

Pomiar parametrów filtrów elektronicznych typu MEMS z automatycznym wyznaczaniem niepewności

Natalia Wasilewska

Instytut Kolejnictwa, Laboratorium Metrologii, ul. Chłopskiego 50, 04-275 Warszawa

Paweł Nowak

Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

Roman Szewczyk

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP, Al. Jerozolimskie 202, 02-486 Warszawa

Streszczenie: Stosowane w praktyce filtry elektroniczne typu MEMS wymagają eksperymentalnego badania charakterystyk amplitudowych i fazowych. Wymaga to opracowania metody pomiarowej, która nie tylko zapewni pomiar charakterystyk, lecz umożliwi równoczesne oszacowanie niepewności tego pomiaru. Opisany sterowany komputerowo system pomiarowy umożliwia pomiary charakterystyk filtrów z zachowaniem spójności pomiarowej przy uwzględnieniu w pełni zautomatyzowanego procesu szacowania niepewności pomiaru. Testy przeprowadzone w trakcie badania charakterystyki przykładowego filtra magnetostrykcyjnego potwierdziły zarówno poprawność zaproponowanego rozwiązania, jak i jego możliwość zastosowania w praktyce.

Słowa kluczowe: filtry MEMS, niepewność pomiarowa, filtr Czebyszewa

1. Wprowadzenie

Filtry elektroniczne są powszechnie stosowanymi układami, których zadaniem jest wycięcie sygnału napięciowego lub jego przepuszczenie przy określonych częstotliwościach. Są wykorzystywane w praktycznie każdej branży elektronicznej [5]. Wycięcia nieoczekiwane zakłócenia z równoległe działających przyrządów. Przykładem może tu być stabilizator napięcia sieciowego, który zawiera zestaw filtrów mających za zadanie wycinanie szumów z sieci elektrycznej [6]. Takie zakłócenia potrafią zaburzyć dokładne pomiary lub, w skrajnych przypadkach, uszkodzić urządzenia. Innym bardzo częstym zastosowaniem jest odseparowanie wybranej częstotliwości od całego spektrum sygnału. Na tym swoje działanie opierają odbiorniki radiowe [3], w tym GSM, LTE i Wi-Fi. Filtry elektroniczne coraz częściej są wykorzystywane w przyrządach, w których bardzo ważna jest duża dokładność takich jak urządzenia medyczne, dokładne przyrządy pomiarowe np. nanowoltomierze, przemysł kosmiczny, komunikacja radiowa, specjalistyczne zasilacze. Wynika z tego konieczność przeprowadzenia wzorcowania tych układów z dużą dokładnością.

Autor korespondujący:

Natalia Wasilewska, nwasilewska@ikolej.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 07.06.2022 r., przyjęty do druku 20.09.2022 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0

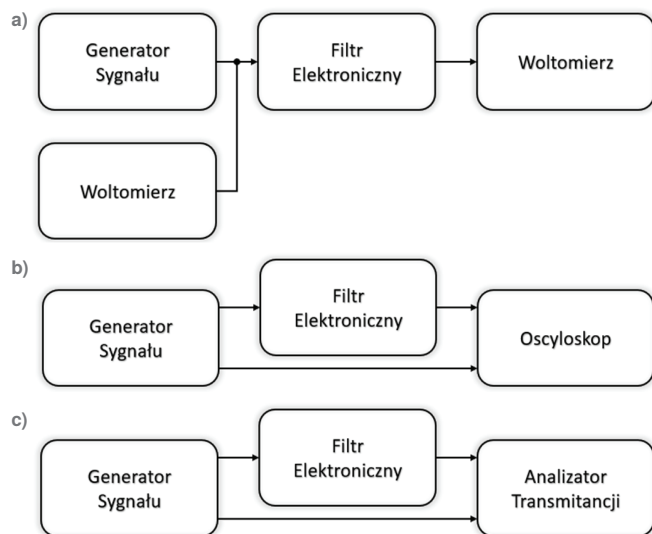
Szczególną klasą filtrów elektronicznych są zaawansowane filtry MEMS, w których proces filtracji sygnału elektronicznego następuje z wykorzystaniem zjawisk elektromechanicznych lub magneto mechanicznych. W przypadku tego typu filtrów teoretyczne wyznaczenie wartości parametrów filtru jest procesem złożonym i obciążonym znaczną niepewnością. Dlatego, w odniesieniu do stosowanych w praktyce filtrów elektronicznych typu MEMS, kluczowe znaczenie ma opracowanie metody pomiarowej, która nie tylko zapewni pomiar charakterystyk, lecz umożliwi równoczesne oszacowanie niepewności tego pomiaru.

