

**Lech HASSE<sup>1</sup>, Ludwik SPIRALSKI<sup>1</sup>, Vlasta SEDLÁKOVÁ<sup>2</sup>, Josef ŠIKULA<sup>2</sup>**<sup>1</sup>POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI<sup>2</sup>BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATIONS**Spektroskopia elektro-ultradźwiękowa warystorów wysokonapięciowych****Dr Lech HASSE**

Reprezentuje specjalność miernictwo sygnałów losowych. Obszar zainteresowań: analiza i pomiary szumów elementów i układów elektronicznych, projektowanie systemów do pomiarów szumów, przetwarzanie sygnałów losowych. Autor i współautor ponad 200 publikacji, w tym 2 monografie oraz 6 patentów.



e-mail: lhasse@pg.gda.pl

**Prof. dr hab. Ludwik SPIRALSKI**

Prof. zw. w Akademii Morskiej w Gdyni i emerytowany prof. zw. Politechniki Gdańskiej. Obszar zainteresowań naukowych: teoria i technika pomiarów właściwości szumowych elementów, układów i systemów elektronicznych, kompatybilność elektromagnetyczna, zakłócenia. Autor lub współautor ponad 300 publikacji, w tym 9 monografie oraz ponad 30 patentów.



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

**Dr Vlasta SEDLÁKOVÁ**

Adiunkt na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki w Brnie. Jej zainteresowania naukowe obejmują zjawiska fluktuacyjne w strukturach półprzewodnikowych i elementach biernych.



e-mail: sedlaka@fec.vutbr.cz

**Prof. RNDr. D. Sc. Josef ŠIKULA**

Josef Šikula jest od 1980 r. profesorem zwyczajnym na Wydziale Elektroniki i Telekomunikacji Politechniki w Brnie, a od 2002 r. Prezydentem Międzynarodowego Stowarzyszenia Mikroelektroniki IMAPS Oddziału Czeskiego i Słowackiego. Obszary badań naukowych to spektroskopia szumowa, badania nieniszczące, defektoskopia, właściwości elementów biernych.



e-mail: sikula@fec.vutbr.cz

**Streszczenie**

Przedstawiono nową nieniszczącą metodę wykrywania defektów dwójników. W metodzie wykorzystuje się wzajemne oddziaływanie fononów ultradźwiękowych i elektronów wskutek istnienia defektu powodującego nieliniowości. Testowana próbka jest pobudzana przez sygnały harmoniczne: elektryczny i ultradźwiękowy o różnych częstotliwościach. Wskutek nieliniowości powodowanej przez defekt struktury próbki powstaje nowy sygnał harmoniczny o częstotliwości różnicowej sygnałów stymulujących. Opisano skrótowo system spektroskopii elektro-ultradźwiękowej. Zaproponowana metoda została zweryfikowana przy pomiarach warystorów wysokonapięciowych. Podano zależność amplitudy sygnału intermodulacyjnego w funkcji poziomu sygnałów pobudzających.

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, nieliniowa spektroskopia elektro-ultradźwiękowa, warystori wysokonapięciowe.

**Electro-ultrasonic spectroscopy of high-voltage varistors****Abstract**

The paper describes a new non-destructive testing method for conducting solids with defects or cracks. The method is based on nonlinear effects created by a harmonic motion of atoms subjected to ultrasonic vibrations. Physical principle follows from ultrasonic phonons interaction with electrons on defect caused nonlinearity. Tested sample is excited by harmonic electrical and ultrasonic signals with different frequencies. On the defect caused nonlinearity a new harmonic signal is created with frequency given by subtraction of excited frequencies. The system for electro-ultrasonic spectroscopy measurements has been briefly described. The method was verified for high-voltage varistors measurements. The dependence of an amplitude of intermodulation component versus levels of ultrasonic and electrical excitations has been determined experimentally.

