

Maciej MALINOWSKI, Marian KAMPIK, Krzysztof MUSIOŁ

*Politechnika Śląska w Gliwicach
Katedra Metrologii, Elektroniki i Automatyki*

OPROGRAMOWANIE AUTOMATYZUJĄCE POMIARY WYKONYWANE PRECYZYJNYM MIERNIKIEM RLC KEYSIGHT E4980A

W artykule przedstawiono oprogramowanie automatyzujące pomiary składowych impedancji, wykonywane miernikiem RLC Keysight E4980A. Oprogramowanie, napisane w środowisku Microsoft Office Excel Visual Basic for Applications (VBA), jest szczególnie przydatne w przypadku wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych składowych impedancji. W artykule przedstawiono algorytm wyznaczania błędów granicznych, zaaplikowany w programie do automatyzacji, a także przykładowe zastosowania programu w badaniach elementów elektronicznych.

SOFTWARE FOR AUTOMATION OF MEASUREMENTS WITH KEYSIGHT E4980A PRECISION LCR METER

The paper presents software dedicated for automatic impedance measurements performed using Keysight E4980A precision LCR meter. The software has been written in Microsoft Office Excel Visual Basic for Applications (VBA) and is very useful for automated determination of impedance frequency characteristics. An algorithm applied in the automation program for determining the maximum permissible errors, as well as examples of program applications in testing electronic components are presented in the paper.

1. WPROWADZENIE

Współcześnie wykorzystywane cyfrowe przyrządy pomiarowe do badań wielkości elektrycznych posiadają duże możliwości w zakresie pomiarów parametrów elementów pasywnych [1] i materiałów izolacyjnych [2]. Największą funkcjonalnością, a zarazem największą dokładnością pomiaru charakteryzują się cyfrowe mierniki RLC. Najpopularniejszymi interfejsami komunikacyjnymi w tego typu przyrządach pomiarowych są USB

(ang. *Universal Serial Bus*), GPIB (ang. *General-Purpose Interface Bus*) oraz LAN (ang. *Local Area Network*). Jednym z najdokładniejszych komercyjnych przyrządów umożliwiających pomiar składowych impedancji jest miernik RLC Keysight E4980A [3, 4]. Przyrząd umożliwia pomiar impedancji sygnałem testowym o częstotliwości w zakresie 20 Hz – 2 MHz z relatywnie małym błędem wynoszącym 10^{-4} . Do miernika RLC można podłączyć różnego typu adaptery, na przykład do pomiaru elementów do montażu przewlekane (adapter Keysight 16047E), oraz uwzględnić wpływ adapterów na wyniki pomiarów poprzez wykonanie korekcji przy zwartych oraz rozwartych zaciskach adaptera.

Dotychczas w Katedrze Metrologii, Elektroniki i Automatyki (KMEiA) Politechniki Śląskiej pomiary składowych impedancji przeprowadzano ręcznie. Procedura wymagała wprowadzenia, za pomocą klawiszy dostępnych na płycie czołowej przyrządu, żądanych wartości częstotliwości, jak również innych parametrów pomiaru (na przykład prądu pomiarowego, trybu uśredniania czy też rodzaju mierzonego parametru bądź parametrów RLC). Wynik pomiaru był wyświetlony na ekranie przyrządu i w celu jego dalszej obróbki, na przykład wykreślenia jego charakterystyki częstotliwościowej, należało ręcznie wprowadzać wyniki do arkusza kalkulacyjnego. Obecnie w KMEiA coraz częściej zachodzi potrzeba badań elementów w szerokim paśmie częstotliwości. Celowe było zatem zautomatyzowanie pomiarów składowych impedancji przez stworzenie dedykowanego do tego celu oprogramowania. Założono, że do automatyzacji i opracowywania pomiarów zostanie wykorzystany dowolny komputer z zainstalowanym programem Excel, a sama aplikacja zostanie napisana w środowisku VBA. W założeniu system ma być wykorzystywany m.in. do pomiarów parametrów resztkowych rezystorów o małej rezystancji, których wartość indukcyjności jest rzędu dziesiątek nH.