Na rynku istnieją gotowe rozwiązania urządzeń do pomiarów charakterystyk filtrów. Większość z nich można sprowadzić do dwóch kategorii: pomiary szybkie i niedokładne lub pomiary dokładne, ale czasochłonne i pracochłonne.

Istnieje kilka rodzajów klasyfikacji filtrów [2]. Najpopularniejszym jest ich dzielenie ze względu na pasmo przepustowe. Pasma przepustowe lub pasmo przenoszenia filtru to część pasma częstotliwości, która jest przepuszczana przez filtr, a wycięta część spektrum nazywamy pasmem zaporowym. Inaczej pasmo przepustowe definiuje się, jako przedział częstotliwości, przy których wzmocnienie nie jest mniejsze niż 3 dB od maksymalnego. Częstotliwość, przy której spadek maksymalnego wzmocnienia wyniesie 3 dB to częstotliwość graniczna. Wzmocnieniem filtru jest to stosunek napięcia wyjściowego do wejściowego. Najczęściej wyrażany jest w decybelach [9].

$$K = 20 \log \left(\frac{U_{wy}}{U_{we}} \right) \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

przy czym: U_{wy} to amplituda napięcia wyjściowego, zaś U_{we} amplituda napięcia wejściowego.



Rys. 1. Możliwe warianty stanowisk do badań charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej z wykorzystaniem a) multimetru, b) oscyloskopu, c) analizatora transmitancji

Fig. 1. Possible variants of stands for testing the amplitude-frequency characteristics with the use of a) a multimeter, b) an oscilloscope, c) a transmission analyzer

W filtrach środkowoprzepustowych i środkowozaporowych wyróżniana jest *częstotliwość środkowa (przepustowa lub zaporowa)*. Jest to środkowa częstotliwość znajdująca się pomiędzy częstotliwościami granicznymi obliczana ze wzoru:

$$f_o = f_{gd} + \frac{f_{gg} - f_{gd}}{2} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

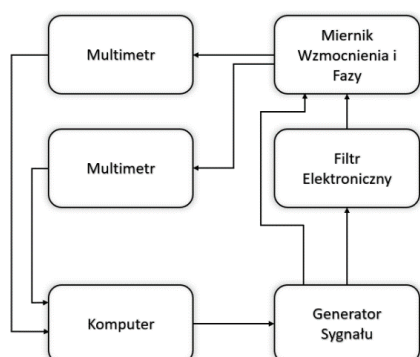
przy czym: f_{gd} to częstotliwość graniczna dolna (bliższa zera), zaś f_{gg} to częstotliwość graniczna górna (bliższa nieskończoności).

Przesunięcie fazowe to różnica w fazie sygnału wprowadzana przez filtr ze względu na np. opóźnienia wzmacniacza czy czas ładowania się kondensatorów. Zależnie od przypadku może być uznawana za zjawisko pozytywne lub negatywne.

W artykule przedstawiono projekt stanowiska wykazującego lepsze możliwości pomiarowe oraz dokładność niż dostępne rozwiązania rynkowe, oraz umożliwiającego szeroką automatyzację procesu pomiarowego.

2. Istniejące rozwiązania pomiarowe

W przypadku badań filtrów elektronicznych podstawowym pomiarem jest wyznaczenie charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej [5]. Jest to wykres zależności wzmocnienia od częstotliwości pomiarowej. Na jego podstawie można obliczyć podstawowe parametry filtru elektronicznego.



Rys. 2. Schemat blokowy zaproponowanego stanowiska pomiarowego

Fig. 2. Block diagram of the proposed measuring station

By uzyskać pełną informację o właściwościach filtru należy wykreślić również charakterystykę przesunięcia fazowego w zależności od częstotliwości. Pomiary te zwykle są bardziej problematyczne ze względu na ograniczenia sprzętowe.

Najprostszy koncepcyjnie i sprzętowo sposobem wykonania stanowiska dostępnym dla większości laboratoriów elektrycznych jest wykorzystanie woltomierzy. Wymaga jedynie wykorzystania źródła sygnału napięcia zmiennego o nastawianej częstotliwości i dwóch mierników. Napięcie na źródle jest na bieżąco mierzone woltomierzem wzorcowym. Można te dwa urządzenia zastąpić przez zastosowanie kalibratora wzorcowego. Sygnał po przejściu przez filtr mierzony jest drugim woltomierzem. Przy takim pomiarze zalecane jest dziesięciokrotnie wykonanie pomiaru napięcia na wejściowego i napięcia wyjściowego badanego filtru [10].

