



Ocena izolacji maszyn WN na podstawie zjawisk relaksacyjnych – pomiary eksploatacyjne

Streszczenie. W artykule poddano ocenie izolację maszyn WN o różnym okresie eksploatacji. Podstawą oceny były pomiary zmian współczynnika strat oraz pojemności uzwojeń w zakresie niskich częstotliwości. Do jakościowej analizy relaksacji dielektrycznej wykorzystano równanie Havriliaka-Negami. Wykazano, że analiza ta może być podstawą metody oceny stanu izolacji. Wnioski porównano z pomiarami DSC oraz z metodą diagnostyki izolacji przy zastosowaniu testu rampy napięciowej.

Abstract. (Assessment of hv machines insulation state by means of relaxation phenomena - exploitation measurements). The article presents the results of diagnosis of "epoxy-mica-glass" HV motors insulation with different time in service. The diagnosis based on the measurements of the loss factor and coil capacity in range 0,1 MHz - 1 MHz. For quantitative evaluating of the dielectric relaxation processes the Havriliak-Negami equation was used. This analysis could be the basis for evaluation of insulation state. Results were compared to DSC and method insulation diagnosis according to the voltage ramp test.

Słowa kluczowe: relaksacja, izolacja epoksy-mika-szkło, diagnostyka
Keywords: relaxation, epoxy-mica-glass insulation, diagnosis

Wstęp

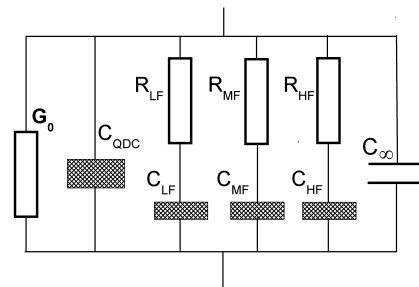
Różne modele starzeniowe zwracają uwagę na istotną rolę naprężeń mechanicznych, wibracji oraz temperatury w rozwoju drzewienia elektrycznego w izolacji maszyn WN typu „epoksy-mika-szkło” [1,2]. Wywołane przez te czynniki procesy delaminacji interfejsu z większą kinetyką zachodzą w niestechiometrycznie utwardzonej izolacji lub o osłabionej adhezji między żywicą a zbrojeniem. Wibracje i naprężenia mechaniczne zmieniają morfologię warstwowego układu izolacyjnego przede wszystkim na drodze przekształceń fizycznych bez znaczących reakcji chemicznych. Przykładowo, może to być zmiana gęstości upakowania struktury i rozrywanie istniejących w interfejsie wiązań adhezyjnych, które są pochodną działania sił Van der Waallsa czy też sił tarcia mechanicznego. Natomiast oddziaływanie temperatury wiąże się na ogół z dodatkowymi przemianami chemicznymi. Jednak w temperaturze niższej od temperatury zeszklenia matrycy polimerowej (T_g) dominującymi procesami są chemiczne reakcje dotwardzania oraz fizyczna relaksacja układu izolacyjnego. Procesy rzeczywistego termicznego starzenia izolacji wymagają temperatury przekraczającej o kilkadziesiąt stopni punkt T_g . Dłuższe i częstsze, poprzez procesy przejściowe, stwarza warunki do delaminacji i rozwoju drzewienia elektrycznego. Stąd, w eksploatacji kompozytowej izolacji maszyn WN sprawą niezwykle istotną jest zarówno odpowiednio niska temperatura pracy jak również kontrola jakości wykonania cewek stojana z punktu widzenia poprawnej technologii utwardzania kompozytu. Wydaje się przy tym, że dla trwałości izolacji ten drugi czynnik jest daleko ważniejszy niż warunki pracy maszyny.

Zachodzące podczas utwardzania, fizycznej relaksacji oraz starzenia przemiany morfologii izolacji koncentrują się głównie w obszarze granicy faz „zbrojenie – żywica epoksydowa”. Procesy te dokładniej zostały opisane w [1,2,3]. Zgodnie z ogólną zasadą Maxwella-Wagnera przekształcenia morfologii granicy faz „matryca polimerowa-zbrojenie” powodować będą generację ładunku przestrzennego, co skutkować musi zmianami w naturze relaksacji dielektrycznej. Podobne zjawiska towarzyszą również chemicznym reakcjom utwardzania i dotwardzania. Jest zrozumiałe, że oczekiwany efekt zmiany właściwości

dielektrycznych matrycy oraz interfejsu stwarza możliwość śledzenia np. kinetyki delaminacji izolacji warstwowej na drodze analizy zjawisk relaksacyjnych. Szczególnie przydatne pod tym względem są pomiary impedancji zespolonej w zakresie ultraniskich częstotliwości oraz prądów polaryzacji i depolaryzacji [3, 4].

