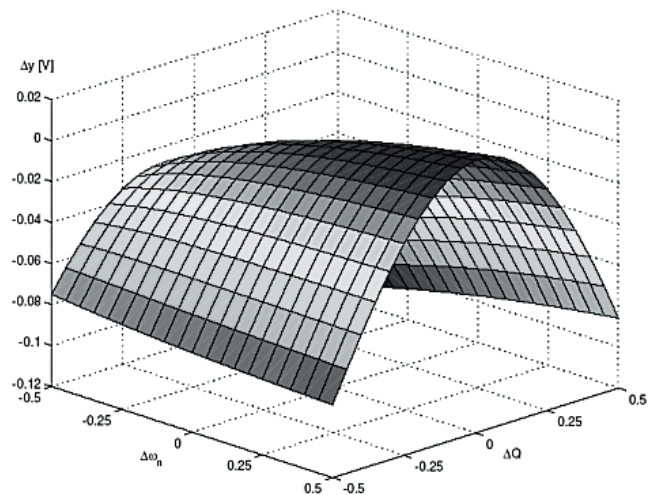


Rys. 3. Odpowiedź filtra środkowoprzepustowego 2 rzędu na pobudzenie dopasowanym sygnałem T_r -parametrowym.

Fig. 3. The response of 2nd order band-pass filter to matched T_r -parameter complementary signal.

Jak widać na rys. 2 i 3 w momencie zakończenia pobudzenia t_f w obu przypadkach odpowiedź układu osiąga zero i pozostaje na tym poziomie.

Dla układów, dla których położenie biegunów transmitancji różni się od nominalnego, odpowiedź na dopasowany sygnał komplementarny w momencie czasu t_f jest różna od zera. Przykład zależności odpowiedzi od zmian dobroci i pulsacji charakterystycznej filtra środkowoprzepustowego o $Q=4$ i $\omega_n=68.3$ rad/s pobudzonego sygnałem komplementarnym o amplitudzie 1 V przedstawia rys. 4.

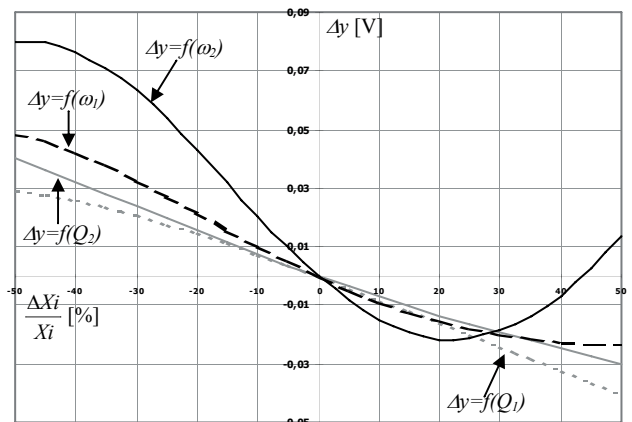


Rys. 4. Odpowiedź filtra środkowoprzepustowego 2 rzędu na pobudzenie sygnałem T_r -parametrowym w funkcji zmian ω_n i Q .

Fig. 4. Response of 2nd order band-pass filter to T_r -parameter complementary signal as a function of ω_n and Q .

Jak widać, zmiany pulsacji środkowej filtra ω_n o $\pm 50\%$ powodują zmiany odpowiedzi w zakresie $0 \div -97$ mV, natomiast zmiany dobroci Q w tym samym zakresie dają zmiany odpowiedzi w zakresie $0 \div -31$ mV. Widoczny jest wyraźnie większy wpływ zmian pulsacji charakterystycznej na zmiany odpowiedzi w porównaniu do zmian dobroci.

Zależność odpowiedzi od zmian pulsacji charakterystycznych ω_1 , ω_2 , oraz dobroci Q_1 , Q_2 dla dolnoprzepustowego filtra 4 rzędu o $\omega_n=68.3$ rad/s przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Odpowiedź dolnoprzepustowego filtra Butterwortha 4 rzędu na pobudzenie sygnałem T_r -parametrowym w funkcji zmian pulsacji charakterystycznych ω_1 , ω_2 , oraz dobroci Q_1 , Q_2 .

Fig. 5. The response of 2nd order band-pass filter to T_r -parameter complementary signal as a function of Q and ω_n .