Po zebraniu danych obliczane jest wzmocnienie i wykreślana jego charakterystyka. Dużą wadą tego rozwiązania, obok jego żmudności, jest brak możliwości pomiaru charakterystyki fazowej. Dodatkowo większość woltomierzy nie jest w stanie mierzyć napięcia przy wysokich częstotliwościach – ich pasmo kończy się najczęściej na około 100–200 kHz.

Znaczne ulepszenie względem powyższego stanowiska można uzyskać z wykorzystaniem oscyloskopu, jako przyrządu pomiarowego. Wyklucza on używanie woltomierza wzorcowego, ponieważ oscyloskop będzie mierzył na dwóch kanałach jednocześnie sygnał wejściowy i wyjściowy filtru. Takie zestawienie pozwala na jednoczesny pomiar napięcia obu sygnałów, które zostaną wykorzystane do obliczenia wzmocnienia, oraz do pomiaru przesunięcia fazowego. Wadą takiego układu pomiarowego jest niedokładność pomiarowa oscyloskopu, zwłaszcza przy pomiarach przesunięcia fazowego.

Wszystkie problemy poprzednio opisanego stanowiska można rozwiązać przez zastosowanie analizatora transmitancji. Przyrząd ten mierzy wyłącznie sygnał przy częstotliwości wzorcowej doprowadzanej do niego. W tym przypadku jest to sygnał wejściowy filtra. Analizator mierzy sygnał z dokładnością taką samą jak woltomierz, podając od razu wyniki wzmocnienia i przesunięcia fazowego między sygnałami. Wadą rozwiązania jest jego niska dokładność.

3. Opis stanowiska pomiarowego

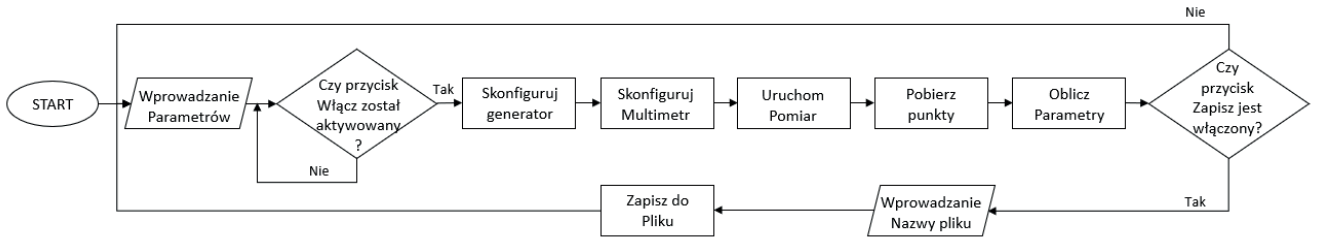
Zaprojektowane stanowisko pomiarowe jest całkowicie obsługiwane przez dedykowane oprogramowanie. Użytkownik kontroluje parametry pomiaru, takie jak badany zakres częstotliwości, czas pomiaru, oraz napięcie pomiarowe, oraz odczytuje na bieżąco wyniki pomiaru za pomocą odpowiednich wykresów oraz aktualne wskazania przyrządów pomiarowych.

Program obsługujący stanowisko został stworzony w graficznym środowisku programistycznym LabVIEW, w którym jest stosowany język programowania G. Programowanie polega na łączeniu ze sobą bloków funkcyjnych odpowiadających różnym funkcjom [8].

W trakcie pomiaru sygnał jest zadawany z generatora wedle zadanych parametrów. Sygnał doprowadzany jest bezpośrednio do miernika wzmocnienia i fazy, jako sygnał odniesienia. Ten sam sygnał jest przepuszczany przez badany filtr elektroniczny, a następnie jest mierzony przez miernik wzmocnienia i fazy. Miernik oblicza wzmocnienie i przesunięcie fazowe między sygnałami i w formie napięcia przekazuje do multimetrów. Następnie jest bezpośrednio odczytywany i zapisywany przez program.

Stanowisko można zastosować do pomiarów parametrów wszystkich analogowych filtrów elektronicznych w zakresie częstotliwości od 10 Hz do 13 MHz i amplitudy wejściowej od 4 mV_{pp} do 20 V_{pp}.