Model dielektrycznej relaksacji w izolacji kompozytowej

Procesy dielektryczne w izolacji kompozytowej można zamodelować w postaci schematu zastępczego, w którym generalnie przyjmuje się jedną relaksację dipolową w zakresie wysokich (C_{HF}) częstotliwości oraz dwie w zakresie średnich (C_{MF}) i niskich (C_{LF}), częstotliwości (rys.1).



Rys.1. Schemat zastępczy izolacji kompozytowej

Z reguły procesy relaksacyjne w kompozytach o dużej masie molekularnej i wyraźnej granicy faz odbywają się z niesymetrycznym lub ciągłym rozkładem stałych czasowych zgodnie z uniwersalnym prawem rozproszenia Jonschera [4,5,6] lub mechanizmem Dissado-Hilla [7]. Pomiary prądów polaryzacji i depolaryzacji w modelach izolacji kompozytowej wykazały, że relaksacja według prawa ułamkowej potęgi Jonschera ($i(t) \propto t^{-(n,m)}$) zachodzi równoległe z procesami dipolowymi o pewnym rozkładzie stałych czasowych [8,9,10]. Z tego powodu, dla odwzorowania natury zjawisk, w modelu zastępczym izolacji kompozytowej idealne elementy C należy zastąpić kondensatorami stratnymi C_{LF} , C_{MF} , C_{HF} , które powinny spełniać warunki relaksacji dipolowej według Jonschera. Z kolei pojemność stratna C_{QDC} reprezentuje rozproszenie stałoprądowe, konduktancja G_0 - przewodnictwo stałoprądowe a C_∞ - optyczną pojemność układu.

Przedstawiony na rysunku 1 model izolacji w dziedzinie częstotliwości, w obszarze pulsacji charakterystycznej dla zmiany mechanizmu relaksacji, można opisać funkcją Havriliaka-Negamiiego [11] w postaci:

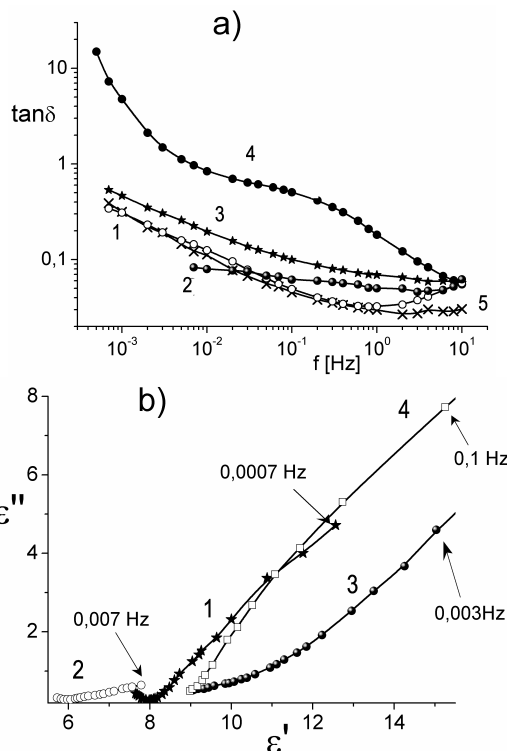
$$(1) \quad \varepsilon^*(\omega) = -j \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} \right) + \sum_{k=1}^N \left(\frac{\Delta \varepsilon_k}{(1 + (j\omega\tau_k)^{\alpha_k})^{\beta_k}} + \varepsilon_{\infty k} \right)$$

gdzie: $\varepsilon^*(\omega)$, ε_{∞} - zespolona i optyczna przenikalność elektryczna, $\Delta \varepsilon_k$ - polaryzowalność, σ_0 - przewodnictwo stałoprądowe, τ_k - uogólniona stała czasowa relaksacji o pewnym rozkładzie wartości, α_k, β_k, N - stałe, ω - pulsacja