2. MIERNIK RLC KEYSIGHT E4980A

W KMEiA Politechniki Śląskiej zestawiono system pomiarowy, w którego skład wchodzi komputer z programem Excel, miernik RLC Keysight 4980A oraz dedykowany adapter o numerze katalogowym 16047E, który służy do pomiaru parametrów elementów przewlekanych. Zdjęcie przyrządu wraz z adapterem przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Miernik RLC Keysight E4980A z adapterem 16047E
Fig. 1. RLC meter Keysight E4980A with fixture 16047E.

Miernik Keysight E4980A umożliwia pomiar dwóch parametrów impedancyjnych jednocześnie. Użytkownik może wybrać pomiar:

- pojemności równoległej wraz ze współczynnikiem strat dielektrycznych D, współczynnikiem dobroci Q, konduktancją G lub rezystancją równoległą R_p ,
- pojemności szeregowej wraz ze współczynnikiem strat dielektrycznych D, współczynnikiem dobroci Q lub rezystancją szeregową R_s ,
- indukcyjności równoległej wraz ze współczynnikiem strat dielektrycznych D, współczynnikiem dobroci Q, konduktancją G lub rezystancją równoległą R_p ,
- indukcyjności szeregowej wraz ze współczynnikiem strat dielektrycznych D, współczynnikiem dobroci Q lub rezystancją szeregową R_s ,
- rezystancji R wraz z reaktancją X,
- impedancji Z wraz z kątem fazowym θ_d , wyrażonym w stopniach lub z kątem fazowym θ_r , wyrażonym w radianach,
- konduktancji G wraz z susceptancją B,
- admitancji Y wraz z kątem fazowym θ_d lub θ_r .

Przyrząd Keysight E4980A umożliwia podłączenie zewnętrznego źródła napięcia stałego w zakresie -10 V do 10 V. Producent miernika udostępnia proste makro do obsługi przyrządu, jednak nie posiada ono funkcji obliczania błędów granicznych. Bardziej rozbudowane oprogramowanie PathWave Test Automation [5], opracowane przez producenta jest niestety dodatkowo płatne. Komunikację miernika z komputerem zrealizowano poprzez wykorzystanie interfejsu USB.

3. INTERFEJS I OBSŁUGA PROGRAMU

Aplikację napisano w środowisku VBA, będącym integralną częścią programu Excel. Sterowanie urządzenia odbywa się poprzez wysyłanie i odbiór komunikatów zgodnych z SCPI (ang. *Standard Commands for Programmable Instruments*). Użytkownik ma do dyspozycji prosty w obsłudze interfejs, z poziomu którego definiuje nastawy oraz wyzwala pomiar i przetwarza dane. Interfejs użytkownika został przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Interfejs użytkownika aplikacji w programie Microsoft Excel.
Fig. 2. User's interface written in Microsoft Excel.

Program umożliwia pomiar z zadanymi nastawami. Do podstawowych parametrów nastawianych przez użytkownika należą:

- „Funkcja” – pomiar dwóch parametrów elementu. Do wyboru z listy rozwijanej;
- „Napięcie” – wartość skuteczna napięcia przebiegu pomiarowego z przedziału od 0 do $2 V_{RMS}$;
- „Czas pomiaru” – całkowity czas potrzebny na dokonanie pomiaru przyrządem. Do wyboru są trzy tryby: SHORT, MEDIUM oraz LONG;
- „Liczba próbek” – liczba wyników pomiaru, z których obliczana jest średnia arytmetyczna. Dopuszczalne wartości zawierają się w przedziale od 1 do 256;
- „Zakres pomiaru” – do wyboru są następujące zakresy pomiaru: 100 mΩ|1 Ω|10 Ω|100 Ω|300 Ω|1 kΩ|3 kΩ|10 kΩ|30 kΩ|100 kΩ. Domyślnie ustawiony jest automatyczny dobór zakresu;

- f) „Temperatura” – temperatura otoczenia, deklarowana przez użytkownika. Określenie wartości tego parametru jest niezbędne do obliczenia błędów granicznych;
- g) „Szacunkowy czas pomiaru” – oczekiwany przybliżony czas na wykonanie przez przyrząd zadanej serii pomiarów. Czas jest obliczany na podstawie danych zawartych w [4]. Wynik jest podawany w sekundach.

