

## SYSTEM DO BADAŃ NIENISZCZĄCYCH WARYSTORÓW METODĄ REZONANSOWEJ SPEKTROSKOPII ULTRADŹWIĘKOWEJ

Lech Hasse<sup>1</sup>, Josef Šikula<sup>2</sup>, Janusz Smulko<sup>1</sup>, Ludwik Spiralski<sup>1</sup>, Arkadiusz Szewczyk<sup>1</sup>

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki  
Katedra Optoelektroniki i Systemów Elektronicznych  
tel: +48 58 347 1884 fax: 058 341 6132 e-mail: [lhasse@pg.gda.pl](mailto:lhasse@pg.gda.pl)
2. Brno University of Technology, Faculty of Electrical Engineering and Communications  
Department of Physics, tel: + 420 541-143328 fax: + +420 541-143398 e-mail: [sikula@feec.vutbr.cz](mailto:sikula@feec.vutbr.cz)

**Streszczenie:** Rezonansowa spektroskopia ultradźwiękowa jest efektywną metodą testowania nieniszczącego ukierunkowaną na wykrywanie defektów w badanych obiektach. Procedura testująca bazuje na wzorcu rezonansów dla danego obiektu, co umożliwia odrzucenie testowanych próbek nie odpowiadających wzorcowi. W zbudowanym systemie do testowania warystorów wysokonapięciowych zastosowano metodę „przemiatania” częstotliwości do pomiaru widma rezonansów, których częstotliwości zależą od niejednorodności struktury warystora. Jako kryterium testowania zaproponowano parametr jakości struktury  $Q$ , na podstawie którego proponuje się eliminację wadliwych elementów we wczesnej fazie procesu produkcyjnego.

**Słowa kluczowe:** warystory wysokonapięciowe, rezonansowa spektroskopia ultradźwiękowa, system do spektroskopii rezonansowej.

### 1. WPROWADZENIE

Warystory są zwykle stosowane jako ograniczniki przepięć w systemach wysokiego napięcia. Zgodnie z normami powinny być one testowane w procesie produkcyjnym przed zamontowaniem w obudowę, metodą wymagającą doprowadzenia wysokiego napięcia oraz udarów prądowych, co może okazać się procedurą niszczącą. Ponadto wymaga to metalizacji dyskowych struktur ZnO i dlatego testy te są możliwe do wyegzekwowania dopiero w końcowym etapie wytwarzania warystorów. Eliminacja wadliwych egzemplarzy wymaga zatem wytworzenia wcześniej stosunkowo drogich kontaktów, w porównaniu ze względnie niskim kosztem czystego materiału tlenku cynku ZnO. Autorzy zaproponowali metodę i wykonali system do testowania struktur warystorów metodą nieniszczącą we wstępnej fazie ich produkcji. Testy wymagają dokładnego pomiaru funkcji przenoszenia testowanego obiektu w określonym zakresie częstotliwości z odpowiednią rozdzielczością, w celu wyeliminowania struktur o obniżonej jakości.

Charakterystyka prądowo-napięciowa warystora zależy od ilości określonego rodzaju ziaren w jego strukturze. Występowanie różnego rodzaju kontaktów między ziarnami

może znacznie degradować pożądaną nieliniowość jego charakterystyki i wpływać na niejednorodność struktury warystora [1]. Przejawia się to różnorodnością właściwości elektrycznych i mechanicznych, które mogą zostać określone za pomocą rezonansowej spektroskopii ultradźwiękowej. Dzięki temu niszcząca i energochłonna procedura testowania może zostać zastąpiona znacznie bardziej oszczędną energetycznie techniką nieniszczącą.

