

Wpływ długotrwałego działania temperatury na właściwości dielektryczne izolacji epoksy-mika-szkło

Streszczenie. W artykule zaprezentowano pomiary metodą FDS (Frequency Domain Spectroscopy) izolacji epoksy-mika-szkło poddanej długotrwałemu działaniu temperatury z zakresu 150÷160 °C. Analizę danych pomiarowych przeprowadzono za pomocą zależności Havriliaka-Negamięgo. Wykazano, że metoda FDS może stanowić miarodajne narzędzie diagnostyczne izolacji epoksy-mika-szkło na etapie produkcji jak i eksploatacji.

Abstract. The paper presents measurements conducted with FDS (Frequency Domain Spectroscopy) method on epoxy-mica-glass insulation exposed to long term temperature influence in the range 150÷160 °C. The analysis of measured data has been performed with Havriliak-Negami equation. It was showed that FDS method can be a reliable diagnostic tool for epoxy-mica-glass insulation, both in production and operation. (*The Influence of Long Term Temperature Exposition Dielectric Properties of Epoxy-Mica-Glass Insulation*).

Słowa kluczowe: relaksacja dielektryczna, izolacja, diagnostyka, FDS.

Keywords: Dielectric Relaxation, Insulation, Diagnostic, FDS.

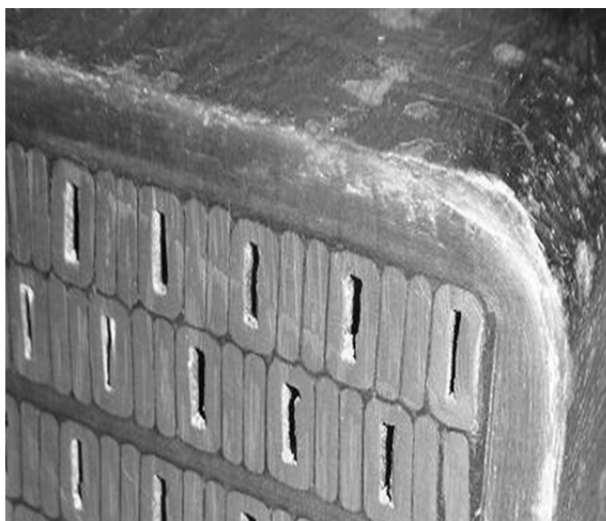
doi:10.12915/pe.2014.10.24

Wprowadzenie

Rozwój warstwowych układów izolacyjnych opartych na termoutwardzalnych kompozytach polimerowych sięga przełomu lat 30. i 40. ubiegłego wieku, kiedy opracowano tekstolit. Gwałtowny rozwój technologii chemicznych w latach następnych spowodował wprowadzenie kompozytu szelak-mika i Micadur[®] oraz żywicy epoksydowej [1].

Najczęściej stosowanym obecnie układem izolacyjnym maszyn WN jest termoutwardzalny kompozyt typu epoksy-mika-szkło. W zależności od technologicznego zaawansowania producenta, spajanie miki, maty szklanej i żywicy w jeden układ izolacyjny wykonuje się najczęściej przez przesycanie żywicą kolejnych warstw miki i maty szklanej wraz z obróbką termiczną lub ciśnieniowo-próżniową impregnację. Błędy produkcyjne powodujące obecność kawern gazowych, niedostateczną adhezję między żywicą a włóknem szklanym i miką oraz nieprawidłowe utwardzenie żywicy są przyczyną nadmiernej awaryjności maszyn WN [2]. Praktyka eksploatacyjna pokazuje, że niewłaściwie wykonana izolacja epoksy-mika-szkło maszyn WN po kilku-kilkunastu ciężkich rozruchach ulega zniszczeniu.