W zbudowanym stanowisku pomiarowym zastosowano generator arbitralny firmy Siglent typu SDG 1025. Poza odpowiednimi zakresami sygnałów – do 25 MHz oraz do 20 V_{pp} (7,07 V_{rms}) –



Rys. 3. Algorytm działania programu sterującego stanowiskiem pomiarowym
Fig. 3. Algorithm of operation of the program controlling the measuring stand

umożliwia także programowanie go w języku SCPI (ang. *Standard Commands for Programmable Instruments*) i łatwe podłączenie do komputera przez port USB [11]. Na multimetry wybrano Tonghui TH1961, które również przez port USB z wykorzystaniem poleceń języka SCPI mogą komunikować się bezpośrednio z komputerem [12]. Wykorzystany został dedykowany miernik wzmocnienia i fazy firmy Hewlett-Packard typu 3575A. Urządzenie to ma dwa wejścia sygnałowe i dokonuje pomiaru wzmocnienia oraz przesunięcia fazowego między tymi sygnałami. Pasma pomiarowe przyrządu wynosi 13 MHz. Przyrząd ten mierzy tylko i wyłącznie sygnał o częstotliwości sygnału referencyjnego, co umożliwia filtrowanie szumów.

Po zakończeniu procesu pomiarowego program rozpoczyna część obliczeniową, która polega na wyznaczeniu 13 parametrów, będących wynikami analizy charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej.

Pierwszym parametrem jest wzmocnienie maksymalne. Jest to największe zmierzone wzmocnienie w trakcie całego procesu pomiarowego, oznaczane jest przez K_{max} [dB]. Częstotliwość, przy której osiągnięto wzmocnienie maksymalne jest podawana przez program i oznaczana przez $f_{K_{max}}$ [Hz]. Analogicznie wzmocnienie minimalne jest najmniejszą wartością zmierzonym wzmocnienia. Oznaczane jest przez K_{min} [dB]. Częstotliwością, przy której osiągnięto wzmocnienie minimalne, jest $f_{K_{min}}$ [Hz].

Parametr **Rodzaj filtru** określa, jaki jest rodzaj badanego filtru ze względu na jego przepustowość. Dokonuje się tego przez sprawdzenie dwóch warunków:

$$K_{max} \geq K_o \quad (3)$$

$$K_{max} \geq K_n \quad (4)$$

Program sprawdza, czy wzmocnienie maksymalne jest większe bądź równe wzmocnieniu początkowemu i końcowemu. Warunki te wynikają bezpośrednio z kształtu charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych badanych filtrów. Częstotliwość graniczna filtru, nazywana również częstotliwością odcięcia, jest częstotliwością, dla której kończy się pasmo przepustowe [7]. Określana jest, jako spadek o 3 dB wzmocnienia względem pasma przenoszenia. W programie rozróżniane są jej dwa rodzaje. Częstotliwość graniczna dolna odnosi się do częstotliwości granicznej filtrów górnoprzepustowych, ponieważ odcina dolne częstotliwości. Także dla filtrów środkowoprzepustowych i środkowozaporowych wyróżnia się częstotliwość graniczną dolną. Dla filtru dolnoprzepustowego wynosi zero. Częstotliwość graniczna **górną**, analogicznie odcina częstotliwości wyższe. Jest ona parametrem filtrów dolnoprzepustowych, środkowoprzepustowych i środkowozaporowych. Dla filtru górnoprzepustowego wynosi zero. Programistycznie są one sprawdzane na zasadzie porównania wysokości wzmocnienia przy kolejnych częstotliwościach. Program oblicza wzmocnienie, przy którym powinno wystąpić odcięcie w odniesieniu do maksymalnego zmierzonym wzmocnienia:

$$K_{od} = K_{max} - 3 \text{ [dB]} \quad (5)$$

Pasma przepustowe filtru oznacza częstotliwości, które nie zostaną wytłumione przez filtr. Jego granice wyznaczają czę-

stotliwości graniczne. Ważnym parametrem filtru jest szerokość pasma przepustowego. W przypadku filtru dolnoprzepustowego jest to po prostu wartość równa częstotliwości granicznej dolnej, ponieważ wszystkie częstotliwości poniżej jej są przepuszczane. W przypadku filtru górnoprzepustowego program podaje różnicę między częstotliwością końcową pomiaru a częstotliwością graniczną górną. W przypadku filtru środkowoprzepustowego, który ma dwie częstotliwości graniczne, jest to różnica między częstotliwością graniczną górną a dolną. W przypadku filtru środkowozaporowego wyróżniane są dwa parametry: szerokość pasma przepustowego, która jest określana identycznie, jak w filtrze dolnoprzepustowym, oraz szerokość pasma przepustowego 2 określaną, jak w filtrze górnoprzepustowym. Innym parametrem charakterystycznym występującym tylko w przypadku filtrów środkowozaporowych jest szerokość pasma zaporowego. Jest określana, jako różnica między częstotliwością graniczną górną a dolną. Częstotliwość przepustowa środkowa jest najważniejszym parametrem filtru środkowoprzepustowego i jednocześnie najczęściej podawanym komercyjnie. Jest to częstotliwość średnia arytmetyczna wynikająca z częstotliwości granicznych filtru:

$$f_o = \frac{f_{odd} + f_{odg}}{2} \quad \text{[Hz]} \quad (6)$$

Parametr ten nie jest wyznaczany dla filtrów dolno-, górno- oraz wszechprzepustowych.