Interfejs użytkownika zawiera przyciski do wywoływania makr. Pierwszy przycisk opisany jako „Zmierz” uruchamia procedurę nastawy parametrów, inicjuje pomiar oraz zapisuje jego wynik w odpowiednim arkuszu. Makro wykonuje pomiary dla wartości częstotliwości przedstawionych w tabeli 1. Drugi przycisk opisany jako „Oblicz błąd graniczny pomiaru” wykonuje makro obliczające wartości błędów granicznych, zgodnie z wytycznymi producenta zawartymi w [3]. Skrypt oblicza błędy graniczne dla funkcji Ls-Rs (indukcyjność i rezystancja dla szeregowego schematu zastępczego) oraz Cp-Rp (pojemność i rezystancja równoległe dla równoległego schematu zastępczego). Przyciski „Korekcja OPEN” oraz „Korekcja SHORT” umożliwiają uwzględnienie w pomiarach parametrów resztkowych adaptera i ewentualnie kabli przyłączeniowych. Miernik mierzy w tym przypadku pojemność oraz upływność między rozwartymi końcami obwodu pomiarowego (korekcja OPEN), a także rezystancję i indukcyjność szeregową przy zwartych zaciskach obwodu pomiarowego (korekcja SHORT). Korekcje są przeprowadzane automatycznie dla 51 punktów pomiarowych w przedziale od 20 Hz do 2 MHz. Producent przyrządu zaleca wykonywanie obu typów korekcji każdorazowo przed przystąpieniem do pomiarów [4].

Tabela 1

Wykaz częstotliwości przy których dokonywana jest korekcja oraz pomiary

20 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz
25 Hz	120 Hz	1,2 kHz	12 kHz	120 kHz	1,2 MHz
30 Hz	150 Hz	1,5 kHz	15 kHz	150 kHz	1,5 MHz
40 Hz	200 Hz	2 kHz	20 kHz	200 kHz	2 MHz
50 Hz	250 Hz	2,5 kHz	25 kHz	250 kHz	
60 Hz	300 Hz	3 kHz	30 kHz	300 kHz	
80 Hz	400 Hz	4 kHz	40 kHz	400 kHz	
	500 Hz	5 kHz	50 kHz	500 kHz	
	600 Hz	6 kHz	60 kHz	600 kHz	
	800 Hz	8 kHz	80 kHz	800 kHz	

4. ZASADA DZIAŁANIA MAKRA GŁÓWNEGO

Główne makro służące do wysłania nastaw, odebrania i przetworzenia danych zostało podzielone na 5 sekcji:

- a) w sekcji I zawarto definicje zmiennych, pobieranie ich z arkusza oraz nawiązywanie komunikacji, wykorzystującej bibliotekę VISA, niezbędnej do prawidłowego działania aplikacji. W tym miejscu umieszczono również funkcje pobierające z arkusza polecenia oraz wpisujące ich parametry do nagłówków do arkusza, do którego wpisywane są pobrane wartości;
- b) w sekcji II zawarto funkcje, konfigurujące magistralę USB jako kanał komunikacyjny oraz umożliwiające nawiązanie i kontynuację połączenia;
- c) w sekcji III zawarto ustawienie korekcji zgodnie z wyborem przez użytkownika oraz przesyłanie zadanych nastaw do miernika RLC;
- d) w sekcji IV umieszczono główną pętlę, której zadaniem jest nastawa częstotliwości i dokonanie pomiarów zgodnie z wcześniej ustawionymi parametrami. Pętla jest wykonywana 51 razy dla częstotliwości wyszczególnionych w tabeli 1. Każdorazowo po ustawieniu częstotliwości przyrząd dokonuje pomiaru, a wynik zapisuje w buforze w formacie ASCII (ang. *American Standard Code for Information Interchange*). Makro odczytuje zawartość bufora i rozdziela je na 4 składniki:
 - wartość pierwszego parametru,
 - wartość drugiego parametru,
 - pole statusu, zawierające informację o błędach,
 - numer bin.