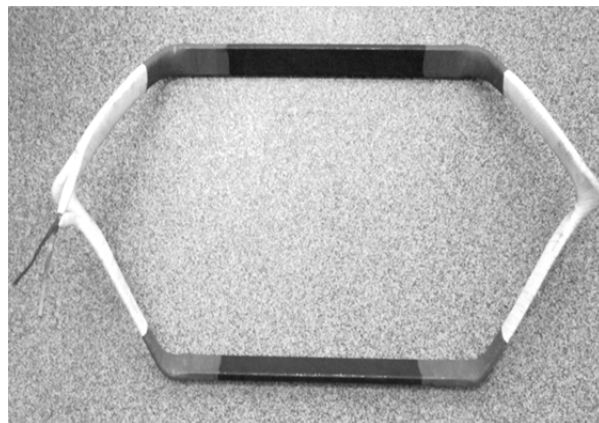
Przykładowy przekrój izolacji epoksy-mika-szkło wykonanej w technologii VPI (Vacuum Pressure Impregnated) pokazano na rysunku 1.



Rys.1. Izolacja pręta generatora 15,75kV i 270MVA typu epoksy-mika-szkło

Obiekt i metodyka badań

Obiektem badań była nowa izolacja cewki silnika o napięciu znamionowym 6 kV, mocy 200 kW (rys.2). Deklarowana przez producenta cewki klasa cieplnej odporności izolacji wynosiła 155°C (klasa F). Jest to dopuszczalna temperatura długotrwałej pracy przy dostępie powietrza. Biorąc powyższe po uwagę zastosowano następujące cykle narażenia termicznego: I – 168 godz., T = 150°C; II – 168 godz., T = 150°C; III – 168 godz., T = 160°C; IV – 504 godz., T = 160°C. Sumaryczny czas działania wysokiej temperatury wynosił 1008 godzin. Wpływ długotrwałego działania temperatury na odpowiedź dielektryczną izolacji epoksy-mika-szkło badano metodą FDS (Frequency Domain Spectroscopy) przy użyciu miernika Dirana firmy Omicron. W eksperymencie użyto komory klimatycznej firmy Feutron serii KPK.



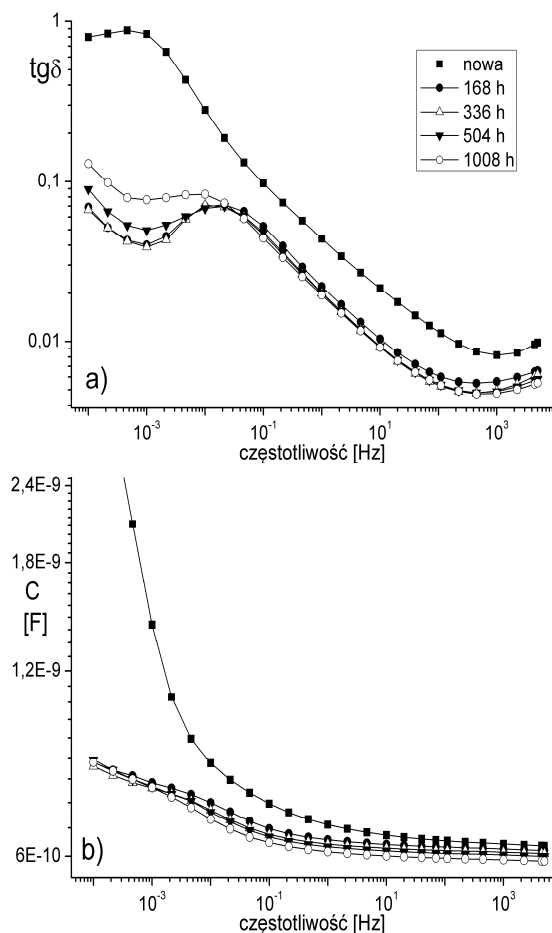
Rys.2. Obiekt badań. Cewka silnika 6kV i 200kW

Analizę danych dotyczących wpływu długotrwałego działania temperatury na procesy relaksacyjne w badanej izolacji epoksy-mika-szkło wykonano za pomocą programu WinFit firmy Novocontrol z zaimplementowaną dwuelementową zależnością Havriliaka-Negamięgo z uwzględnieniem przewodnictwa układu w postaci [3]:

$$(1) \quad \varepsilon(\omega) = -j \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right)^N + \sum_{k=2}^2 \left(\frac{\Delta \varepsilon_k}{1 + (j\omega \tau_k)^{\alpha_k}} \right)^{\beta_k} + \varepsilon_{\infty k}$$

gdzie: $\Delta \varepsilon$ - polaryzowalność, ε_{∞} - przenikalność optyczna, τ - czas relaksacji, α , β - stałe H-N, σ_0 - konduktywność.