Częstotliwość zaporowa środkowa jest analogicznie do przepustowej średnią arytmetyczną częstotliwości granicznej górnej i dolnej, jest jednak osobno wyrażanym parametrem.

Po zakończeniu części analitycznej oprogramowanie umożliwia automatyczne obliczanie niepewności pomiarowych parametrów mierzonych, którego proces opisano poniżej. Jeżeli wybrana zostanie opcja zapisywania do pliku po wprowadzeniu jego nazwy zapisane do niego zostaną wszystkie wyniki analizy charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej, wszystkie punkty pomiarowe oraz wartości niepewności.

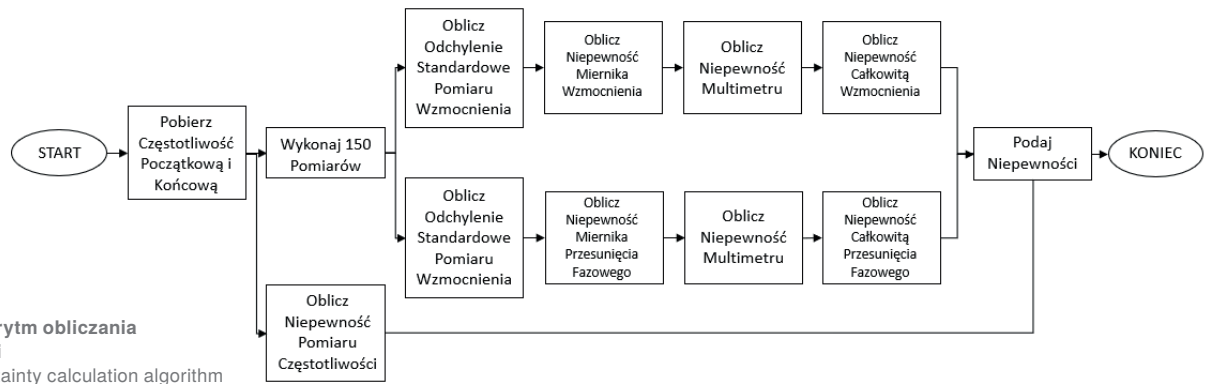
4. Zautomatyzowane wyznaczenie niepewności pomiarowych przy pomiarach charakterystyk filtrów

Wyznaczenie niepewności pomiarowych [15] odbywa się automatycznie po wybraniu tej opcji w programie przez użytkownika. Wybierane jest pięć równo rozłożonych po spektrum częstotliwości, przy których dokonywane jest 30 pomiarów wzmocnienia i przesunięcia fazowego [1]. Program dobiera częstotliwość na zasadzie równań:

$$f = f_{min} + \Delta i \quad \text{[Hz]} \quad (7)$$

$$\Delta = \frac{f_{max} - f_{min}}{6} \quad \text{[Hz]} \quad (8)$$

gdzie: f – częstotliwość pomiarowa, Δ – krok zmiany częstotliwości, i – iteracja programu (kolejne liczby całkowite od 1 do 5), f_{max} – końcowa częstotliwość pomiarowa, zaś f_{min} – początkowa częstotliwość pomiarowa.



Rys. 4. Algorytm obliczania niepewności
Fig. 4. Uncertainty calculation algorithm

Każda końcowa niepewność z poniżej opisanych niepewności pomiarów częstotliwości, napięcia i fazy podawana jest przez program, jako niepewność rozszerzoną, czyli niepewność pomiaru pomnożoną przez współczynnik rozszerzenia $k = 2$.

Niepewność pomiaru częstotliwości wynika wyłącznie z rozrzu tu sygnału napięciowego zadawanego przez generator Siglent SDG 1025. W jego przypadku niepewność obliczana jest w odniesieniu do największej częstotliwości pomiarowej.

$$u_f = f_{max} \cdot 100 \text{ ppm} = f_{max} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

Niepewność pomiaru napięcia wynika z charakterystyki miernika wzmocnienia typu 3575A (u_w), oraz woltomierza typu TH1961 (u_T), z którego sygnał jest odczytywany, wynosi:

$$u_{wz} = \sqrt{(u_w)^2 + (100u_T)^2} \quad [\text{dB}] \quad (10)$$

Niepewność wynikająca z miernika wzmocnienia jest deklarowana przez producenta wprost [13].