### 2. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH PRÓBEK

Warystory wysokonapięciowe z tlenku cynku są rezystorami silnie nieliniowymi o właściwościach półprzewodnikowych. Nieliniowa rezystancja warystora zależy od użytych materiałów (mieszaniny ziaren ZnO i domieszek innych pierwiastków wpływających znacząco na właściwości warystora) oraz zastosowanej technologii produkcji. Skład chemiczny oraz procesy obróbki powodują powstanie złożonych mikrostruktur ziaren ZnO, a także wtórnie odpowiednich faz między ziarnami. Właśnie mikrostruktury między ziarnami stanowią przedmiot szczególnego zainteresowania, powodując powstawanie barier zapobiegających mechanizmom przewodzenia elektrycznego między nimi, a tym samym i kształtowanie korzystnych zjawisk nieliniowych. Technologia produkcji warystorów polega na dokładnym, wieloetapowym mieszanii wszystkich składników: tlenku cynku - stanowiącego główny składnik masy warystora, z odpowiednimi domieszkami, głównie tlenku bizmutu, manganu, chromu lub/ oraz tlenków innych metali. W celu uzyskania jednorodnej struktury produktu wymagana jest duża czystość i dokładne rozmiary ziaren. Następnym etapem jest prasowanie na zimno cylindrycznych kształtek warystorowych w celu nadania im formy krążków o takim samym kształcie jak produkt finalny oraz spiekanie ich w wysokiej temperaturze 1000÷1400°C. Spiekanie jest najważniejszym etapem w procesie wytwarzania warystorów, mającym duży wpływ na ich właściwości elektryczne. Materiały struktur zachowują się w bardzo skomplikowany sposób w procesie wypalania. Nawet takie same kompozycje tlenków dają różne fazy kryształów

i różne właściwości elektryczne w zależności od warunków spiekania (np. od profilu temperaturowego czy też od składu atmosfery). Aby warystor nie wykazywał defektów i charakteryzował się dobrymi parametrami oraz wysoką jakością, tlenek cynku powinien posiadać mikronowe ziarna pozbawione mikroporów i aglomeratów. W elemencie warystorowym krystaliczne ziarna ZnO mają wymiar ok. 10  $\mu\text{m}$  i posiadają rezystywność od 1  $\Omega/\text{cm}$  do 10  $\Omega/\text{cm}$ .

Badania struktur warystorowych były wykonywane na próbkach pozyskanych z ABB Przasnysz sp. z o.o. Były to struktury przygotowane do trwałego napięcia pracy 280 V, 440 V oraz 660 V. Każda z tych grup struktur obejmowała serie z metalizacją okładzin i bez metalizacji, a ponadto oddzielnie serie elementów dobrej jakości oraz obniżonej jakości. Wszystkie warystory o kształcie walcowym miały tę samą średnicę (nominalnie 30,5 mm z tolerancją  $-0,5$  mm), ale elementy na wyższe napięcia miały większą grubość (warystory 280 V - 2,9 mm  $\pm 0,5$ mm, warystory 440 V - 4,0 mm  $\pm 0,5$  mm, warystory 660 V - 6,0 mm  $\pm 0,5$ mm) – rys. 1.



Rys. 1. Badane próbki warystorów po wypaleniu (w górnym rzędzie) i po naniesieniu powierzchni czołowych i bocznych (warystory po lewej stronie w dolnym rzędzie); w kolumnie lewej – próbki 280 V, środkowej – 440 V, po prawej - 660 V

Próbki o obniżonej jakości wytwarzano przez trochę odmienną procedurę prasowania przed wypalaniem, wskutek czego podczas spiekania tworzyły się ziarna o różnej strukturze i charakterze przewodnictwa, dając nieco inne właściwości elektryczne i mechaniczne.

W obszarze przewodzenia (przebiecia) prąd stały  $I$  płynący przez strukturę warystora jest silnie nieliniowo zależny od przyłożonego napięcia stałego  $U$ , a mianowicie:

$$I = k \cdot U^\alpha, \quad (2.1)$$

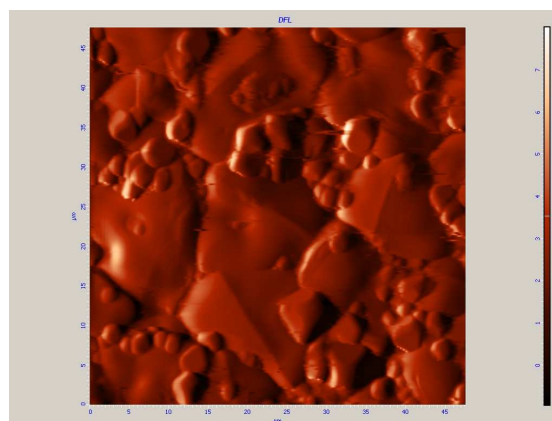
gdzie  $k$  jest stałą, natomiast  $\alpha$  współczynnikiem nieliniowości silnie zależnym od rodzajów kontaktów między ziarnami struktury warystora. Mikropołączenia tworzące granice międzyziarniowe różnią się, podobnie jak ziarna ZnO, rozmiarami i kształtem. Rozróżnia się trzy odmiennie typy granic:

- bariery dobre o dużej nieliniowości ( $\alpha > 30$ ),
- bariery złe o małej nieliniowości ( $\alpha \cong 10$ ),
- bariery prawie liniowe.

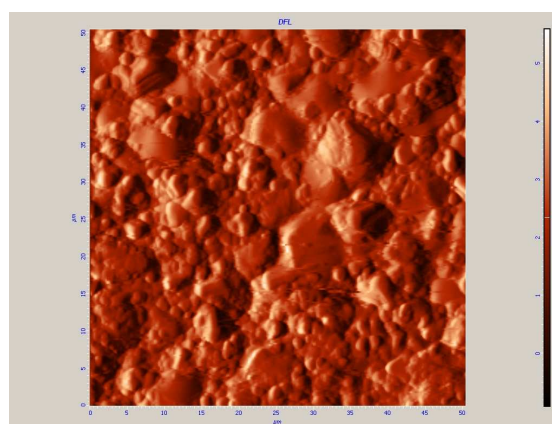
Rzeczywisty warystor jest wytworzony z mieszaniny różnych ziaren, a jego charakterystyka wyjściowa zależy od ilości ziaren każdego z tych rodzajów zawartej w jego strukturze.

Strukturę ziaren przebadano mikroskopem sił atomowych z sondą skanującą, pozwalającą na uzyskanie obrazów powierzchni skanowanych obiektów z rozdzielczością pojedynczych atomów. Mikroskop mierzy oddziaływanie sił igły mikroskopowej na powierzchnię

próbki podczas jej skanowania promieniem lasera. Uzyskane obrazy skanowanych powierzchni o wymiarach 50  $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$  przedstawiono na rys. 2 i rys. 3. Widoczne są wyraźne



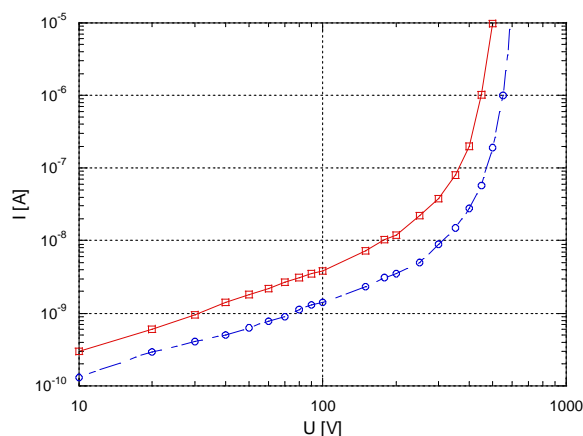
Rys. 2. Powierzchnia struktury warystora 280 V dobrej jakości



Rys. 3. Powierzchnia struktury warystora 280 V gorszej jakości

różnice w strukturze ziaren próbek dobrej i obniżonej jakości.

Odpowiednio duża zawartość ziaren o kontaktach typu liniowego lub słabo nieliniowego powoduje, że wartość parametru  $\alpha$  nie jest zbyt duża, co zmniejsza pożądaną nieliniowość charakterystyki warystora dla zakresu nawet relatywnie niskich napięć (rys. 4).