**Keywords:** non-destructive testing, nonlinear electro-ultrasonic spectroscopy, high-voltage varistors.

**1. Wprowadzenie**

Badania nieniszczące (*non-destructive testing* – NDT) służą do wykrywania oraz niekiedy lokalizacji defektów i niejednorodności

materiałowych badanych obiektów bez wywoływania zmian jego właściwości użytkowych. Badania destrukcyjne dostarczają więcej informacji dotyczących badanego elementu, jednakże uniemożliwiają jego dalsze funkcjonalne wykorzystanie, co wiąże się ze wzrostem kosztów procedury testowania. Metody i techniki badań nieniszczących stosowane są ze względu na konieczność zapewnienia wysokiej jakości materiałów, wyrobów końcowych, urządzeń czy też konstrukcji i mają na celu wcześniejszą detekcję możliwości uszkodzeń (awarii), stąd też mają one trudne do przecenienia znaczenie dla stabilnej pracy instalacji przemysłowych. Stosowanie technik nieniszczących wymaga jednakże zwykle większych umiejętności i wiąże się z większymi problemami w interpretacji wyników.

Wykonywanie szczegółowych testów produkcyjnych wykrywających potencjalną degradację materiałów lub odchyłkę od wymaganej ich jakości stanowi bezwzględny wymóg współczesnego przemysłu. Każdy wytwarzany element jest systematycznie kontrolowany, co preferuje zastosowanie testowania nieniszczącego. W tym celu stosuje się wiele różnych metod w zależności od określonych wymagań konkretnych zadań, które powinny charakteryzować się możliwie dużą prostotą i niskim kosztem ich realizacji.

Od kilku lat prowadzone są badania nieliniowej propagacji, odbić i wzajemnego oddziaływania fal wzdłużnych, w wyniku których powstało szereg modeli opisujących zmiany prędkości i zniekształceń fal podczas tych procesów [1]. Stosowane klasyczne metody ultradźwiękowe badań nieniszczących obiektów bazują na analizie absorpcji oraz interferencji fal sprężystych. Detekcja niejednorodności i pęknięć przy zastosowaniu tych metod jest trudna, jeśli defekty posiadają małe rozmiary i są rozmieszczone w całej objętości próbki, bądź jeśli rozmiar defektu jest porównywalny z długością fali. Szczególnie duży problem stanowi analiza próbek o skomplikowanym kształcie wskutek zjawiska odbicia fali i tworzenia wyższych harmonicznych sygnału w okolicy defektów.

W niniejszej pracy zastosowano dwa różne źródła sygnałów o różniących się częstotliwościach, dokonując następnie detekcji produktów intermodulacyjnych.

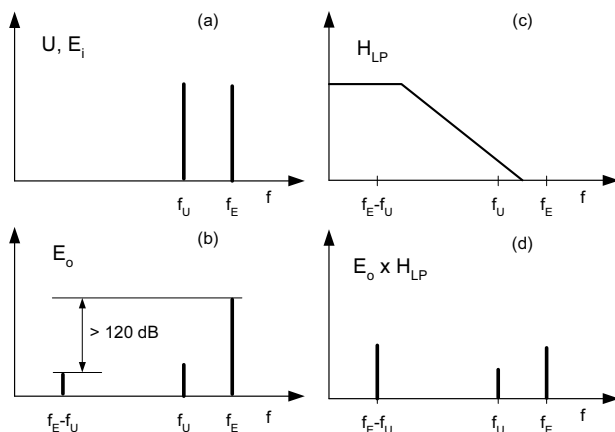
## 2. Nieliniowa spektroskopia ultradźwiękowa

W spektroskopii nieliniowej stosuje się dwie różne częstotliwości źródeł sygnału i wykrywa się produkty intermodulacyjne. Szczegółowa analiza nieliniowej propagacji i odbicia fal harmonicznych została zawarta np. w pracy [2], gdzie wyprowadzono wyrażenia analityczne opisujące równoczesną propagację dwóch fal sinusoidalnych. Podstawowe osobliwości tego problemu zostały wyjaśnione metodą badań symulacyjnych. W rozpatrywanym przypadku wzajemne oddziaływanie fal wzmacnia efekty nieliniowe, co pozwala na uzyskanie informacji charakteryzującej badany materiał za pomocą testowania nieniszczącego. Metodą tą towarzyszy wystąpienie sygnałów i efektów pasożytniczych.