Ocena stanu izolacji maszyn WN

Ocena stanu izolacji maszyn WN na podstawie analizy zjawisk relaksacyjnych będzie dokonana na przykładzie izolacji silników oraz generatorów WN o różnej mocy i historii eksploatacji. Wszystkie te izolacje wykonane były w technologii VPI w postaci kompozytu epoksy-mika-szkło o klasie ciepłoodporności F. Dla lepszego zrozumienia zachowań relaksacyjnych izolacji konieczna jest znajomość historii eksploatacji maszyn. Silnik nr 1, po wymianie uzwojeń, praktycznie można uznać za nowy. Silnik nr 2 pracował bez remontu uzwojenia stojana przez 10 lat we względnie łagodnych warunkach. Z obserwacji wynikało, że temperatura jego izolacji wahała się w granicach $40 \pm 70^\circ\text{C}$, a więc znacznie poniżej T_g . Silniki nr 3 oraz nr 4 eksploatowane były przez 4 lata i 10 lat przy dużych przeciążeniach. Częste rozruchy bezpośrednie pod pełnym obciążeniem (nr 3) oraz duże przeciążenia eksploatacyjne (nr 4) były przyczyną okresowego przegrzewania się izolacji nawet do temperatury rzędu $130 \pm 150^\circ\text{C}$. Natomiast w przypadku generatora pomiaru wykonano w nowym i eksploatowanym przez 4 lata pręcie uzwojenia generatora 15,75 kV, 230 MVA. Z porównania historii maszyn wynika, że uzwojenie generatora poddane było najmniejszemu skumulowanemu narażeniu eksploatacyjnemu, w drugiej kolejności uzwojenie silnika nr 2, zaś największych zmian należy oczekiwać w izolacji silników nr 3 i nr 4.

obniżenie się $\Delta \varepsilon$ (od 46 do 8,03), czasów relaksacji τ (z $1,3 \cdot 10^4$ s do $1,7 \cdot 10^3$ s) oraz współczynnika rozkładu czasu relaksacji α (od 0,66 do 0,22) dowodzą głębokich zmian morfologii w obszarze interfazy matryca-zbrojenie. Podobne prawidłowości obserwowano również w izolacji stojana generatora 15,75 kV, 230 MVA (rys.3), przy czym krótszy okres eksploatacji oraz niższa temperatura pracy spowodowały relatywnie mniejsze zmiany polaryzowalności $\Delta \varepsilon$ oraz pojemności i w konsekwencji mniejsze przesunięcie się charakterystyk C-C po osi ε' .



Rys.2. Zależności $\tan \delta = f(f)$ (a) oraz wykresy Cole-Cole (b) dla izolacji silników 6 kV. Krzywe 1+4 - odpowiednio silniki nr 1+4, krzywa 5 - nowa cewka uzwojenia stojana

Tablica.1. Parametry równania H-N dla $f < 10$ Hz w izolacji stojanów silników i prętów generatora

| Parametr | Silniki 6kV | | | | Generator 15,75 kV, 230 MVA | |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------------------|------------------------|
| | Nr 1 200 kW | Nr 2 200 kW | Nr 3 200 kW | Nr 4 1250 kW | Nowe uzwojenie | 4 lata eksploatacji |
| σ_0 [S/cm] | 1e-20 | 5e-17 | 4e-15 | 1e-13 | 5e-16 | 5e-16 |
| N | 0,14 | 0,64 | 0,82 | 1,00 | 0,89 | 1,00 |
| $\Delta \varepsilon$ | 45,62 | 8,03 | 51,63 | 53,36 | 2,02 | 1,62 |
| τ [s] | 1,3e+4 | 1,7e+3 | 2,3e+04 | 2,8e+01 | 820 | 820 |
| α | 0,66 | 0,22 | 0,38 | 0,56 | 0,47 | 0,43 |

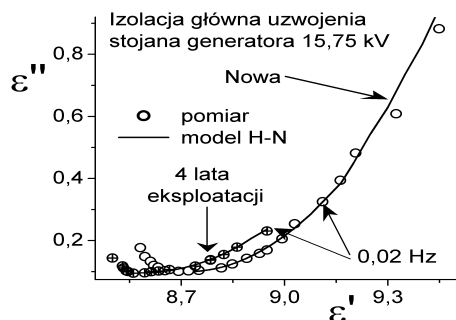
Z przedstawionych na rysunku 2 zależności $\tan \delta = f(f)$ wynika, że dla częstotliwości niższych od 0,1 Hz izolacja nowego silnika ma wyraźnie większe straty dielektryczne w porównaniu do silnika nr 2 oraz zbliżone do strat w izolacji silnika nr 3 (odpowiednio krzywe 1,2,3). Natomiast długotrwała eksploatacja spowodowała przede wszystkim istotne zmiany w pojemności uzwojeń, czyli w składowej rzeczywistej zespolonej przenikalności dielektrycznej (charakterystyki $\varepsilon'' = f(\varepsilon')$ - rys.2b).