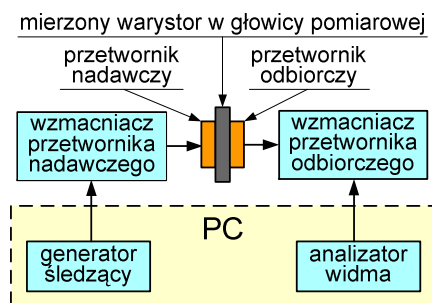
Rys. 4. Charakterystyki prądowo-napięciowe dwóch warystorów 280 V: obniżonej jakości (kwadraty) oraz dobrej jakości (okręgi)

Widoczny jest wyraźnie początek obszaru przebieciowego (przewodzenia) dla niższych napięć w przypadku próbek o gorszej jakości.

### 3. SYSTEM DO REZONANSOWEJ SPEKTROSKOPII ULTRADŹWIĘKOWEJ

Nieniszczącą techniką testowania i klasyfikacji warystorów, ze względu na ich zróżnicowaną jakość, przed napyleniem warstwy okładzin, jest zaproponowana metoda pomiaru parametru struktury z zastosowaniem rezonansowej spektroskopii ultradźwiękowej (RUS). Stanowi ona efektywne narzędzie diagnostyczne umożliwiające wykrywanie defektów i niejednorodności w obiektach ciała stałego [2,3]. Widmo rezonansów zawiera informacje o właściwościach mechanicznych, w tym o jakości strukturalnej testowanego obiektu. Procedura testowania bazująca na wzorcu rezonansów dla ciała o strukturze jednorodnej pozwala na wyeliminowanie elementów zawierających defekty (powierzchniowe lub wewnętrzne) na podstawie widma odmiennego od zastosowanego wzorca. RUS umożliwia pomiar naturalnych częstotliwości vibracji sprężystych ciał nawet małych rozmiarów (milimetrowych). Typowy pomiar to skanowanie zakresu częstotliwości, w którym zawarte są odpowiednie rezonanse mierzonych próbek.

Autorzy zastosowali metodę, w której próbki były umieszczone między dwoma przetwornikami ultradźwiękowymi [4] przy możliwie małym nacisku. Jeden z przetworników pobudzał próbkę a drugi mierzył odpowiedź na to pobudzenie (rys. 5).



Rys. 5. Uproszczony schemat systemu do pomiaru RUS

W celu pomiaru widma rezonansów został zaprojektowany i wykonany system sterowany komputerowo do automatycznego pomiaru widma w określonym przez użytkownika paśmie częstotliwości, przy pobudzeniu badanego obiektu sygnałem harmonicznym o zmiennej w czasie częstotliwości.

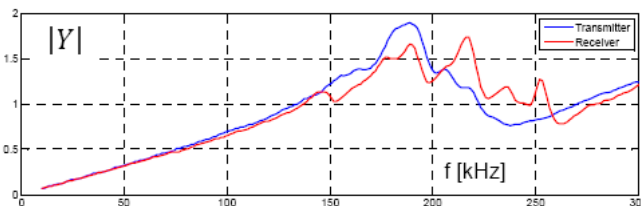
Mierzony warystor był umieszczany w ekranowanej obudowie izolowanej od środka wykładziną korkową (rys. 6) w celu izolacji od drgań konstrukcji mechanicznej systemu pomiarowego, a obudowa wraz z przetwornikami firmy TSONIC (Szwecja) o zbliżonych charakterystykach (rys. 7) montowana była w specjalnie skonstruowanym uchwycie (rys. 8). Część uchwytu mechanicznego z czujnikami została wyposażona w specjalny noniusz ułatwiający precyzyjne ułożenie czujnika odbiorczego (rys. 9). Badania wykazały, że zmiany siły docisku nie miały znaczącego wpływu na przesunięcie częstotliwości rezonansowych.