## 3. Nieliniowa spektroskopia elektro-ultradźwiękowa

Wykorzystana w badaniach metoda polegała na oddziaływaniu w testowanym obiekcie fononów fali ultradźwiękowej na ruchliwość elektronów, gdzie w okolicy defektu zachodzi intermodulacja fali ultradźwiękowej i prądu elektrycznego.

Metoda ta charakteryzuje się mniejszym wpływem odbić i interferencji fali sprężystej na mierzony sygnał, ponieważ sygnały: ultradźwiękowy i elektryczny są wywołane różnymi zjawiskami fizycznymi. W tej nowej metodzie stosuje się dwie różne ścieżki sygnałowe, co minimalizuje powstawanie sygnałów i efektów pasożytniczych i skutkuje uzyskaniem większej rozdzielczości w porównaniu z metodami klasycznymi. Wykorzystano w niej harmoniczny sygnał elektryczny  $E_i$  o częstotliwości  $f_E$  oraz falę ultradźwiękową  $U$  o częstotliwości  $f_U$  powodując zjawisko modulacji dwóch sygnałów harmonicznych (rys. 1).



Rys. 1. Widma sygnałów spektroskopii elektro-ultradźwiękowej: (a) – sygnały pobudzające: ultradźwiękowy  $U$  o częstotliwości  $f_U$  i elektryczny  $E_i$  o częstotliwości  $f_E$ , (b) – widmo sygnału elektrycznego  $E_o$  na wyjściu badanego elementu, (c) – charakterystyka częstotliwościowa  $H_{LP}$  filtru dolnoprzepustowego, (d) – widmo sygnału elektrycznego po filtracji dolnoprzepustowej w zakresie małej dynamiki sygnału

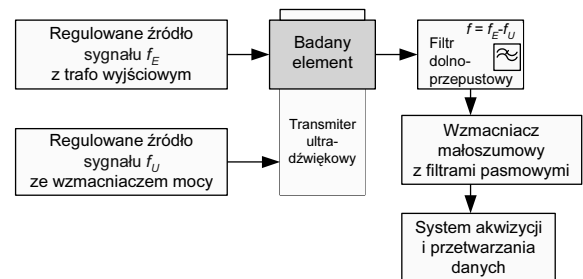
Fig. 1. Spectra of electro-ultrasonic spectroscopy signals: (a) – stimulating signals: ultrasonic with frequency  $f_U$  and electrical with frequency  $f_E$ , (b) – spectrum of electrical signal  $E_o$  at the output of measured device, (c) – frequency characteristic HLP of lowpass filter, (d) – spectrum of electrical signal after low-pass filtration in low signal dynamic range

Istnieją dwie możliwości detekcji sygnału intermodulacyjnego: w zakresie małych częstotliwości (dla częstotliwości różnicowej  $f_E - f_U$ ) oraz w zakresie większych częstotliwości (dla częstotliwości sumacyjnej  $f_E + f_U$ ). Główną zaletą zastosowanej metody jest detekcja sygnału elektrycznego poza pasmem sygnałów stymulujących, co zwiększa czułość metody umożliwiając wykrycie małych defektów i poprawia stosunek sygnał-szum.

## 4. Weryfikacja eksperymentalna metody

Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rys. 2, a część generacyjną sygnału ultradźwiękowego o częstotliwości  $f_U$  na rys. 3. Filtr dolnoprzepustowy posiada częstotliwość odcięcia nieco powyżej częstotliwości  $f_E - f_U$ .

Szczególną uwagę poświęcono minimalizacji szumów własnych systemu pomiarowego w pobliżu mierzonej częstotliwości różnicowej  $f_E - f_U$  stosując odpowiednie filtry pasmowe połączone bezpośrednio ze wzmacniaczem małoszumowym.