Z jakościowej analizy relaksacji w zakresie VLF (tablica 1, rys.2.b) wynika, że długoletnia praca we względnie niskiej temperaturze (silnik Nr 2) skutkuje przede wszystkim skróceniem czasów relaksacji τ , mniejszą polaryzowalnością $\Delta \varepsilon$ oraz wzrostem przewodnictwa σ , głównie o jonowym charakterze (wzrost współczynnika N z 0,14 do 0,64). Bardzo duże, w porównaniu do nowej izolacji,

Pokazane w tablicy 1 parametry prowadzą do wniosku, że w izolacji silnika nr 2 oraz izolacji pręta generatora po 4 latach eksploatacji morfologia interfazy wykazuje charakterystyczne przekształcenia dla wczesnego okresu starzenia [8,9,10]. Polega on głównie na procesach fizycznej relaksacji, stabilizacji właściwości fizyko-chemicznych oraz poprawie parametrów mechanicznych. Na tej podstawie uprawniona jest pozytywna ocena stanu izolacji silnika nr 2 oraz izolacji głównej pręta generatora 15,75 kV, 230 MVA. Natomiast w przypadku silników nr 3 i 4 obserwowano objawy istotnego starzenia izolacji, które w szczególności dotyczyły silnika nr 4. Bardzo duża wartość $\Delta \varepsilon$, krótki czas relaksacji $\tau = 28$ s sugerują obecność w interfacie dużego, ruchliwego ładunku przestrzennego, co może oznaczać delaminację izolacji oraz obecność wtrąceń charakterystycznych dla III lub IV fazy jej degradacji [1,12].

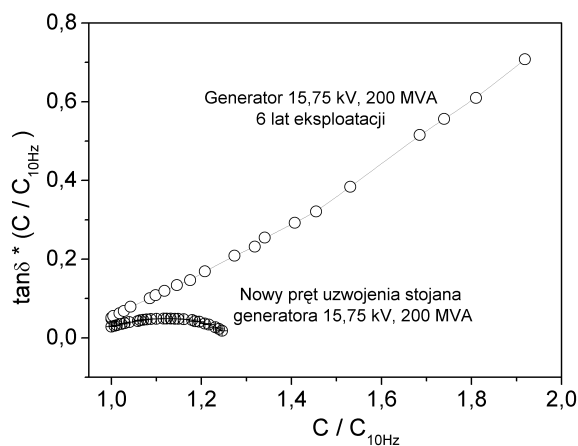
Spostrzeżenia te potwierdza duże przewodnictwo jonowe ($\sigma_0 = 0,1 \text{ pS/cm}$) oraz obserwowany w pomiarach prądu polaryzacji wyraźny efekt anormalnej relaksacji spowodowany nośnikami ładunku o ruchliwości $\mu = 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{Vs}$.

Istotna różnica między relaksacjami nowego uzwojenia silnika nr 1 oraz nowego pręta generatora dotyczyła wartości polaryzowalności $\Delta\epsilon$ i stałej czasowej τ . Ich główną przyczyną jest niestechiometrycznie utwardzona izolacja silnika, która charakteryzuje się dużą ilością przestrzeni swobodnych i fazy lepkosprężystej [3,13].



Rys.3. Zależności Cole-Cole (b) dla izolacji generatorów wykonanej w technologii MICADUR

Ocenę stanu izolacji z wykorzystaniem analizy procesów relaksacyjnych przeprowadzono również dla izolacji „epoksy-mika-szkło” wykonanej metodą nakładania i przesykania warstw. Obiektem pomiarów był generator 15,75 kV, 200 MVA, po 6-letniej eksploatacji oraz nowy, zapasowy pręt uzwojenia stojana. Wyniki pomiarów w postaci zależności Cole-Cole pokazano na rysunku 4, przy czym zmiany pojemności podano w odniesieniu do wartości zmierzonych przy częstotliwości 10 Hz. Analiza relaksacji na płaszczyźnie C-C (tablica 2) wykazała, że w nowym pręcie występuje wyraźna struktura relaksacyjna o stałej czasowej $\tau = 1,4$ sekundy.



