

Jan Subocz<sup>1</sup>

## O PRZEWODNICTWIE ELEKTRYCZNYM W IZOLACJI STOJANA GENERATORA

**Streszczenie:** Praca omawia wyniki pomiarów prądów polaryzacji i depolaryzacji w izolacji pręta generatora. Pomiary te wykonano na rzeczywistym modelu pręta stojana generatora 10,5 kV wykonanego według standardowej technologii. Przed pomiarami pręt pracował w nominalnych warunkach pracy (70°C oraz 10,5 kV AC) w okresie 1652 h. Pomiary wykazały przewagę procesów związanych z transportem masy nad zjawiskami relaksacyjnymi. Obserwowano duży wpływ biegunowości napięcia na wartości prądu skrośnego, jego zmiany w czasie oraz energię aktywacji procesu przewodzenia. Analiza długookresowych rejestracji prądu przewodnictwa (powyżej  $10^5$  sek) w różnych temperaturach wskazała, że przewodnictwo elektryczne w izolacji pręta posiada cechy przewodnictwa elektrolitów stałych posiadających nośniki ładunku o dużej różnicy ruchliwości. Wykonane pomiary rozproszenia dielektrycznego w dziedzinie niskich częstotliwości oraz badania modelowe potwierdziły wnioski analizy.

**Słowa kluczowe:** przewodnictwo elektryczne, izolacja generatora

### 1. WSTĘP

We współczesnej technice izolacyjnej stale rośnie ilość i zakres stosowania kompozytów termoutwardzalnych jako izolacji maszyn i urządzeń. Świadczy o tym choćby dynamiczny rozwój produkcji transformatorów suchych o coraz większych mocach i napięciach, czy też rozwój izolacji generatorowej i maszyn elektrycznych. Jednocześnie pojawiły się problemy związane z diagnostyką izolacji i określeniem jej stanu technicznego w kontekście przedłużającej się eksploatacji. Większość stosowanych i rozwijanych obecnie metod diagnostycznych opartych jest na wyznaczeniu w różny sposób i późniejszej analizie rozproszenia dielektrycznego w układzie izolacyjnym. Istotną trudnością w interpretacji uzyskanych wyników jest termodynamiczna i elektryczna niestabilność tworzyw termoutwardzalnych, która silnie zależy od historii technologicznej, kompleksu narażeń środowiskowych, czasu pracy i zastosowanej metodyki pomiarowej.

Z drugiej strony w izolacji kompozytowej zauważa się dwa odmienne mechanizmy zmian fizyko-chemicznych zwane umownie starzeniem wstępnym i zasadniczym. Starzenie wstępne jest w istocie procesem stabilizacji i relaksacji materiału po produkcji, która

<sup>1</sup> Politechnika Szczecińska

prowadzona jest przeważnie w temperaturach przekraczających punkt przemiany fazowej. Konieczność poprodukcyjnego schładzania do temperatury otoczenia powoduje powstawanie w polimerze struktur szkła przechłodzonego z dużymi wewnętrznymi naprężeniami mechanicznymi. Ponadto w kompozycie znajdują się pozostałości nie utwardzonego polimeru, utwardzacza, rozpuszczalników i ubocznych produktów utwardzania takich jak kwasy, woda czy też wtrąciny gazowe. W istotny sposób na właściwości elektryczne całego kompozytu może wpływać układ napelniający (włókno szklane, mika, nieorganiczne tlenki) oraz morfologia interfazy między napelniaczem a żywicą. Wpływ interfazy na końcowe parametry elektryczne rośnie w przypadku układu izolacyjnego, gdzie żywica spełnia rolę lepiszcza dla kolejnych warstw miki i tkaniny szklanej (np. w izolacji typu „micadur“).

W wyniku stosowania obróbki termicznej po produkcji a także w pierwszym okresie eksploatacji następuje dodatkowe sieciowanie kompozytu, odparowanie substancji lotnych a także relaksacja fizyczna i redukcja wolnych przestrzeni. W rezultacie następuje poprawa właściwości kompozytów: np. wzrost rezystywności i wytrzymałości, spadek stratności, relaksacja wewnętrznych naprężeń mechanicznych oraz ograniczenie chłonności wody i wilgoci. Należy przy tym podkreślić, że przez produkcyjne czy też eksploatacyjne kondycjonowanie polimerów nie jest możliwe uzyskanie optymalnej struktury makromolekularnej, którą otrzymuje się tylko przy prawidłowo prowadzonym procesie utwardzania. Po pewnym okresie starzenia wstępnego właściwości fizyczne kompozytów ustalają się i należy je traktować jako wyjściowe w dalszym, właściwym starzeniu.