Poniżej przedstawiono najważniejszą część kodu dla głównego makra.

```
For i = 1 To 51
```

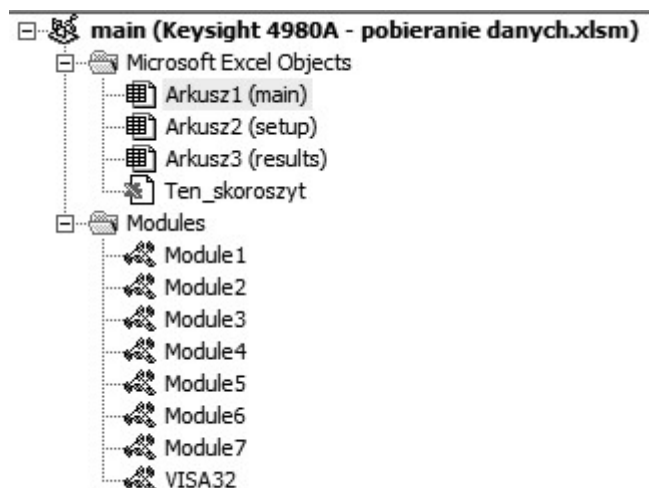
```
    f = Sheets("setup").Cells(1 + i, 4)
    ErrorCheck viVPrintf(AgtE4980A, "MEM:CLE DBUF" + vbLf, 0)
    ErrorCheck viVPrintf(AgtE4980A, "MEM:FILL DBUF" + vbLf, 0)
    ErrorCheck viVPrintf(AgtE4980A, "FREQ " + CStr(f) + vbLf, 0)
    Sheets("results").Cells(i + 1, 1).Value = f
    ErrorCheck viVPrintf(AgtE4980A, ":INIT:IMM;:TRIG:IMM"+ vbLf, 0)
    ErrorCheck viVPrintf(AgtE4980A, "MEM:READ? DBUF" + vbLf, 0)
    ErrorCheck viVScanf(AgtE4980A, "%t", Result)
    Res = Split(Result, ",")
    For m = 0 To 3
        j = m Mod 4
        k = m \ 4
```

```
Sheets("results").Cells(k + 1 + i, j + 2).Value = Val(Res(m))
Next m
k = k + 1
Next i
```

Wartości parametrów są wysyłane jako: SN.NNNNNNNNNNESNN, gdzie S symbolizuje znak (plus lub minus), N jest cyfrą z przedziału od 0 do 9, E oznacza wykładnik. Status ma postać pojedynczej cyfry ze znakiem, gdzie: 0 oznacza brak błędu, - 1 oznacza pusty bufor, 1 oznacza przekroczenie zakresu pomiarowego, 3 oznacza przeciążenie źródła napięcia przemiennego, 4 oznacza brak możliwości ustawienia automatycznej kontroli poziomu sygnału pomiarowego. Numer bin jest wykorzystywany tylko w przypadku korzystania z funkcji komparatora, w tym przypadku wynosi on zawsze 0. Poszczególne dane są wysyłane jako ciąg znaków ASCII, które są odseparowane przecinkami.

e) W ostatniej sekcji makra następuje zapis do odpowiednich komórek w arkuszu „Results”. Po wykonaniu wszystkich zadeklarowanych pomiarów połączenie jest zamykane.

Pozostałe makra zawarte w modułach (rys. 3) takie jak wykonanie korekcji SHORT i OPEN czy pobranie danych do wyznaczenia błędów granicznych, działają w sposób analogiczny do opisanego powyżej.



Rys. 3. Struktura programu w środowisku VBA

Fig. 3. The structure of the program in VBA environment

5. WYZNACZANIE BŁĘDÓW GRANICZNYCH

5.1. Algorytm obliczania błędów granicznych dla pomiaru indukcyjności i rezystancji w szeregowym schemacie zastępczym

W celu właściwego doboru wyrażen algebraicznych, zaproponowanych przez producenta przyrządu do wyznaczania błędów granicznych należy dla pomiaru indukcyjności i rezystancji szeregowej wyznaczyć współczynnik dobroci oraz moduł impedancji. Następnie korzystając z poniższej zależności należy obliczyć względny błąd graniczny zmierzonej indukcyjności:

$$A_e = \left[A_b + \frac{Z_s}{|Z_m|} \cdot 100 + Y_o \cdot |Z_m| \cdot 100 \right] \cdot K_t, \quad (1)$$