Wzmacniacz czujnika nadawczego wzmacnia sygnał ok. 23 dB w paśmie 20 Hz ÷ 400 kHz przy nierówno-mierności charakterystyki częstotliwościowej dla częstotliwości odniesienia 200 kHz wynoszącej  $\pm 0,5$  dB. Wzmacniacz sygnału z przetwornika odbiorczego, spełniający rolę wzmacniacza ładunku, posiada regulowane wzmocnienie w zakresie 52÷62 dB w paśmie częstotliwości od 20 Hz do 400 kHz i maksymalne wzmocnienie dla obciążenia  $R = 1 \text{ k}\Omega$  przy wartości międzyszczytowej sygnału wyjścio-

wego 20 V<sub>ss</sub>. Jego szумы własne są pomijalne w stosunku do poziomu sygnału odbieranego przez czujnik.



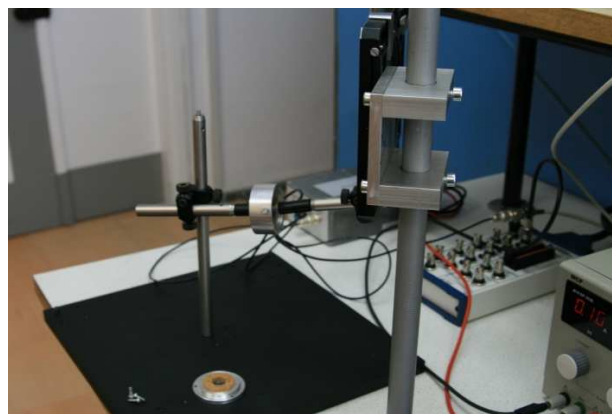
Rys. 6. Głowica mechaniczna z czujnikiem do ultradźwiękowej spektroskopii rezonansowej warystorów



Rys. 7. Moduł admitancji przetworników firmy TSONIC: — przetwornik nadawczy, — przetwornik odbiorczy

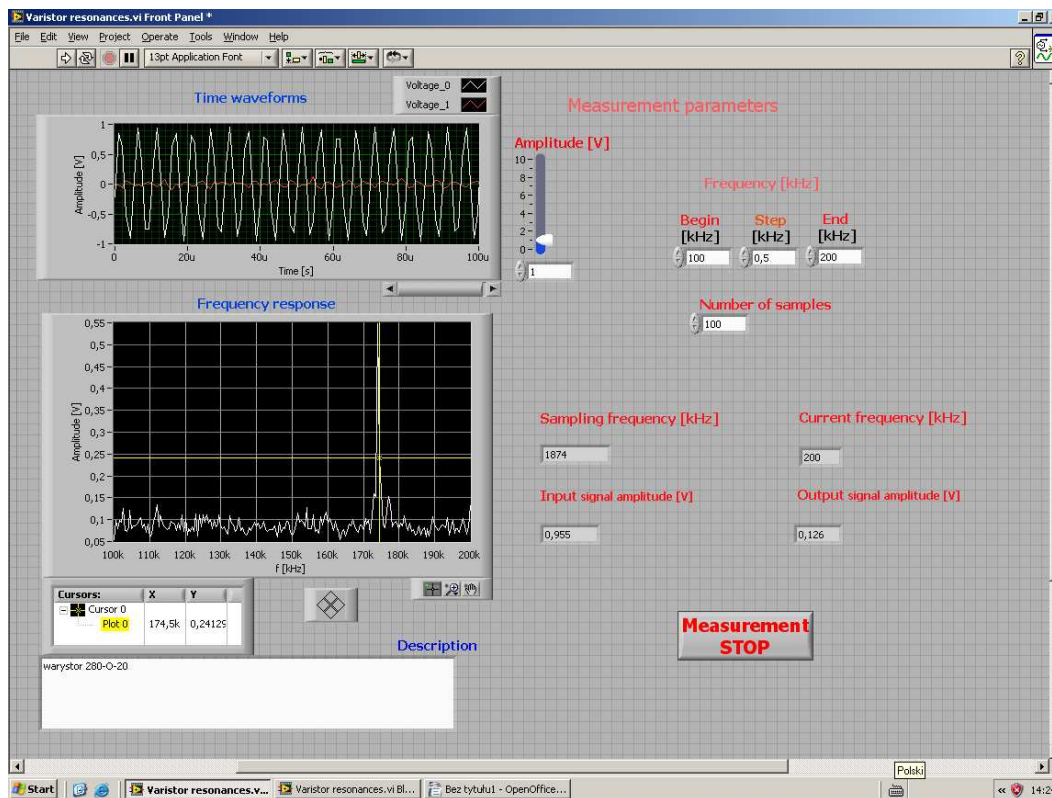


Rys. 8. Mechaniczna część systemu z metalową głowicą (warystor w pozycji wertykalnej)