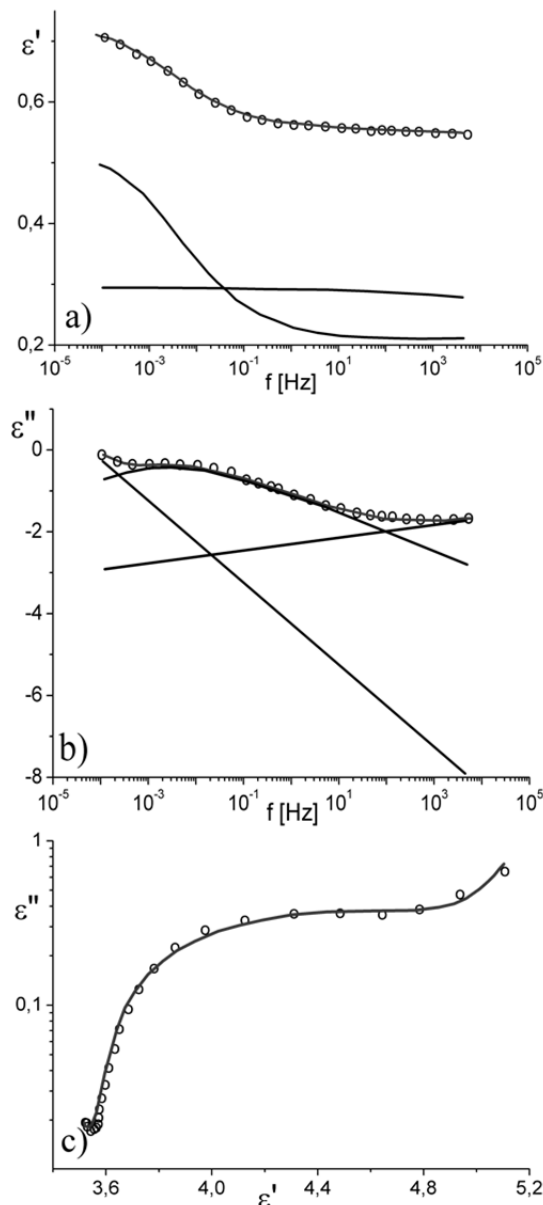
Wyniki



Rys.3. Odpowiedź dielektryczna izolacji cewki silnika 6 kV o różnym czasie termicznego starzenia, (a) zmiany $\text{tg}\delta$ (b), pojemności C

Na rysunku 3 przedstawiono częstotliwościowe charakterystyki współczynnika strat dielektrycznych i pojemności nowej izolacji epoksy-mika-szkło oraz poddanej długotrwałemu działaniu temperatury. Zaobserwowano, że zmiany współczynnika strat dielektrycznych izolacji przed starzeniem i po obróbce termicznej są relatywnie duże w całym zakresie częstotliwości. Po pierwszym cyklu działania temperatury zanotowano spadek wartości $\text{tg}\delta$ o ponad rząd wielkości. W szczególności efekt ten wystąpił w zakresie niskiej częstotliwości. Jest to rezultat procesów związanych z tzw. „kondycjonowaniem” izolacji, który generalnie polega na termicznym odprężeniu struktury, zmniejszeniu wolnych przestrzeni, usunięciu produktów utwardzania. Należy jednak podkreślić, że w tym czasie nie zachodzi dodatkowy proces sieciowania związanego z reakcją utwardzania [2]. Pomiarzy odpowiedzi częstotliwościowej wykazały, że kolejne cykle starzenia miały wpływ na wartości $\text{tg}\delta$ i pojemności jedynie w zakresie ultraniskich częstotliwości. Pokazane na rysunku 3 charakterystyki $(\text{tg}\delta, C)=f(f)$ wyjaśniają przyczynę niskiej skuteczności diagnostyki izolacji epoksy-mika-szkło opartej na pomiarze $\text{tg}\delta_{50\text{Hz}}$. Bowiern zmiany struktury izolacji stałej pod wpływem długoterminowego działania temperatury uwidaczniają się przede wszystkim w niskoczęstotliwościowej części odpowiedzi dielektrycznej. W tym zakresie zidentyfikowano strukturę relaksacyjną, której stała czasowa zmienia się po kolejnych cyklach obróbki termicznej. Dla częstotliwości około 0,001 Hz można zaobserwować spadek strat dielektrycznych po pierwszym i drugim tygodniu starzenia, a

w następnych cyklach starzeniowych ich wzrost. Prawdopodobnie na początku jest to kontynuacja procesów kondycjonowania izolacji, ale po dłuższym okresie narażenia na wysoką temperaturę powstają niskocząsteczkowe produkty rozkładu kompozytu oraz postępującego rozwarstwienia kompozytu epoksy-mika-szkło.