gdzie: A_b – błąd podstawowy, Z_s – wartość impedancji dla włączonej korekcji przy zwartych zaciskach obwodu pomiarowego, Y_o – wartość impedancji dla włączonej korekcji przy rozwartych zaciskach obwodu pomiarowego, $|Z_m|$ - moduł impedancji, K_t – współczynnik zależny od temperatury otoczenia. Wartości lub formuły do wyznaczania wartości A_b , Z_s , Y_o oraz K_t są podane w tabelach 12-15, 16-17, 19-20 oraz 22 dokumentacji technicznej przyrządu Keysight E4980A [3].

Następnie, w zależności o wartości współczynnika rozproszenia można obliczyć błąd bezwzględny. Jeśli $D \geq 0,1$ to błąd bezwzględny wyrażany jest wzorem:

$$A_a = A_e + A_{cal} \sqrt{1 + D^2}, \quad (2)$$

W przypadku, gdy $D < 0,1$ to błąd bezwzględny obliczany jest z zależności:

$$A_a = A_e + A_{cal}, \quad (3)$$

gdzie: A_{cal} – błąd kalibracji podana w tabelach 23-27 dokumentacji przyrządu [3].

Bezwzględny błąd graniczny dla zmierzonej rezystancji obliczany jest na podstawie wzoru:

$$R_{sa} = D_a \cdot 2\pi fL, \quad (4)$$

gdzie: f – częstotliwość przy której dokonano pomiaru, L – zmierzona wartość indukcyjności, D_a – bezwzględny błąd graniczny współczynnika strat dielektrycznych wyznaczany wg zależności:

$$D_a = \pm \frac{A_e}{100} + \theta_{cal}, \quad (5)$$

gdzie: A_e – bezwzględny błąd graniczny dla zmierzonej indukcyjności, θ_{cal} – błąd kalibracji kąta fazowego (tabele 23-27 zamieszczone w [3]).

5.2. Algorytm obliczania błędów granicznych dla pomiaru pojemności i rezystancji w równoległym schemacie zastępczym

Analogicznie jak w przypadku wyznaczania błędów granicznych dla indukcyjności, do obliczenia dokładności pomiaru pojemności wymagana jest znajomość współczynnika strat dielektrycznych. Błąd graniczny wyznacza się korzystając z zależności od (1) do (3). Różnice polegają na podstawieniu innych danych z tabel 12-15, 16-17, 19-20 oraz 22, zamieszczonych w [3].

Bezwzględny błąd graniczny dla rezystancji równoległej w przypadku gdy wartość $D \leq 0,1$ jest wyrażony wzorem:

$$R_{pa} = \pm \frac{R_p \cdot D_a}{D \pm D_a}, \quad (6)$$

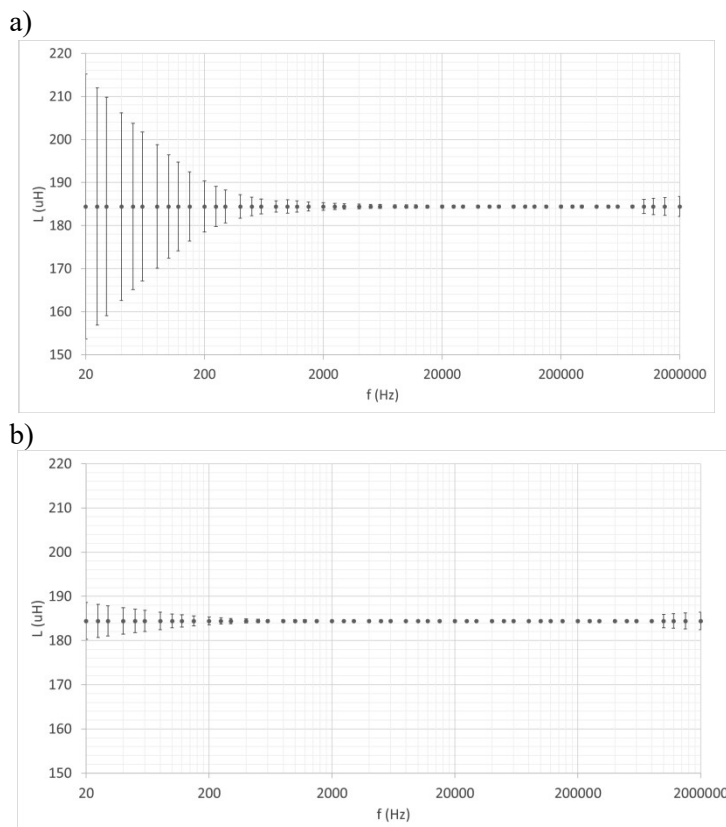
gdzie: R_p – zmierzona wartość rezystancji dla równoległego schematu zastępczego mierzonej impedancji, D – zmierzona wartość współczynnika strat dielektrycznych, D_a – graniczny błąd pomiaru współczynnika strat dielektrycznych obliczony ze wzoru (5).