Rys.4. Zależności Cole-Cole dla izolacji generatora 15,75 kV wykonanej metodą nakładania i przesykania warstw.

Współczynniki rozkładu czasów relaksacji ($\alpha = 0,33$) oraz asymetrii ($\beta = 1$) świadczą, że jest to relaksacja o szerokim rozkładzie tych czasów według mechanizmu Cole-Cole. Eksploatacja przez 6 lat izolacji (generator TB3) spowodowała zmianę natury relaksacji do często spotykanego w polimerach mechanizmu Havriliaka-Negamiiego (wartości współczynników $\alpha, \beta \approx 0,58$). Zespół parametrów wskazuje na to, że nastąpiło ujednoczenie struktur relaksacyjnych (mniejszy rozkład stałych czasowych) przy zwiększeniu asymetrii rozkładu struktur dipolowych. Niewielki spadek polaryzowalności $\Delta\epsilon$ oraz duży wzrost stałej czasowej do wartości $\tau \approx 220$ sekund przemawia za większym stopniem

uporządkowania. Tak więc, po okresie 6 lat pracy generatora TB3, zmiany morfologii izolacji były typowe dla procesów dotwardzania i fizycznej relaksacji przebiegających w temperaturze znacznie niższej od temperatury zeszklenia T_g .

Tablica 2. Parametry równania H-N opisującego relaksację w nowej i eksploatowanej izolacji generatora TB3 15,75 kV

| | σ_0 [S/cm] | N | $\Delta\epsilon$ | τ [s] | α | β |
|----------------|----------------------|------|------------------|---------------|----------|---------|
| Nowy pręt TB3 | 5.8e-17 | 1.00 | 2,8 | 1,4 | 0,33 | 1.00 |
| Generator TB 3 | 5.4e-16 | 0,87 | 2,1 | 220 | 0,58 | 0,58 |

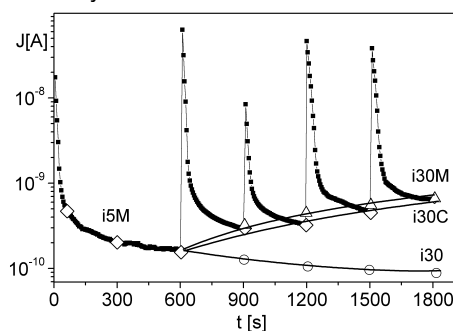
Podsumowując prezentowane pomiary FDS izolacji maszyn WN można stwierdzić, że otrzymano dużą zgodność obserwowanych w warunkach eksploatacyjnych zmian natury relaksacji z badaniami modelowymi [3,8,10]. Należy przy tym zauważyć, że interpretacja wyników znajduje głębokie uzasadnienie z punktu widzenia technologii chemicznej, fizyki polimerów oraz teorii relaksacji dielektrycznej w polimerach.

Porównanie metod oceny stanu izolacji

Jednym z podstawowych, zalecanych przez IEEE Standard No. 4, 1978 “Standard Techniques for High-Voltage Testing” testów izolacji silników i generatorów WN są pomiary absorpcji dielektrycznej metodą ramy napięciowej (skokowego wzrostu napięcia). Istotą testu ramy napięciowej jest pomiar odpowiadzi prądowej izolacji na pięć kroków napięciowych o $\Delta U = 0.3 U_N$, w zakresie od 0 do $1,5 \cdot U_N$ (rys.5). Czas trwania pierwszego kroku napięciowego - 10 minut, a pozostałych - 5 minut. Jako kryterium oceny stanu izolacji używana jest wartość K_a nazywana współczynnikiem absorpcji:

$$(2) \quad K_a = \frac{i_{30M}}{i_{30C}}$$

Współczynnik absorpcji K_a dla nowej, dobrej jakości izolacji na bazie żywic epoksydowych powinien być mniejszy od 2, podczas gdy w przypadku izolacji zdegradowanej jego wartość może wynosić nawet od 5 do 7.