Natomiast starzenie istotne wynika z dominacji procesów przemian chemicznych struktury nad procesami relaksacji fizycznej. Powoduje on stałe pogorszenie się właściwości elektrycznych i mechanicznych. W przypadku izolacji typu micadur może to być np. całkowita destrukcja lepiszcza i utrata jakichkolwiek właściwości mechanicznych. Zachowanie się kompozytów w tym etapie starzenia może być podstawą prognozowania jego żywotności oraz określania zakresu jego stosowania.

Przedstawione powyżej w dużym uproszczeniu mechanizmy starzenia znajdują swe odbicie m.in. w zmianach rozproszenia dielektrycznego w izolacji. Dużą nadzieję przy śledzeniu tych przemian wiąże się z intensywnie rozwijaną obecnie techniką pomiaru rozproszenia w zakresie niskich częstotliwości (ULF). Pozwala ona wyznaczać impedancję zespoloną układu z pomiaru przy zastosowaniu sinusoidalnej fali napięciowej lub prostokątnego impulsu napięcia stałego. Zakłada się przy tym pełną adekwatność obu tych sposobów. Zatem poprzez zastosowanie odpowiednich przekształceń Fouriera lub Laplace'a można uzyskać np. zależność częstotliwościową impedancji z pomiarów wykonanych w dziedzinie czasu.

Z drugiej strony pomiary wykonane w rzeczywistych układach izolacji stałej wykazały, że w zakresie niskich częstotliwości procesy przewodnictwa elektrycznego dominują nad klasycznie pojmowanymi procesami relaksacyjnymi [1]. Oznacza to, że w tym zakresie częstotliwościowym impedancję zespoloną określać będzie przewodnictwo elektryczne, które w tego typu materiałach związane jest z hoppingiem jonów i transportem masy jonowej na odległości makroskopowe. Wynika stąd konieczność dokładniejszego rozpoznania istoty zjawisk przewodnictwa elektrycznego w kontekście wyboru i stosowania odpowiedniej metody wyznaczania zespolonej impedancji rozproszenia w izolacji stałej.

Niniejsza praca przedstawia analizę fenomenologiczną przewodnictwa elektrycznego w izolacji stałej stojana generatora opartej na kompozycie żywica termoutwardzalna-szkło-mika. Bezpośrednim impulsem do tej analizy było stwierdzenie, że izolacja ta, w za-

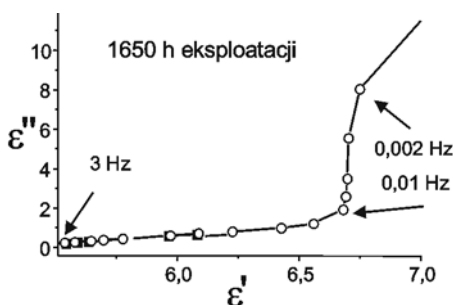
kresie niskich częstotliwości, wykazuje cechy typowe dla elektrolitów stałych o dużej różnicy między rezystancją transportu jonów a impedancją ich wymiany z elektrodami.

## 2. METODYKA

Do pomiarów użyto fragmentu pręta stojana generatora 15 kV z izolacją wykonaną przy użyciu tasmy ERGOPOR wg standardowej technologii. Warstwa izolacji naniesiona była na pręt miedziany. Wykonano także zewnętrzną powłokę przeciwwarzeniową w postaci warstwy kompozytu żywiczno-grafitowego. Ponadto wykonano porównawcze pomiary przewodnictwa izolacji prętów uzwojenia stojana generatora 15 kV typu GTHW-230-2A o mocy 270 MVA. Do wyznaczenia czasowych zależności prądu polaryzacji i depolaryzacji użyto miernika KEITHLEY 7248A sterowanego programem opracowanym w Zakładzie Wysokich Napięć i Elektrotechnologii P.Sz.. Pozwala on na automatyczną zmianę m.in. napięcia probierczego i częstotliwości próbkowania w czasie trwania cyklu pomiarowego.