Składowa niepewności, wynikająca z dokładności pomiaru napięcia za pomocą multimetru jest określona zależnością:

$$u_T = \sqrt{\frac{1}{3}(u_{digit})^2 + \frac{1}{3}(u_A)^2 + s^2} \quad [\text{V}] \quad (11)$$

gdzie: u_{digit} – niepewność digitalizacji, w opisywanym przypadku wynosi: $u_{digit} = 0,0000005 \text{ V}$; u_A – niepewność wynikająca z deklarowanej dokładności miernika i na danym zakresie wynosi:

$$u_A = 0,004\% \cdot x + 0,0009\% \cdot Z \quad [\text{V}] \quad (12)$$

gdzie: Z – wartość zakresu wynosząca 1 V, zaś x – zmierzona wartość napięcia.

Składowa u_T wyliczana jest dla średniej w odniesieniu do każdego punktu pomiarowego. Do końcowych obliczeń program używa największej z policzonych niepewności.

Parametr s jest estymatorem niepewności standardowej dla wartości napięcia i oblicza się go dla każdego z pięciu punktów pomiarowych na podstawie wzoru:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_{sr} - x)^2}{n(n-1)}} \quad [\text{V}] \quad (13)$$

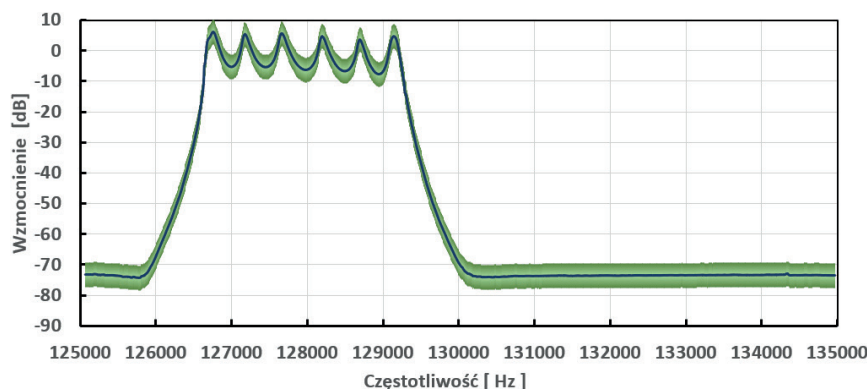
gdzie: x – zmierzona wartość napięcia, x_{sr} – średnia wartość zmierzonego napięcia, n – liczba pomiarów dla danego punktu ($n = 30$). Typowa wartość uzyskiwana na stanowisku wynosi $s \leq 0,0004 \text{ V}$.

Obliczanie niepewności przesunięcia fazowego przebiega w analogiczny sposób.

5. Badanie mikromechanicznego filtra magnetostrykcyjnego

W celu sprawdzenia parametrów użytkowych stanowiska przebadano eksperymentalny, magnetostrykcyjny filtr MEMS z rezonatorami dyskowymi. Jest to środkowoprzepustowy filtr Czebyszewa o wysokiej dobroci. Deklarowana częstotliwość środkowa pasma przepustowego wynosi 128 kHz. Przebadano filtr w okolicy tej częstotliwości przy danych parametrach pomiaru: amplituda wymuszenia: 1 V_{rms} , częstotliwość pomiarowa początkowa: 125 kHz, częstotliwość końcowa: 135 kHz, czas pomiaru: 500 s. Na rysunku 5 podano wyznaczoną na opracowanym stanowisku pomiarowym charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową badanego filtra, zaś na rysunku 6 przedstawiono charakterystykę przesunięcia fazową. Na obydwu wykresach zaznaczono także pole niepewności pomiarowej z uwzględnieniem współczynnika rozszerzenia [10] wynoszącego 2.

Przedstawione na rysunkach 5 i 6 oraz w tabeli 1 przykładowe wyniki badań wskazują na niezwykle wąskie pasmo przepustowe i wysokie tłumienie pasma zaporowego badanego filtra. Parametry te są lepsze od typowych filtrów aktywnych RC dostępnych na rynku, również wielostopniowych. Natomiast znaczące znie-



Rys. 5. Charakterystyka amplitudowa badanego filtra MEMS, z uwzględnieniem pola niepewności pomiarowej (współczynnik rozszerzenia wynoszący 2)
Fig. 5. Amplitude characteristics of the tested MEMS filter, taking into account the measurement uncertainty field (expansion coefficient equal to 2)