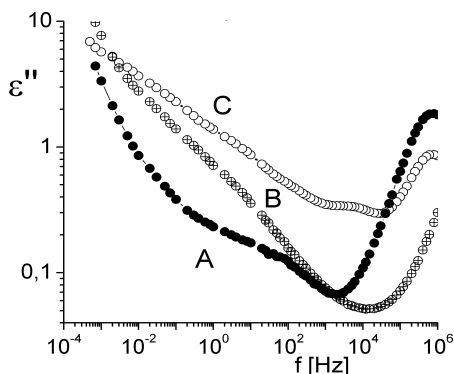
Rys.5. Przebieg testu metodą ramy napięciowej w nowej izolacji stojana silnika 6 kV

Ocenę stanu izolacji z zastosowaniem tej metody porównano z wynikami częstotliwościowej analizy relaksacji oraz analizy DSC. Do tego celu wybrano przypadki izolacji będących w odmiennych stanach jakościowych. Nową cewkę silnika WN oznaczono jako próbkę A. Próbkę B i C były fragmentami uzwojenia, w którym miało miejsce zwarcie międzyzwojowe. Część cewki, przegrzanej do około $150 \div 200^\circ\text{C}$, oznaczono jako B; jako C oznaczono fragment, w którym temperatura osiągnęła wartości $250 \div 350^\circ\text{C}$.

Wyznaczona dla próbki A wartość współczynnika absorpcji wynosiła $K_a = 0,88 \div 1,09$ (rys.5), dla próbki B

$K_a = 4,7$, natomiast dla C $K_a = 1,16$. Tak więc, na tej podstawie należy: stan izolacji próbki A określić jako dobry, izolację próbki B uznać jako zdegradowaną, podczas gdy poddana działaniu najwyższej temperatury izolacja C powinna być uważana również za dobrą.

Ten oczywisty błąd w ocenie jakości porównano z wynikami analizy zespolonej przenikalności dielektrycznej w zakresie częstotliwości 10^{-4} Hz ÷ 1MHz. (rys.6.)



Rys. 6. Charakterystyki stratności w izolacji próbek A, B, C

Wynika z niej, że przegrzanie izolacji powoduje wzrost stratności, co jest rzeczą ogólnie znaną. Natomiast nie tak oczywistym jest mniejszy zakres ich zmian częstotliwościowych. Stwierdzono występowanie we wszystkich próbkach wolnozmiennnej relaksacji o stałej czasowej τ_3 rzędu 10^4 ÷ 10^5 sek. z poszerzającym się, w miarę wzrostu termicznego narażenia, rozkładzie czasów własnych α_3 (tablica 3).

Tablica .3. Wybrane parametry równania H-N opisującego relaksację próbek A, B, C.

| Próbka | A | B | C |
|--------------------|---------------------|----------------|-------------------|
| $\Delta\epsilon_2$ | 1,16 | 2,00 | 0,29 |
| τ_2 [s] | $8,2 \cdot 10^{-2}$ | 16,1 | $3 \cdot 10^{-5}$ |
| α_2 | 0,42 | 0,44 | 0,78 |
| $\Delta\epsilon_3$ | 98 | 36 | 67 |
| τ_3 [s] | $6,4 \cdot 10^4$ | $1 \cdot 10^5$ | $1 \cdot 10^5$ |
| α_3 | 0,68 | 0,37 | 0,29 |

Jest to polaryzacja towarzysząca transportowi masy jonowej na odległości makroskopowe. Z drugiej strony, temperatury zwarcia niewiele przekraczające punkt przemiany fazowej T_g , mogą inicjować przejściowe reakcje chemiczne prowadzące do powstawania struktur o dłuższym czasie relaksacji (wzrost τ_2 dla próbki B do 16,1 sek.). Oddziaływanie znacznie wyższej temperatury (próbka C) spowodowało natomiast dalsze ich przekształcenie w kierunku wolnozmiennych struktur amorficznych (spadek $\Delta\epsilon_2$ oraz wzrost $\Delta\epsilon_3$).