## 3. WYNIKI I DYSKUSJA BADAŃ

### 3.1. Model pręta generatora z izolacją epoxy-mika-szkło

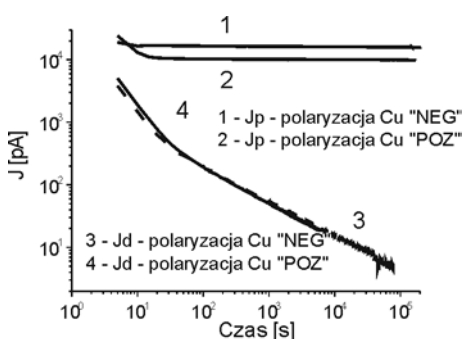


**Rys.1.** Zależność C-C, która pokazuje typowe dla elektrolitów rozproszenie w izolacji modelu pręta generatora po 1650

Na rys. 1. pokazano wykres Cole-Cole dla izolacji pręta A w zakresie częstotliwości  $3 - 10^{-3}$  Hz.. Zależność tę wyznaczono dla pręta po okresie 1650 h pracy w nominalnych warunkach ( $70^{\circ}\text{C}$ , 10,5 kV AC). Biorąc pod uwagę nagły wzrost rozproszenia w okolicach  $10^{-2}$  Hz postawiono hipotezę, że w tym przypadku, w izolacji występuje rozproszenie charakterystyczne dla elektrolitów stałych, w których oporność wymiany jonów z elektrodami jest znacznie większa od impedancji związanej z ich dyfuzją [1]. Ten dość nieoczekiwany efekt wymagał potwierdzenia od strony analizy zjawisk towarzyszących przewodnictwu elektrycznemu. Wcześniejsze pomiary rozproszenia w zakresie ULF wskazywały na to, iż w tej próbie

nie zostały zakończone procesy utwardzania. Zależność na rys.1. sugeruje również, że już dla krótkich czasów procesy przewodnictwa powinny dominować nad klasycznymi zjawiskami relaksacyjnymi. Istotnie, rys.2. pokazuje, że już po 30 sek. prąd upływu w izolacji był ok. 2 rzędy wielkości większy od prądu depolaryzacji. W związku z tym notowany w dalszej części charakterystyki spadek wartości prądu upływu dotyczy t.z.w. relaksacji towarzyszącej transportowi masy jonowej na odległości makroskopowe. Z długotrwałych pomiarów wynika, że dla grubości izolacji 3,5 mm przy napięciu 500 V transport ten trwa około  $10^5$  sek, co oznacza, że średnia

ruchliwość jonów wynosi około  $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{Vs}$ . Po tym czasie, gdy przeważająca część ogólnej ilości jonów dotrze do elektrody następuje szybki spadek prądu upływu.



Rys.2. Zależności czasowe prądu polaryzacji  $J_p$  oraz depolaryzacji  $J_d$  w izolacji modelu pręta dla różnej polaryzacji elektrody Cu

ści różnego rodzaju nośników [1,4]. Biorąc pod uwagę rodzaj użytych składników i technologii wytwarzania izolacji mogą to być jony  $\text{Na}^+$  (mika, szkło),  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  (produkty procesu utwardzania) oraz jony o ogólnym wzorze R-O-O- (niezakończone procesy sieciowania i pozostałości substancji technologicznych). Należy przy tym zwrócić uwagę, że w takim kompozycie istnieje zazwyczaj duża ilość grup OH lub -O-, które w istotny sposób ułatwiają transport małych i ruchliwych jonów  $\text{Na}^+$ .