Rys. 2. Uproszczony schemat blokowy systemu do badania spektroskopii elektro-ultradźwiękowej

Fig. 2. Simplified block diagram of system for electro-ultrasonic spectroscopy



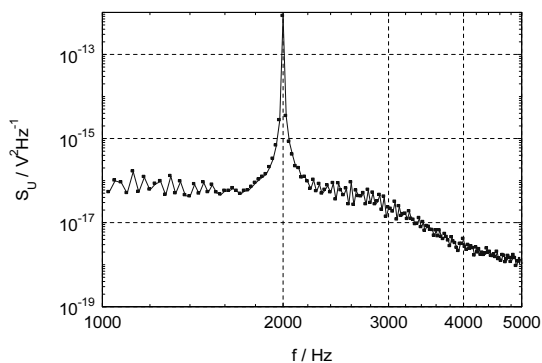
Rys. 3. Transmitter sygnału ultradźwiękowego z czujnikiem piezoelektrycznym

Fig. 3. Transmitter of ultrasonic signal with piezoelectric sensor

W przedstawionym systemie pomiarowym mierzone były próbki warystorów wysokonapięciowych (na napięcia 280 V, 440 V oraz 680 V) stosowanych w ogranicznikach przepięć, produkowanych przez firmę ABB Sp. z o.o. w Przasnyszu. Po wstępnych pomiarach optymalizujących parametry toru pomiarowego, przyjęto częstotliwość intermodulacyjną równą 2 kHz. Uzyskanie maksymalnej amplitudy sygnału intermodulacyjnego  $A_m$  jest uwarunkowane odpowiednim doбором eksperymentalnie amplitud sygnałów stymulujących. W układzie akwizycji danych przyjmowano z reguły częstotliwość próbkowania  $f_s = 10$  kHz oraz liczbę próbek pozwalającą na uzyskanie rozdzielczości  $\Delta f = 5$  Hz. Zmierzona gęstość widmowa mocy szumów własnych systemu pomiarowego wynosiła  $S_U = 10^{-16}$  V<sup>2</sup>Hz<sup>-1</sup>. Maksimum sygnału intermodulacyjnego wystąpiło dla elektrycznego sygnału stymulującego o parametrach  $f_E = 33.4$  kHz,  $U_E = 50$  V oraz ultradźwiękowego sygnału pobudzającego  $f_U = 31.4$  kHz,  $U_U = 20$  V.

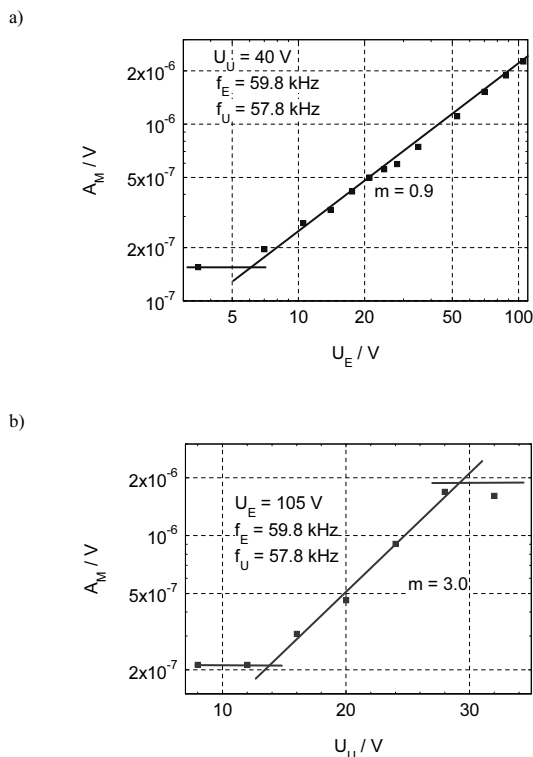
Przykładowy wynik gęstości widmowej mocy sygnału wyjściowego dla warystora o napięciu ograniczania 440 V przedstawiono na rys. 4.

Zmierzono zależność amplitudy sygnału intermodulacyjnego od amplitudy elektrycznego i ultradźwiękowego sygnału stymulującego (rys. 5). Zależność od sygnału ultradźwiękowego jest silniejsza, co wyraża wartość wykładnika potęgi  $m$  w zależności wykładniczej między tymi napięciami, jednak widoczne są wyraźne zakresy nasycenia.