W przypadku gdy $D > 0,1$ skrypt nie oblicza wartości błędów granicznych. Producent nie podaje informacji w jaki sposób należy obliczyć błąd w takim przypadku. Jednakże przypadek kondensatora o współczynniku strat dielektrycznych większym od 0,1 jest czysto teoretyczny i nie występuje w praktyce.

6. TEST SYSTEMU I JEGO PRZYKŁADOWA APLIKACJA

6.1. Test systemu

Zautomatyzowany system pomiarowy został przetestowany przy użyciu cewki cylindrycznej o indukcyjności nominalnej $180 \mu\text{H}$ dla dwóch różnych czasów pomiaru. Wyniki pomiaru wraz błędami granicznymi dla krótkiego i długiego czasu pomiaru zostały przedstawione odpowiednio na rysunku 4a i 4b.



Rys. 4. Porównanie błędów granicznych zmierzonych wartości indukcyjności dla różnych czasów pomiaru: a) pomiary w trybie SHORT, b) pomiary w trybie LONG
Fig. 4. Comparison of inductance measurement errors for different time modes, a) SHORT mode, b) LONG mode.

Pomiary zostały wykonane przy napięciu $0,7 \text{ V}$ w temperaturze otoczenia wynoszącej 23°C . Zadeklarowano liczbę 30 pomiarów, które miernik RLC

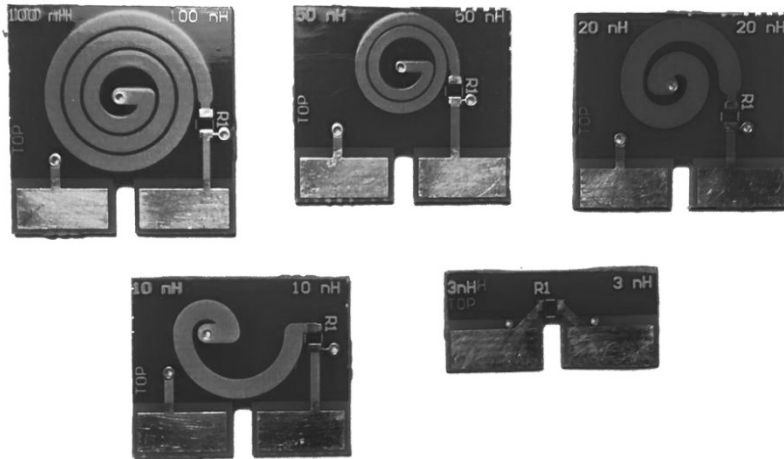
uśrednia w celu wyznaczenia wyniku końcowego. Przed pomiarami wykonano korekcję OPEN – rozwierając zaciski adaptera, oraz SHORT- zwierając zaciski adaptera zwroną, wykonaną z krótkiego odcinka drutu miedzianego.

Z otrzymanych wyników można wywnioskować, iż najmniejszych błędów pomiaru ww. obiektu należy się spodziewać w przedziale częstotliwości od około 2 kHz do 800 kHz, zarówno dla krótkiego i długiego czasu pomiaru. Długi czas pomiaru zdecydowanie zmniejsza błąd graniczny dla małych częstotliwości – od 20 Hz do 2 kHz. Otrzymane wyniki potwierdzają zasadność stosowania długiego czasu uśredniania, zwłaszcza w aplikacjach wymagających dużej dokładności pomiaru.