Dla tego przypadku zmiany pulsacji charakterystycznych poszczególnych sekcji filtra o $\pm 50\%$ dają zmiany odpowiedzi w zakresie $-20 \div +80$ mV, natomiast dla dobroci analogiczne wartości są w zakresie ± 40 mV.

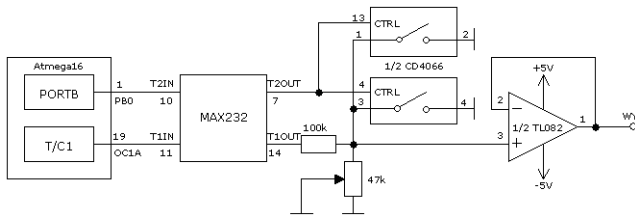
Przeprowadzone badania symulacyjne pokazały, że zmiany odpowiedzi układu są wystarczająco duże, aby wykrywać uszkodzenia powodujące zmiany częstotliwości środkowej oraz dobroci filtra na poziomie pojedynczych procentów.

Należy podkreślić, że parametry sygnału komplementarnego zależą od nominalnego położenia biegunów oraz od doboru czasu trwania pierwszego impulsu T_0 dla sygnałów T_r -parametrowych. Właściwy dobór tych czasów jest bardzo istotny z punktu widzenia odpowiedniej wrażliwości zmian odpowiedzi na zmiany położenia biegunów.

4. Weryfikacja doświadczalna metody

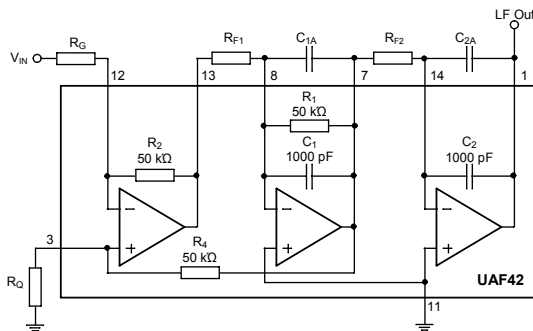
Weryfikację doświadczalną metody bazującej na T_i -parametrycznych sygnałach komplementarnych przeprowadzono w eksperymentalnym systemie wbudowanym, który zrealizowano z wykorzystaniem mikrokontrolera ATmega16 firmy Atmel.

Schemat blokowy generatora sygnałów T_i -parametrycznych jest przedstawiony na rys. 6. Do precyzyjnego odmierzenia czasu kolejnych impulsów sygnału użyto 16-bitowego licznika Timer1 pracującego w trybie CTC. Do konwersji poziomów TTL na symetryczny sygnał bipolarny wykorzystano układ MAX232. Poziom zerowy sygnał komplementarnego wymuszają dwa równoległe połączone klucze analogowe CD4066 sterowane z wyprowadzenia PB0 portu B mikrokontrolera.



Rys. 6. Schemat blokowy układu do praktycznej weryfikacji metody.
Fig. 6. Block diagram of circuit for practical verification of the method.

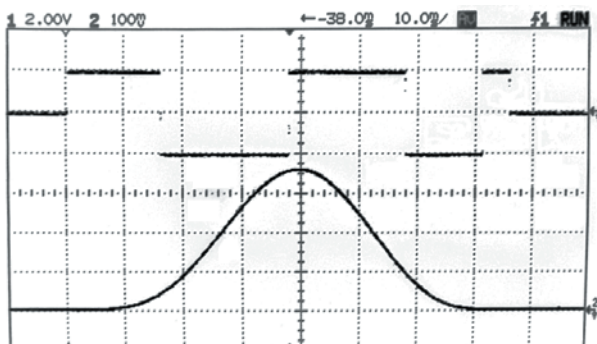
Obiektem badań był dolnoprzepustowy filtr Butterwortha 4 rzędu zrealizowany z wykorzystaniem dwóch układów UAF42 (rys. 7) firmy Burr-Brown [5]. Układ UAF42 jest uniwersalnym



Rys. 7. Schemat aplikacyjny układu UAF42 dla filtra dolnoprzepustowego.
Fig. 7. The application diagram of UAF42 for low-pass filter.

scalonym filtrem aktywnym posiadającym jedną sekcję bikwadratową i umożliwiającą realizację filtra dolno-, środkowo- i górnoprzepustowego. Zaletą filtrów zbudowanych na układach UAF42 jest możliwość niezależnej zmiany dobroci i częstotliwości przy pomocy zewnętrznych rezystorów.