Tabela 1. Wyniki badania magnetostrykcyjnego filtru MEMS

Table 1. Magnetostrictive MEMS filter results

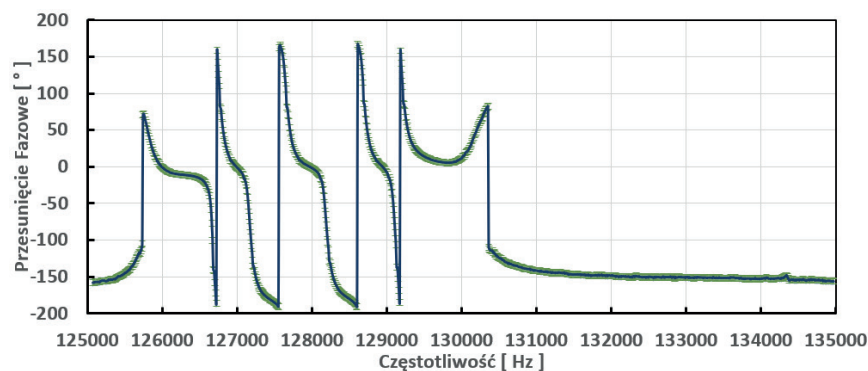
Rodzaj filtru	Filtr środkowoprzepustowy MEMS
Częstotliwość przy wzmacnieniu maksymalnym	126 760,0 Hz
Częstotliwość przy wzmacnieniu minimalnym	125 770,0 Hz
Częstotliwość graniczna dolna	126 690,0 Hz
Częstotliwość graniczna górna	129 180,0 Hz
Częstotliwość przepustowa środkowa	127 935,0 Hz
Wzmocnienie maksymalne	6,1 dB
Wzmocnienie minimalne	-74,4 dB
Szerokość pasma przepustowego	2490,0 Hz
Niepewność całkowita pomiaru częstotliwości	27,0 Hz
Niepewność całkowita pomiaru fazy	4,0
Niepewność całkowita pomiaru wzmocnienia	4,0 dB

kształcenie charakterystyki amplitudowej w pasmie przenoszenia, typowe dla filtrów Czebyszewa, oraz gwałtowne przeskoki charakterystyki fazowej, czynią go niezdatnym do wykorzystania w technice pomiarowej. Wskazuje to na konieczność pomiaru pełnych charakterystyk w procesie ich prototypowania.

Charakterystyka amplitudowa filtru podana na rysunku 5 potwierdza, że badany filtr to filtr Czebyszewa [4]. Na charakterystyce amplitudowej można zaobserwować pasmo przepustowe filtru wraz z charakterystycznymi zafalowaniami. Częstotliwość środkowa pasma filtru przepustowego została wyznaczona na 127,79 kHz, co jest bardzo bliskie wartości deklarowanej przez producenta.

6. Podsumowanie

Stanowisko może zostać wykorzystane do badania filtrów elektronicznych, w tym eksperymentalnych typu MEMS. Zapewnienie spójności pomiarowej w odniesieniu do państwowego wzorca pomiarowego napięcia elektrycznego przemiennego oraz wzorca czasu i częstotliwości utrzymywanych w Głównym Urzędzie Miar [14, 15].



Rys. 6. Charakterystyka fazowa badanego filtru MEMS, z uwzględnieniem pola niepewności pomiarowej (współczynnik rozszerzenia wynoszący 2)

Fig. 6. Phase characteristics of the tested MEMS filter, taking into account the measurement uncertainty field (expansion coefficient equal to 2)

Stanowisko charakteryzuje się niepewnościami pomiarowymi rzędu 1,5 % wartości mierzonej. Oznacza to dużo większą dokładność niż w komercyjnych analizatorach transmitancji, a tym bardziej nowoczesnych oscyloskopach cyfrowych z generatorami śledzącymi. Zwiększenie dokładności okupione jest wydłużonym czasem pomiaru – dla zaprezentowanych wyników wynosił 500 s. Dużą zaletą opisywanego stanowiska względem innych metod i rozwiązań analizatorów komercyjnych jest równoległy pomiar amplitudy i przesunięcia fazowego. Istotnym elementem nowości jest automatyczne wyznaczanie niepewności typu A zgodnie z obowiązującymi normami, co jest szczególnie przydatne w warunkach przemysłowych.