6.2. Minimalizacja błędu systematycznego pomiaru małych indukcyjności

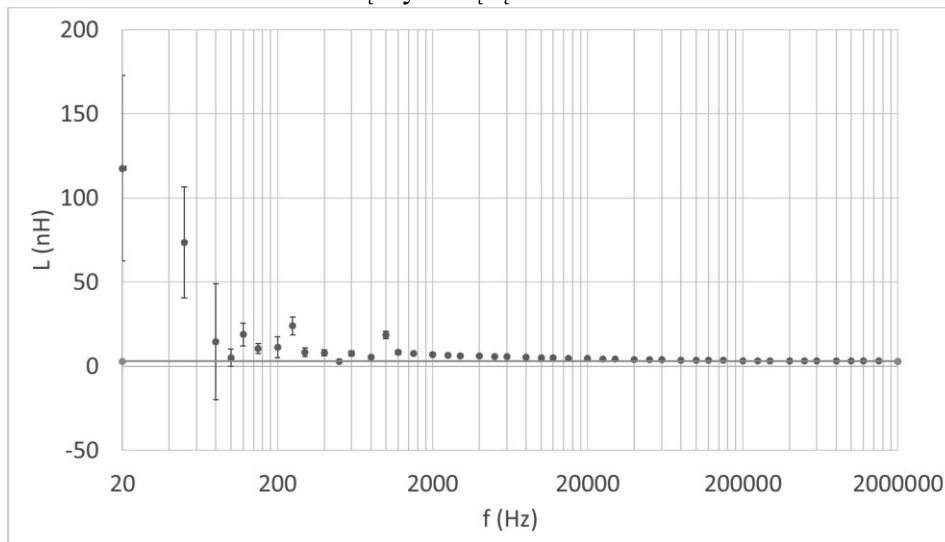
Miernik Keysight E4980A wraz z oprogramowaniem automatyzującym pomiary wykorzystano podczas badań parametrów resztkowych cienkowarstwowych rezystorów, wykorzystanych do budowy szerokopasmowych precyzyjnych boczników prądowych [6]. Rezystory te charakteryzują się bardzo małymi parametrami resztkowymi [7]. Zgodnie z dokumentacją przyrządu, błąd pomiaru indukcyjności rzędu kilku nH wynosi ponad 10%. Tak duża niepewność pomiaru uniemożliwia wykorzystanie wyników w symulacjach komputerowych przeznaczonych do obliczenia różnicy transferowej AC-DC bocznika i jego błędu fazy. Podjęto zatem próbę zwiększenia dokładności pomiaru indukcyjności resztkowej rezystorów poprzez dodanie do mierzonego obiektu szeregowej indukcyjności o stałej wartości celem wykrycia i ewentualnej korekcji błędu systematycznego. Według dokumentacji miernika RLC [3] najmniejszego błędu pomiaru indukcyjności należy spodziewać się przy pomiarach impedancji o modułach rzędu 100 Ω . W celu minimalizacji błędu granicznego opracowano szereg płytek drukowanych z cewkami planarnymi (rys. 4), do których można szeregowo wlutować badany rezystor lub rezystor o znanych parametrach resztkowych. Badane rezystory mają obudowy przeznaczone do montażu powierzchniowego (ang. *Surface Mount Devices*, SMD) o rozmiarze 1206. Do zaprojektowania cewek planarnych wykorzystano kalkulator bazujący na [8, 9, 10]. Płytki zostały zaprojektowane tak, aby można było je bezpośrednio umieścić w zaciskach adaptera Keysight 16047E. Płytki są wykonane z dwustronnego laminatu FR-4 o grubości 1,6 mm. Mozaika ścieżek na płytkach zapewnia czteroprzewodowe podłączenie szeregowego układu cewki planarnej i rezystora

SMD z zaciskami adaptera Keysight 16047E. Na rysunku 5 przedstawiono widok płytek zawierających cewki o wartości 3, 10, 20, 50 i 100 nH.



Rys. 5. Płytki PCB z cewkami planarnymi.
Fig. 5. Printed circuit boards with planar coils.
Źródło: opracowanie własne

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów dla cewki 3 nH. W celu wykonania pomiaru indukcyjności płytki w miejsce rezystora SMD tymczasowo wlutowano zworkę z miedzianego drutu srebrzonego. Linią ciągłą zaznaczono wartość nominalną wynoszącą 3 nH.