Na rys. 8 zamieszczono oscylogram odpowiedzi filtra dolnoprzepustowego 4 rzędu na T_i -parametryczny sygnał komplementarny dla nominalnego położenia biegunów.



Rys. 8. Odpowiedź filtra dolnoprzepustowego 4 rzędu na sygnał dopasowany.
Fig. 8. The response of 4th order low-pass filter to matched stimulus signal.

Wartości elementów filtra dla poszczególnych sekcji są następujące: $RF_{11}=RF_{12}=15.115 \text{ k}\Omega$, $RF_{21}=RF_{22}=14.833 \text{ k}\Omega$, $C_{1A}=C_{2A}=1.052 \text{ }\mu\text{F}$, $C_{1B}=C_{2B}=1.073 \text{ }\mu\text{F}$, $R_{G1}=52.22 \text{ k}\Omega$, $R_{G2}=51.84 \text{ k}\Omega$, $R_{Q1}=83.05 \text{ k}\Omega$, $R_{Q2}=17.4 \text{ k}\Omega$.

Weryfikację przeprowadzono dla dolnoprzepustowych filtrów 2 i 4 rzędu Butterwortha. Pomiary napięć na wyjściu filtrów dokonano oscyloskopem cyfrowym, natomiast docelowo napięcia te będą mierzone za pomocą przetwornika A/C zawartego w mikrokontrolerze ATmega16.

Przykładowe wyniki dla zmian pulsacji charakterystycznej ω_n dla filtra 2 rzędu oraz zmiany dobroci Q_2 jednej z sekcji filtra 4 rzędu zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki praktycznej weryfikacji.
Tab. 1. Results of practical verification.

$\Delta\omega_n/\omega_n$ [%]	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
ΔV_{teor} [mV]	-86	-79	-61	-34	0	39	83	128	172
ΔV_{pom} [mV]	-81	-72	-56	-33	0	38	83	126	166
$\Delta Q_2/Q_2$ [%]	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40
ΔV_{teor} [mV]	32	24	15	7.5	0	-7	-13	-19	-25
ΔV_{pom} [mV]	31	22	14	7.2	0.75	-6.5	-13	-20	26

Przedstawione wyniki wykazują zgodność między wartościami teoretycznymi a wartościami uzyskanymi z pomiarów. Występujące różnice są spowodowane przede wszystkim:

- niedoskonałą symetrią napięć wyjściowych układu MAX232,
- tolerancjami rezystorów wewnątrz układu UAF42,
- niezerową rezystancją kluczy analogowych CD4066 w stanie zwarcia,
- skończoną dokładnością czasu generowanych impulsów.

5. Podsumowanie

Przedstawiona metoda diagnostyki układów analogowych z wykorzystaniem sygnałów komplementarnych może być wykorzystana w testerach BIST w mieszanych sygnałowo elektronicznych systemach wbudowanych sterowanych mikrokontrolerem. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość wykorzystania wyłącznie zasobów sprzętowych i programowych mikrokontrolera.

Ograniczeniem metody jest klasa testowanych układów, których charakterystyki częstotliwościowe zdeterminowane są jedynie przez położenie biegunów transmitancji. Metoda jest predysponowana do diagnostyki układów analogowych w zakresie niskich i bardzo niskich częstotliwości, gdzie w porównaniu z innymi metodami zapewnia krótki czas testowania.

Przedmiotem dalszych badań będzie wykorzystanie innych mikrokontrolerów wyposażonych również w przetwornik C/A, co pozwoli na diagnostykę z wykorzystaniem sygnałów α_i -parametrycznych.

6. Literatura

- [1] Bartosiński B., Zielonko R.: New classes of complementary signals. *Electronic Letters*, 1987, Vol. 23, No. 9, s. 433-434.
- [2] B. Bartosiński, Metoda testowania liniowych układów elektronicznych przy pomocy T_i -parametrycznych sygnałów komplementarnych, *Metrologia i Systemy Pomiarowe* 16, 1993, s. 389-396
- [3] Schreiner H.: Fault dictionary based upon stimulus design. *IEEE Transaction on Circuits and Systems*, Vol. Cas-26, No. 7, July 1979, pp. 529-537.
- [4] Atmel: ATmega16 Data Sheet, plik PDF, www.atmel.com.
- [5] Burr-Brown: The UAF42 universal active filter – Application Bulletin, plik PDF, www.burr-brown.com.

Artykuł recenzowany