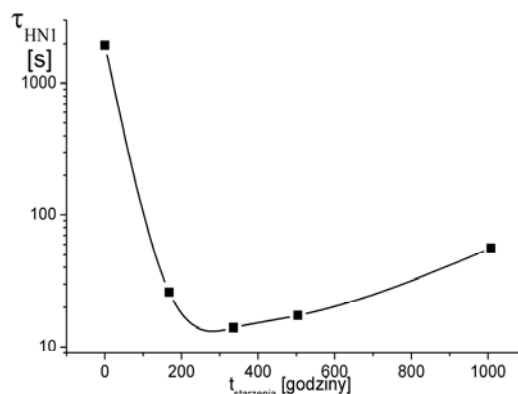
Rys.4. Przykład analizy procesów dielektrycznych w izolacji epoksy-mika-szkło po IV cyklu termicznym z wykorzystaniem równania H-N: a) część rzeczywista przenikalności elektrycznej, b) część urojona przenikalności elektrycznej, c) wykres Cole-Cole

W pracy [2] wykazano m.in. że dla stechiometrycznie utwardzonej izolacji epoksy-mika-szkło o prawidłowej morfologii dominującymi procesami jest t.z.w niskoczęstotliwościowa relaksacja dielektryczna oraz przewodnictwo elektryczne. Zgodnie z „uniwersalnym” prawem Jonschera częstotliwościowy obraz tych procesów nie może zawierać lokalnego maksimum w $\text{tg}\delta$. Dlatego obserwowane na rysunku 3a lokalne ekstremum $\text{tg}\delta$ wynika z obecności dodatkowych procesów, których przyczyną jest niestechiometryczne utwardzenie żywicy i występowanie tzw. „fazy gumy” na granicy faz pomiędzy żywicą a młkłą lub żywicą a włóknem szklanym.

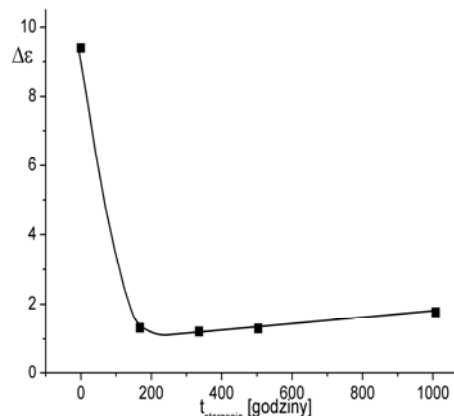
Tabela 1. Parametry relaksacji w rdzeniu przepustu PTK 52/250/630 o różnym czasie starzenia

Izolacja nowa					
Konduktywność		H-N 1		H-N 2	
σ_0 [S/m]	4,7 e-15	$\Delta\epsilon$	9,4	$\Delta\epsilon$	0,45
		τ	1954	τ	4,8 e-7
N	1	ϵ_∞	1,83	ϵ_∞	1,83
		α	0,39	α	0,24
		β	1	β	1
po 1 tygodniu starzenia					
Konduktywność		H-N 1		H-N 2	
σ_0 [S/m]	2,7 e-17	$\Delta\epsilon$	1,32	$\Delta\epsilon$	0,5
		τ	26	τ	1,4 e-8
N	1	ϵ_∞	1,64	ϵ_∞	1,58
		α	0,5	α	0,22
		β	1	β	1
po 2 tygodniu starzenia					
Konduktywność		H-N 1		H-N 2	
σ_0 [S/m]	1,5 e-17	$\Delta\epsilon$	1,21	$\Delta\epsilon$	0,5
		τ	14	τ	1 e-8
N	1	ϵ_∞	1,63	ϵ_∞	1,6
		α	0,51	α	0,21
		β	1	β	1
po 3 tygodniu starzenia					
Konduktywność		H-N 1		H-N 2	
σ_0 [S/m]	1,8 e-17	$\Delta\epsilon$	1,3	$\Delta\epsilon$	0,36
		τ	17	τ	2,2 e-8
N	1	ϵ_∞	1,64	ϵ_∞	1,65
		α	0,5	α	0,2
		β	1	β	1
po 6 tygodniach starzenia					
Konduktywność		H-N 1		H-N 2	
σ_0 [S/m]	2,7 e-17	$\Delta\epsilon$	1,77	$\Delta\epsilon$	0,37
		τ	56	τ	2,2 e-8
N	1	ϵ_∞	1,6	ϵ_∞	1,6
		α	0,47	α	0,18
		β	1	β	1