Bibliografia

1. Adams T.M., *G104-A2LA Guide for estimation of measurement uncertainty in testing*, American Association of Laboratory Accreditation Manual 10, 2002:1.
2. Bapat Y.N., *Electronic Circuits and Systems: Analog and Digital*, Tata McGraw-Hill Education, 1992.
3. Johnson Jr C.R., Sethares W.A., Klein A.G., *Software receiver design: build your own digital communication system in five easy steps*, Cambridge University Press, 2011.
4. Laghari W.M., Baloch M.U., Mengal M.A., Shah S.J., *Performance analysis of analog Butterworth low pass filter as compared to Chebyshev type-I filter, Chebyshev type-II filter and elliptical filter*, "Circuits and Systems", Vol. 5, No. 9, 2014, 209–216, DOI: 10.4236/cs.2014.59023.
5. Litovski V., *Electronic Filters*, Springer Singapore, 2019.
6. Liu H., Wang J., Kiselychynk O., *Mathematical Modeling and Control of a Cost Effective AC Voltage Stabilizer*, "IEEE Transactions on Power Electronics", Vol. 31, No. 11, 2016, 8007–8016, DOI: 10.1109/TPEL.2015.2514180.
7. Przesmycki O., *Filtry elektryczne*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1962.
8. Tłacza W., *Środowisko LabVIEW w eksperymencie wspomaganym komputerowo*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
9. Williams A.B., Taylor F.J., *Electronic filter design handbook*, McGraw-Hill Education, 2006.

Inne źródła

10. EA-4/02 M:2013 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration.
11. Siglent SDG1000 Datasheet.
12. Tonghui TH1961 Datasheet.
13. 3575A Operating & Service Manual.
14. ILAC-P14:09/2020 ILAC Policy for Measurement Uncertainty in Calibration, 2020, International Laboratory Accreditation Cooperation, Silverwater, Australia.
15. JCGM 100:2008, Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, 2008, Joint Committee for Guides in Metrology, Sèvres, Francja.

Measurement of Parameters of MEMS Electronic Filters with Automatic Determination of Uncertainty

Abstract: MEMS type electronic filters used in practice require experimental testing of amplitude and phase characteristics. This requires the development of a measurement method that will not only measure the characteristics, but also allow for the simultaneous estimation of the measurement uncertainty. The computer-controlled measuring system described in the article enables the measurement of filter characteristics while maintaining measurement traceability, taking into account the fully automated process of estimating the measurement uncertainty. The tests carried out during the study of the characteristics of the exemplary magnetostrictive filter confirmed both the correctness of the proposed solution and its applicability in practice.

Keywords: MEMS filters, measurement uncertainty, Chebyshev filter

inż. Natalia Wasilewska

nwasilewska@ikolej.pl

ORCID: 0000-0002-3102-6591

Kierownik Pracowni Wielkości Elektrycznych w Laboratorium Metrologii Instytutu Kolejnictwa. Główne obszary zainteresowań to opracowywanie i automatyzacja stanowisk pomiarowych wielkości elektrycznych oraz wdrażanie nowych metod pomiarowych. Jest konsultantem w dziedzinach metrologii i systemów jakości, szczególnie w zakresie analizy niepewności pomiarowych i akredytacji laboratoriów.



dr inż. Paweł Nowak

p.nowak@mchtr.pw.edu.pl

ORCID: 0000-0003-4156-5473

Adiunkt w Zakładzie Sensorów i Systemów Pomiarowych na Wydziale Mechatroniki Politechniki Warszawskiej. W pracy naukowej zajmuje się szeroko zakrojoną tematyką związaną z badaniami i modelowaniem zjawisk magnetycznych i magnetomechanicznych pod kątem opracowań innowacyjnych systemów i urządzeń pomiarowych. Opracował rekonstrukcje metodą elementów skończonych pod kątem aplikacji w tomografii wiropiędowej.



prof. dr hab. inż. Roman Szewczyk

roman.szewczyk@piap.lukasiewicz.gov.pl

ORCID: 0000-0002-1214-1009

Wieloletni pracownik Sieci Badawczej Łukasiewicz – Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP. Przewodniczący 2. Grupy Roboczej ds. Cyfrowego Wspomagania Przemysłu w Zespole ds. Transformacji Przemysłowej, Ministerstwo Rozwoju (2016–2017). Członek i Zastępca Przewodniczącego Grupy Roboczej 14 ds. Sensorów (w tym biosensorów) i inteligentnych sieci sensorowych w Ministerstwie Gospodarki – ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój (2015–2018). Koordynator dwóch projektów typu foresight realizowanych we współpracy z przedsiębiorcami, w których zidentyfikowano kluczowe technologie i kierunki rozwoju dla województwa mazowieckiego oraz branży automatyki, robotyki i techniki pomiarowej w Polsce. Koordynator dwóch projektów w ramach Programu Badań Stosowanych (NCBiR) ukierunkowanych na najnowsze technologie, realizowanych we współpracy z krajowymi przedsiębiorcami.