Rys. 4. Gęstość widmowa mocy sygnału spektroskopii elektro-ultradźwiękowej dla próbki warystorowego ogranicznika przepięć

Fig. 4. Power spectral density of electro-ultrasonic spectroscopy signal for sample of varistor arrester



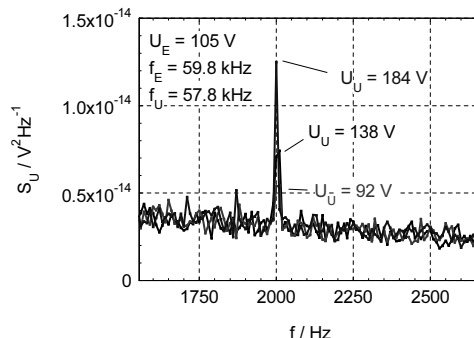
Rys. 5. Zależność amplitudy sygnału intermodulacyjnego  $A_M$  od napięcia sygnału elektrycznego  $U_E$  (a) oraz ultradźwiękowego  $U_U$  (b) dla warystora o małej trwałości

Fig. 5. Amplitude of intermodulation signal  $A_M$  versus electrical signal amplitude  $U_E$  (a) and ultrasonic signal amplitude  $U_U$  (b) for varistor with lower endurance

Dla warystorów o wysokiej jakości wymagane były znacznie większe amplitudy sygnału ultradźwiękowego (rys. 6).

Przy określonej wartości elektrycznego sygnału stymulującego nasycenie amplitudy sygnału intermodulacyjnego występuje przy mniejszych wartościach napięcia  $U_U$  dla próbek o mniejszej nie-

zawodności (gorszej jakości). Dla niektórych egzemplarzy próbek o bardzo dobrej jakości nie wykryto produktu intermodulacyjnego nawet przy zwiększeniu amplitudy sygnału ultradźwiękowego ponad 100 V.



Rys. 6. Gęstość widmowa mocy sygnału spektroskopii elektro-ultradźwiękowej warystora o wysokiej jakości dla różnych amplitud sygnału ultradźwiękowego

Fig. 6. Power spectral density of electro-ultrasonic spectroscopy signal for sample of varistor with high quality for different amplitudes of ultrasonic signal

## 5. Wnioski

Wysoka czułość spektroskopii elektro-ultradźwiękowej wynika z faktu, że sygnał intermodulacyjny, niosący informacje o jakości badanej próbki, ma inną częstotliwość niż częstotliwości sygnałów stymulujących. Duża wartość stosunku sygnał-szum została osiągnięta również wskutek zastosowania skutecznej filtracji w systemie pomiarowym.

Metoda ta może zostać wykorzystana do wstępnej oceny trwałości elementów elektronicznych czy też mechanicznych, ich wytwarzania przy zastosowaniu zróżnicowanej technologii oraz detekcji defektów powstałych w trakcie eksploatacji. Innym zastosowaniem w elektronice może być wykrywanie powstających pęknięć i niejednorodności w elementach elektronicznych, takich jak rezystory cienko- i grubowarstwowe czy też kondensatory ceramiczne. Można się spodziewać podobnych zastosowań w procesie technologicznym, gdy wymagana jest duża niezawodność i wysoka jakość wytwarzanych produktów. Skuteczność metody została zweryfikowana eksperymentalnie dla warystorów wysokonapięciowych.

Powiązanie proponowanej metody z emisją akustyczną, emisją elektromagnetyczną oraz nieliniową spektroskopią ultradźwiękową pozwoli na doskonalsze charakteryzowanie materiału i struktury badanego obiektu.

Praca była częściowo finansowana z projektu badawczego MNiSW Nr N004 31/0529 (L. Hasse, L. Spiralski) oraz z projektów GACR 102/06/0866, GACR 102/07/P482 oraz MSM 0021630503 MIKROSYN New Trends in Microelectronic System and Nanotechnologies (V. Sedláková, J. Šikula).

## 6. Literatura

- [1] P. Johnson, J. A. Ten Cate: Non-destructive Testing of Materials By Nonlinear Elastic Wave Spectroscopy. <http://www.ees.lanl.gov/ees11/nonlinear/diagnostics.html>
- [2] P. Koltavý, J. Pavelka, J. Šikula: Characterization of acoustic and electromagnetic emission sources. Measurement Science and Technology, vol. 15, 2004, č. 1, s. 973.