Rys. 9. Mechaniczny precyzer do ustawiania położenia czujnika odbiorczego

Procesem pomiarowym i przetwarzaniem wyników pomiaru steruje opracowany w środowisku LabVIEW przyrząd wirtualny. Sygnał harmonicznym o zmiennej w czasie częstotliwości jest podawany z karty generatora PCI-5402 NI przez wzmacniacz na wejście ultradźwiękowego przetwornika nadawczego powodującego vibracje mechaniczne badanego warystora. Parametry analizatora widma jako przyrządu wirtualnego (z zastosowaniem karty



Rys. 9. Panel kontrolny przyrządu wirtualnego do RUS

zbierania danych National Instruments PCI-6132 o rozdzielczości 14 bitów i częstotliwości próbkowania do 3 MHz) są dobierane w środowisku LabVIEW.

Na panelu kontrolnym urządzenia wirtualnego (rys. 9) ustawia się żadaną amplitudę przebiegu z generatora oraz częstotliwość początkową, końcową oraz krok zmiany częstotliwości w kHz. W oknie „Description” można umieścić dodatkowy opis, który zostanie dołączony do pliku tekstowego wraz z wynikiem.

Przebiegi czasowe sygnału testowego i sygnału z wyjścia wzmacniacza czujnika odbiorczego są wyświetlane w oknie graficznym „Time waveforms”, zaś wyznaczana charakterystyka widmowa jest wykresłana na bieżąco w trakcie trwania pomiaru w oknie graficznym „Frequency response”. Wartości chwilowe częstotliwości i amplitud sygnałów: wejściowego i wyjściowego oraz aktualna wartość częstotliwości próbkowania są wyświetlane w polach po prawej stronie panelu sterowania. Kursor umożliwia precyzyjne określenie częstotliwości rezonansu. Po zakończeniu pomiaru wszystkie dane spektroskopii mogą zostać zapisane do pliku.

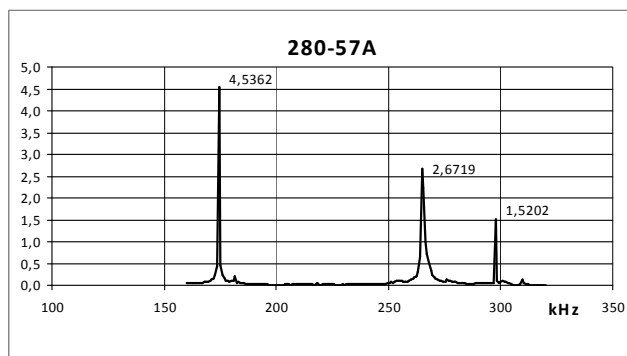
W widmie wzmocnionego sygnału wyjściowego z czujnika odbiorczego występują rezonanse wewnętrzne będące rezultatem właściwości mechanicznych drgającego warystora (na rys. 9 o częstotliwości 174.5 kHz).

Wynik pomiaru w postaci wykresu modułu charakterystyki przenoszenia, jest wyświetlany w oknie graficznym i może być zapisany w pliku tekstowym.