Wnioski wypływające z analizy relaksacji dielektrycznej zweryfikowano pomiarami DSC. Wykazały one, że temperatura T_g w nowej cewce (A) wynosi 114,4 °C, natomiast dla próbek B i C zanotowano jej spadek do wartości odpowiednio 80,4 °C oraz 77,9 °C. Stwierdzono także wzrost pojemności cieplnej C_v , od wartości $2,7 \cdot 10^{-3}$ J/g·deg (próbka A) do $9,3 \cdot 10^{-3}$ J/g·deg (próbka B) oraz następnie obniżenie do wartości $5,7 \cdot 10^{-3}$ J/g·deg (próbka C). Znaczne obniżenie się wartości T_g wskazuje na to, że w wyniku zwarcia nastąpił proces degradacji termicznej żywicy. W przypadku próbki B, powstała struktura o większej gęstości przestrzennego upakowania, o czym świadczy wzrost C_v , w porównaniu do próbki A, co z reguły odpowiada mniejszej polaryzo-

walności interfazy ($\Delta\epsilon_3 = 36$). Z kolei, na skutek działania wyższych temperatur (próbka C) struktura żywicy rozpadła się na bardziej luźne makrocząsteczki tworzące fazę amorficzną o większej zawartości wolnych przestrzeni oraz większej polaryzacji ładunku przestrzennego (spadek w stosunku do próbki B wartości C_v i wzrost $\Delta\epsilon_3$).

Wartości parametrów opisujących rozproszenie dielektryczne w próbce A wskazują na jej niestechiometryczne utwardzenie, co już omówiono wcześniej. Natomiast zbieżność wyników pomiarów DSC oraz analizy relaksacji dielektrycznej zarówno w zakresie HF jak i VLF wskazuje jednoznacznie na większą degradację żywicy w próbce C w porównaniu do B.

W podsumowaniu można stwierdzić, że interpretacja pomiarów zespolonej stałej dielektrycznej prowadzi do podobnych wniosków jak te, które wypływają z bezpośrednich analiz chemicznych. Natomiast metoda określenia jakości izolacji na podstawie np. wartości współczynnika absorpcji K_a w teście rampy napięciowej nie zawsze daje prawidłową ocenę. Powyższe rozbieżności dotyczą zwłaszcza niestechiometrycznie utwardzonej izolacji i izolacji poddanej oddziaływaniu temperatur znacznie wyższych niż punkt przemiany fazowej.

LITERATURA

- [1] Tanaka T., Aging of Polymeric and Composite Insulating Materials. Aspects of Interfacial Performance in Aging, *IEEE Trans. DEI*, vol.9. No 5, (2002), pp.704-716
- [2] Kimura K, Kaneda Y, The Role of Microscopic Defects in Multistress Aging of Micaceous Insulation, *IEEE Trans. DEI*, vol.2, (1995), pp.426-432
- [3] Subocz J., Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki izolacji, *Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej*, Nr 580, Szczecin, 2003
- [4] Seifert J.M., Stietzel U., Kärner H.C., The Aging of Composite Insulating Materials – New possibilities to detect and classify ageing phenomena with dielectric diagnosis tools, *Proc. of IEEE Int. Symp. on El. Ins.*, Virginia, USA, (1998), pp.373-377
- [5] Jonscher A., Dielectric relaxation in solids, *J.Phys. D: Appl.Phys.*, 32, (1999), pp.57-70
- [6] Jonscher A.K., The Universal Dielectric Response and Its Physical Significance, *IEEE Trans. El. Insulation*, vol. 27, No 3, (1992), pp.407-423
- [7] Dissado L.A., Hill R.M., A Cluster Approach to the Structure of Imperfect Materials and Their Relaxation Spectroscopy, *Proc. Roy. Soc. London*, vol.390, (1983), pp.131-180
- [8] Subocz J., Michalczyk M., Relaksacja dielektryczna w izolacji szkło-epoksydowej poddanej termiczno-napięciowemu starzeniu, *VII Sym. EU'99*, Zakopane, (1999), s.451-457.
- [9] Michalczyk M., Subocz J., Izotermiczny prąd relaksacji w laminatach szkło-epoksydowych, *IV Symposium IW-98*, Poznań, (1998), s.167-170
- [10] Subocz J., Dielectric spectroscopy of insulation composite materials", *IEEE 7th International Conf. on Solid Dielectric*, Eindhoven, (2001), pp.333-336
- [11] 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
- [12] Schrijver C., Herden A., Kärner H., Fundamental Ageing Mechanisms of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Insulators, *10th ISH*, Montreal, (1997)
- [13] Subocz J., Influence of vibrations on dielectric properties of "epoxy-mica-glass" insulation, *Proc. Int. Conf. APTADM-04*, Wrocław, (2004)

Autor: dr hab. inż. Jan Subocz, Politechnika Szczecińska, Instytut Elektrotechniki, ul Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: jan.subocz@ps.pl;