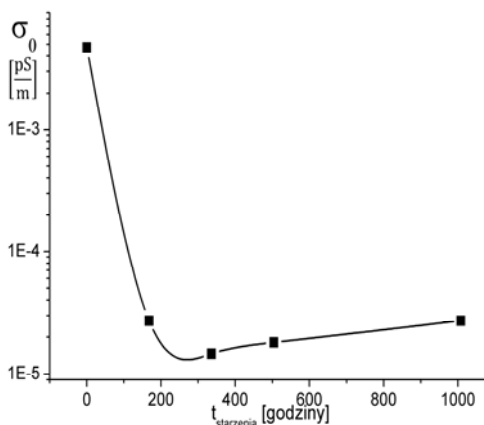
Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe wyniki analizy procesów relaksacyjnych części rzeczywistej (rys.4a) i urojonej (rys.4b) przenikalności elektrycznej izolacji epoksy-mika-szkło po ostatnim cyklu termicznym tzn. po 1008 godzinach starzenia. Natomiast wyznaczone z równania (1) parametry relaksacji podano w tabeli 1. Na tej podstawie stwierdzono, że w zakresie niskich częstotliwości obecny jest jeden dominujący proces, co dodatkowo jest widoczne na wykresie Cole-Cole (rys.4c). Analogiczne procesy obserwowano również w przypadku wcześniejszych cykli starzenia termicznego. Obliczona z równania (1) stała czasowa dodatkowego procesu relaksacyjnego w izolacji nowej wynosiła $\tau_0 = 1954$ s. Natomiast po 1 tygodniu starzenia uległa skróceniu do wartości $\tau_1 = 26$ s. Dalszy cykl termiczny spowodował skrócenie tej stałej czasowej do wartości $\tau_2 = 14$ s ale już po 3 i 6 tygodniach starzenia jej wartość wzrosła odpowiednio do $\tau_3 = 17$ s i $\tau_6 = 56$ s. Zmiany stałej czasowej procesu LF od czasu starzenia charakteryzują się widocznym minimum (rys.5). Prawdopodobnie związane jest to z dwoma występującymi jednocześnie procesami fizykochemicznymi. Pierwszy związany jest z morfologicznym porządkowaniem struktury kompozytu pod wpływem działania temperatury, drugi zaś z istotnym termicznym starzeniem. Optimum wspólnego znoszenia się tych dwóch zjawisk występuje pomiędzy pierwszym, a drugim tygodniem obróbki termicznej, co dodatkowo znajduje potwierdzenie w najmniejszej wartości współczynnika strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ w zakresie LF (rys.3a).



Rys.5. Wyznaczona z równania (1) zależność stałej czasowej niskoczęstotliwościowego procesu relaksacyjnego od czasu starzenia