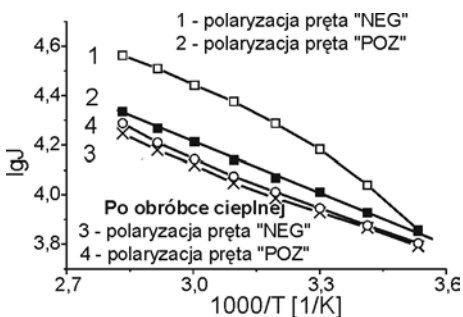
Na rys.3. pokazano charakterystykę  $\log(J)-1/T$  w izolacji dla różnej biegunowości pręta miedzianego. Wynika z niego, że dla dodatniej polaryzacji pręta otrzymano klasyczną zależność dla kryształów jonowych w postaci:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-W / kT) \quad (1)$$

gdzie: wyliczona energia aktywacji przewodzenia  $W = 0,055 \text{ eV}$ .

Natomiast dla ujemnej polaryzacji pręta uzyskano zbliżoną do równania Vogela-Tammanna-Fulchera zależność typu:

$$\sigma = \sigma_0 T^{-1/2} \exp[-B / (T - T_0)] \quad (2)$$



Rys. 3. Charakterystyki prądowo-temperaturowe w izolacji

Sugerowana wcześniej dominacja dyfuzji jonów nad procesami ich wymiany z elektrodami wskazuje na duży wpływ materiału elektrod na mierzony prąd upływu. W przypadku badanej izolacji pręta generatora jedną elektrodą jest miedź (pręt) a drugą grafit (ochrona przeciwjarzeniowa). O ile grafit jest klasyczną elektrodą blokującą to dla miedzi istnieje możliwość rekombinacji ruchliwych jonów o małej średnicy z jonami miedzi  $\text{Cu}^+$  w sytuacji ujemnego potencjału elektrody miedzianej. Efekt ten dobrze wyjaśnia większe przewodnictwo izolacji przy ujemnej polaryzacji pręta (rys. 2). Zakładając, że materiał izolacji wykazuje niestechiometryczną morfologię należy oczekiwać w niej dużej ilości

gdzie:  $\sigma_0$ ,  $B$  – stałe,  $T_0$  – idealna temperatura zeszklenia.

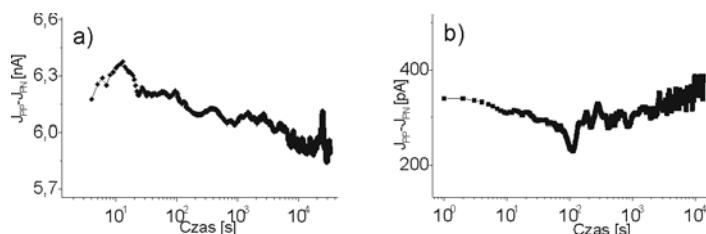
Opisuje ona termicznie aktywowany transport jonów w strukturach amorficznych [2,3]. Charakterystyki te wykonano dla wartości prądu zmierzonych po 1000 sekundach polaryzacji. Jest to czas, po którym można pominąć udział w prądzie skrośnym klasycznej relaksacji oraz relaksacji związanej z dyfuzją jonów.

Przy założeniu, że ochrona przeciwjarzeniowa jest elektrodą blokującą

wymianę jonów a procesy dyfuzji nośników ładunku w masie izolacji są niezależne od kierunku pola elektrycznego, pokazana na rys.4 różnica prądów upływu ilustruje różnicę w wymianie jonów dodatnich i ujemnych na przecie miedzianym.

Otrzymane po dodatkowej obróbce termicznej próbki A w temperaturze 250°C w okresie 16 h zależności  $\log(J)-1/T$  pokazano na rys. 3, krzywa 3, 4. Niezależnie od polaryzacji można je opisać równaniem (1) przy czym otrzymano zbliżone energie aktywacji 0,059 eV i 0,056eV odpowiednio dla elektrody miedzianej i grafitowej. Natomiast zmniejszenie asymetrii w wymianie jonów na elektrodzie miedzianej (rys.4b) należy prawdopodobnie przypisać ograniczonej dyfuzji jonów  $\text{Na}^+$  w wyniku większego uporządkowania struktury i zaniku stymulatorów ich dyfuzji (grupy OH i  $-\text{O}^-$ ).