Rys. 6. Wyniki pomiarów płytki z cewką 3 nH.
Fig. 6. Measurement results for PCB with 3 nH coil.

Dla częstotliwości poniżej 10 kHz wartość indukcyjności płytki znacząco odbiega od wartości nominalnej i nie mieści się w przedziale błędów granicznych. Wraz ze wzrostem częstotliwości wartość indukcyjności się zmniejsza. Dla 20 kHz zmierzona wartość wynosi 4,68 nH, a dla 2 MHz osiąga w przybliżeniu wartość nominalną.

W przypadku pozostałych płytek również wystąpiły problemy z małą dokładnością pomiaru dla niskich częstotliwości i niestety w tym przypadku opracowane planarne wzorce indukcyjności nie zwiększają dokładności pomiarów parametrów resztkowych rezystorów cienkowarstwowych.

7. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono, oprogramowanie umożliwiające automatyzację pomiarów precyzyjnego przyrządu do pomiaru składowych impedancji Keysight E4980A, obliczające błędy graniczne dla dwóch najczęściej wykorzystywanych przypadków pomiaru parametrów RLC. Aplikację napisano w środowisku Microsoft Excel, wykorzystując wbudowany język VBA. W pracy przedstawiono testy zautomatyzowanego systemu. Przedstawione przykładowe wyniki badań elementów pasywnych wykazały zmniejszenie dokładności pomiaru przy pomiarach małych wartości impedancji. Podjęto nieudaną próbę poprawy dokładności pomiaru parametrów resztkowych rezystorów SMD, wykorzystywanych w szerokopasmowych bocznikach prądowych, przez zastosowanie planarnych wzorców indukcyjności o nastawianej dobroci. W przyszłości planowane jest napisanie skryptów do kalkulacji błędów dla pozostałych funkcji przyrządu. Zautomatyzowany system pomiarowy z nowymi funkcjami będzie przydatny podczas planowanych w najbliższym czasie interdyscyplinarnych badań, realizowanych na Politechnice Śląskiej w ramach programu *Project Based Learning*. Badania te dotyczyć będą wykrywania mikropęknięć w betonach domieszkowanych za pomocą spektroskopii impedancyjnej.

LITERATURA

1. Saraireh D., Walls S., Suryanto B., Starrs G., McCarter J.: The influence of multiple micro-cracking on the electrical impedance of an engineered cementitious composite, strain-hardening cement-based composites, Springer, 2017, pp. 292-299.

2. Zachovalová V N., Mašláň S., Šíra M., Streit J.: Development of primary standard for AC-DC current transfer difference, Proc. Of CPEM'16, Canada, 2016.
3. Keysight Technologies: E4980A precision LCR meter data sheet, 2018.
4. Keysight Technologies: E4980A precision LCR meter user's guide, Edition 16, 2016.
5. <https://www.keysight.com/zz/en/products/software/pathwave-test-software/pathwave-test-automation-software.html>
6. Malinowski M., Kampik M., Kubiczek K., Dudzik K.: Precyzyjny szerokopasmowy bocznik 50 mA, monografia „Pomiary w nauce i technice” pod red. Mariusza R. Rząsy. Opole: Oficyna Wydaw. Politechniki Opolskiej, 2019, s. 259-267.
7. Ultra High Precision Z-Foil Resistor with TCR of ± 0.05 ppm/ $^{\circ}$ C, PCR of 5 ppm at Rated Power, Tolerance of ± 0.005 % and Load Life Stability of ± 0.005 %, Datasheet, Vishay Precision Group, Document Number: 63113, Rev. 25-03-10.
8. Mohan S.S., Hershenson M., Boyd S.P., Lee T.H.: Simple accurate expressions for planar spiral inductances, IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1999.
9. Terman F.E.: Radio Engineers Handbook, McGraw-Hill, New York, 1945 Lumped Elements for RF and Microwave Circuits, Norwood, MA, 2003.
10. Bahl I.: Lumped Elements for RF and Microwave Circuits, Norwood, MA, 2003.