Rys.6. Zależność polaryzowalności $\Delta\epsilon$ od czasu starzenia



Rys.7. Zależność konduktywności zmiennoprądowej σ_0 od czasu starzenia

Uzyskane wartości współczynnika $\alpha \approx 0,4-0,5$ dowodzą, że proces niskoczęstotliwościowy charakteryzujący się dość szerokim rozkładem stałych czasowych polaryzacji dipolowej jest charakterystyczny dla termoutwardzalnych izolacji kompozytowych (tab. 1) [5]. Zauważono również spadek polaryzowalności z wartości $\Delta\epsilon = 9,4$ dla nowej izolacji do $\Delta\epsilon = 1,21$ po drugim cyklu starzenia oraz konduktywności z $\sigma_0 = 4,7 \cdot 10^{-15}$ S/m do $\sigma_0 = 1,5 \cdot 10^{-17}$ S/m, co zwykle jest związane z porządkowaniem fazy amorficznej (rys.6 i 7). Dalsze cykle termiczne powodowały wzrost tych parametrów co świadczy o rozpoczęciu procesów starzeniowych. Natomiast w wysokoczęstotliwościowej części charakterystyki FDS zidentyfikowano względnie

stabilną sumaryczną β -relaksację ugrupowań bocznych żywicy. Charakteryzowała się ona bardzo szerokim rozkładem czasów własnych ($\alpha \approx 0,18 \div 0,24$) [6].

Wnioski

Gwałtowny spadek współczynnika strat dielektrycznych $\tan \delta$ badanej izolacji po pierwszym tygodniu starzenia jest prawdopodobnie związany z procesami „kondycjonowania” żywicy i zaniku procesu α -relaksacji oraz morfologicznym porządkowaniem struktury kompozytu.

Z fizycznego punktu widzenia w normalnej temperaturze we właściwie wykonanej izolacji epoxy-mika-szkło nie powinno występować lokalne maksimum $\tan \delta$ w częstotliwościach z zakresu LF. Obserwowana relaksacja w tym zakresie wynika z niestechiometrycznego utwardzenia żywicy i występowania tzw. „fazy gumy”.

Testy wykazały, że „czas życia” tej izolacji w silnikach pracujących w ciężkich warunkach będzie znacznie krótszy. Bowiem jak to pokazano na rysunku 5 i 6 temperatura pracy izolacji równa deklarowanej klasie cieplnej odporności już po około 300 h dodatkowo wyzwała istotne procesy starzeniowe. Należy podkreślić, że w prawidłowo wykonanej izolacji epoksy-mika-szkło podobna kinetyka rozwoju procesów starzeniowych powinna zachodzić dopiero przy temperaturze o $30 \div 40$ °C wyższej od klasy ciepłoodporności [7,8].

Metoda FDS może stanowić miarodajne narzędzie badań nieniszczących izolacji epoksy-mika-szkło zarówno na etapie produkcji jak i podczas eksploatacji [9].

LITERATURA

- [1] MICADUR – COMPACT INDUSTRY Insulation System for Rotating Electrical Machines – <http://www.docstoc.com>, zasoby internetowe w dniu 06.05.2014

- [2] Subocz J., Przewodnictwo i relaksacja dielektryczna warstwowych układów izolacyjnych, Wydawnictwo Uczelniane Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, Szczecin 2012
- [3] Havriliak S. Jr., Havriliak S. J.: Dielectric and Mechanical Relaxation in Materials. Analysis, Interpretation, and Application to Polymers, Hanser Publishers, Munich, Vienna, New York, 1997
- [4] Florkowska B., Diagnostyka wysokonapięciowych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, Wydawnictwa AGH, Kraków 2009
- [5] Subocz J.: Zastosowanie FDS do diagnostyki izolacji generatorów WN, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2008, nr.10, 199-202
- [6] Subocz J., Zenker M., Mroziak A.: Analiza procesów relaksacyjnych w starzonym termicznie przepięciu z izolacją stałą, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2012, nr.11b, 212-214
- [7] Subocz J., Szrot M., Płowucha J.: „Nowoczesne metody diagnostyki izolacji silników i generatorów WN”, *Napędy i Sterowanie*, 2008, Nr 5, 116-121,
- [8] Subocz J., Szrot M., Płowucha J.: „Nowoczesne metody diagnostyki izolacji silników i generatorów WN”, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 2006, Nr 74, 121-128,
- [9] Subocz J.: „Ocena izolacji maszyn WN podstawie zjawisk relaksacyjnych – pomiary eksploatacyjne”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2005, Nr 1k., 265-271

Autorzy: dr inż. Marek Zenker, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313, Szczecin, E-mail: marek.zenker@zut.edu.pl; prof. dr hab. inż. Jan Subocz, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313, Szczecin, E-mail: jan.subocz@zut.edu.pl.