#### 4. CHARAKTERYSTYKI WIDMOWE RUS WARYSTORÓW

Mierzone były trzy typy warystorów na napięcia progowe 280 V, 440 V oraz 660 V bez metalizacji wyprowadzeń (po 100 sztuk dobrych oraz po 100 sztuk specjalnie przygotowanych z niejednorodnościami

struktury). Biorąc pod uwagę średnią prędkość sygnału ultradźwiękowego w materiale po spieku wynoszącą około 8300 m/s i wstępnie pomierzone częstotliwości różnych modów sprężystych, wybrane zostały odpowiednie częstotliwości rezonansowe w celu selekcji elementów. Były to dla próbek na napięcia 280 V, 440 V oraz 660 V, częstotliwości wynoszące w przybliżeniu, odpowiednio, 175 kHz, 153 kHz oraz 130 kHz. Przykładowe widmo rezonansów dla próbki na napięcie 280 V nr 57 o obniżonej jakości przedstawiono na rys 10.

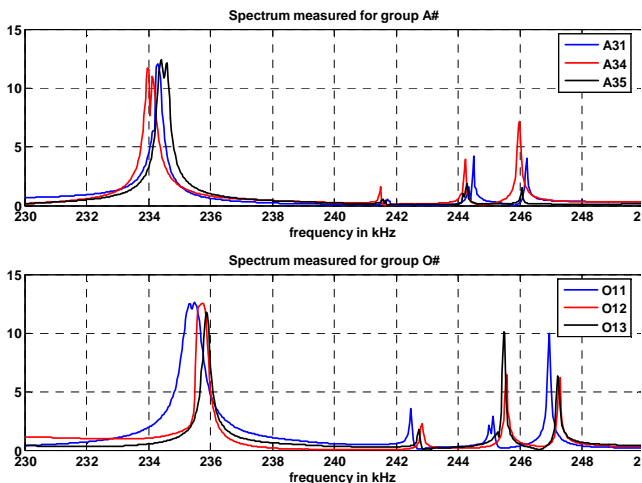


Rys. 10. Widmo rezonansów dla próbki 280-57A

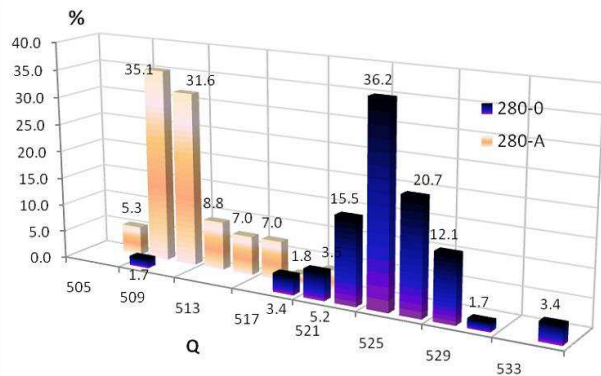
Różnice w częstotliwościach rezonansów (tylko po 3 próbki dla przejrzystości) pomiędzy grupą A (gorszej jakości) i O (dobrej jakości) przedstawiono na rys. 11. Widoczne są mniejsze wartości częstotliwości rezonansowych dla próbek gorszej jakości.

Zmiany geometryczne gabarytów próbek nawet w granicach tolerancji produkcyjnych mają jednak wpływ na wartości częstotliwości rezonansowych  $f_r$ . Autorzy proponują wprowadzenie jako kryterium selekcji warystorów na elementy o dobrej i obniżonej jakości miary porównawczej uwzględniającej te zmiany - **parametru struktury Q**:

$$Q = f_r \sqrt{(w^2 + d^2)} \quad (4.2)$$

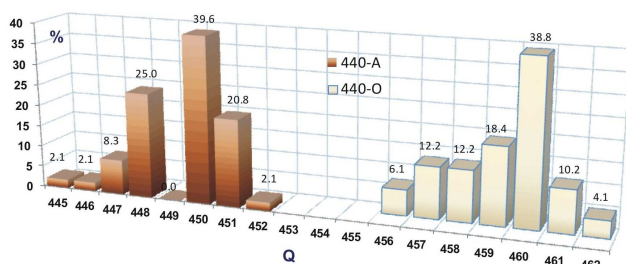


Rys. 11. Widmo rezonansów grupy próbek gorszej jakości (próbki A) oraz dobrej jakości (próbki O)



Rys. 12. Statystyka częstotliwości rezonansu dla 100 próbek warystorów 280 V:

■ - próbki o gorszej jakości    ■ - próbki dobrej jakości



Rys. 13. Statystyka częstotliwości rezonansu dla 100 próbek warystorów 440 V:

■ - próbki gorszej jakości    ■ - próbki dobrej jakości

Wymiar parametru  $Q$  odpowiada wymiarowi prędkości i uwzględnia najdłuższy wymiar obiektu (przekątną walca o średnicy  $d$  i wysokości  $w$ ). Można zatem przyjąć, że wartość  $Q$  jest proporcjonalna do prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej. Zaproponowany parametr  $Q$  ma charakter wyłącznie empiryczny, pozwalający ustalić do jakiej grupy jakościowej należy badana próbka.

Zbiorną statystykę wartości parametru struktury  $Q$  dla serii 100 próbek struktur na napięcia 280 V oraz 440 V przedstawiono na rys. 12 oraz na rys. 13 [5]. Przesunięcie wartości parametru struktury  $Q$  w kierunku mniejszych wartości dla próbek o niższej jakości jest znaczące zarówno dla próbek na napięcie 280 V, jak i 440 V. Przesunięcie to jest spowodowane innymi własnościami mechanicznymi i elektrycznymi próbek o różnej wielkości ziaren ZnO powodującymi różną prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej. Dla próbek na napięcie 440 V uzyskano pełną separację próbek dobrych i próbek z defektami.

## 5. PODSUMOWANIE

Nieniszcząca technika oceny jakości za pomocą rezonansowej spektroskopii ultradźwiękowej umożliwia selekcję warystorów na elementy o dobrej jakości i o obniżonej jakości (z niejednorodnością struktury lub np. z pęknięciami). Może być ona wdrożona we wcześniejszych etapach produkcji ograniczników przepięć, przed nałożeniem warstwy metalowych okładzin. Wykonany system umożliwia przeprowadzenie RUS warystorów i wyeliminowanie próbek warystorów o gorszej jakości.

Zaproponowany parametr struktury  $Q$  uwzględnia również różnice w gabarytach testowanych warystorów. Zakres częstotliwości testowania (100 – 350 kHz) jest łatwy do zastosowania cyfrowej akwizycji danych, sterowania komputerowego w środowisku LabVIEW i do automatyzacji w procesie produkcyjnym.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. He J., Zeng R., Chen Q. i inni: Nonuniformity of electrical characteristics in microstructures of ZnO surge varistors. *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, Jan. 2004, s. 138-144.
2. Migliori A., Sarrao J.L.: *Resonant Ultrasound Spectroscopy: Applications to Physics, Materials Measurements, and Nondestructive Evaluation*, Wiley, 1997.
3. Buckin V., o'Driscoll B., Smyth C.: *Ultrasonic spectroscopy for material analysis. Recent advances. Spectroscopy Europe*, vol. 15, nr 1 2003, s. 20-25.
4. Engholm M., Stepinski T.: Designing and evaluating transducers for narrowband ultrasonic spectroscopy. *NDT&E Intern.*, Vol. 40, 2007, s. 49-56.
5. Hasse L., Smulko J.: Resonant ultrasonic spectroscopy in high-voltage varistor diagnostics. *Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Information Technology*, Gdańsk, May 18-21, 2008.

## SYSTEM FOR NONDESTRUCTIVE TESTING OF VARISTORS BY MEANS OF RESONANT ULTRASOUND SPECTROSCOPY

**Keywords:** high-voltage varistors, resonant ultrasound spectroscopy, system for resonant spectroscopy

Resonant ultrasound spectroscopy is an effective nondestructive testing method focused on defects in tested objects. The testing procedure based on the resonant pattern allows to reject tested samples with defects do not fitting the pattern. A swept

frequency method has been used to measure the spectrum of resonances in high-voltage varistors. The resonant frequencies depend on the varistor heterogeneity. The quality of the structure parameter  $Q$  has been proposed as a criterion for the “go- no go” testing for elimination of the defected elements in the preliminary stage of the varistor manufacturing process.