Pomiary wykazały (Rys. 4a, 4b), że na asymetrię wymiany jonów na przecie Cu również ma wpływ czas. Dla izolacji przed dodatkowym utwardzaniem (rys.4a) proces rekombinacji powoduje ubytek ilości jonów  $\text{Na}^+$  w przestrzeni przyelektrodowej. Natomiast w drugim przypadku, dopiero po kilkunastu godzinach jony zaczynają docierać do elektrody. Należy przy tym zauważyć, iż proces obróbki cieplnej nie zmienił w istotny sposób wartości sumarycznego ładunku jonowego rozpraszanego w objętości izolacji. Oszacowana z pomiarów metodą zamrażania przy zastosowania odwrotnej polaryzacji wartość tego ładunku wynosiła odpowiednio 3,5  $\mu\text{Q}$  przed i 4,2  $\mu\text{Q}$  po obróbce.



Rys. 4. Różnica w wymianie jonów na elektrodzie miedzianej dla izolacji przed (a) i po dodatkowej obróbce cieplnej (b)

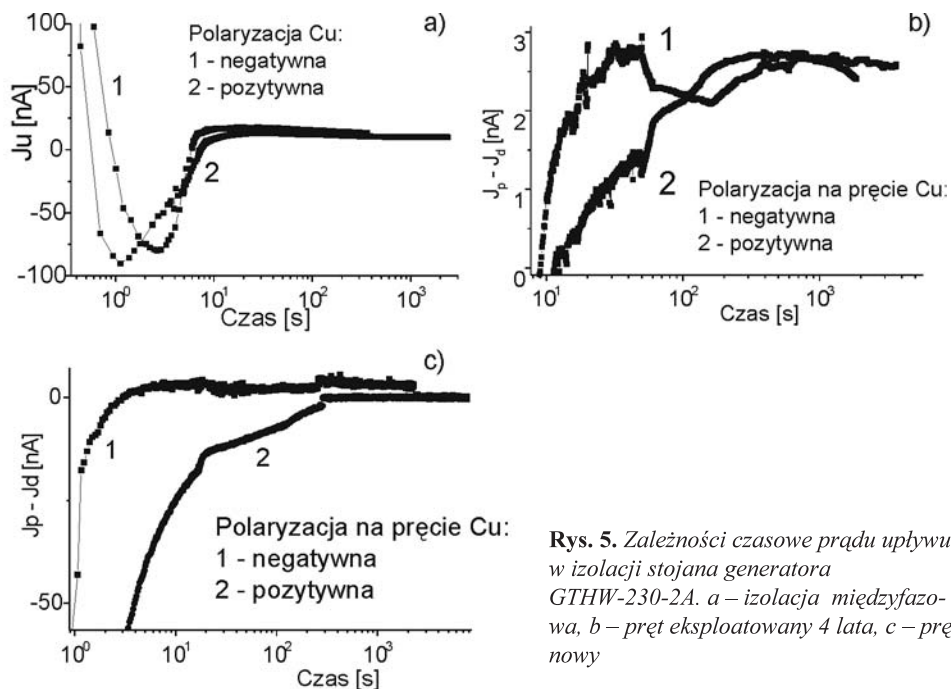
### 3.2. Pręt stojana generatora z izolacją micadur

Na rys.5, 6 przedstawiono charakterystyki czasowe prądu upływu  $J_u$  w izolacji pręta stojana generatora 270 MVA typu GTHW-230-2A o różnym czasie eksploatacji. Były one pomierzone w warunkach eksploatacyjnych, na stanowisku pracy generatora. Ze względu na porównywalne wartości prądu polaryzacji  $J_p$  i depolaryzacji  $J_d$  zastosowano klasyczną zasadę określania tego prądu w postaci:

$$J_u = J_p - J_d \quad (3)$$

Największe zmiany przewodnictwa notowano w pierwszych kilkuset sekundach. Wyznaczona charakterystyka  $J_u-t$  dla izolacji międzyfazowej generatora GTHW-230-2A (rys.5a) wskazuje, że proces przewodzenia posiada podobne cechy jak w cieczach jonowych, w których pomiary prowadzono w układzie elektrod blokujących a współczynnik przeniesienia jonów  $\alpha < 1$  [4,5,6]. Oczywiście stałe czasowe procesu w tym przypadku są znacznie większe (około  $10^5 - 10^7$  razy). Przewaga ruchliwości i ilości jonów dodatnich oznacza, że

w takiej izolacji powinna wystąpić różnica koncentracji jonów, oraz impedancja Warburga wymiany jonów, a także pewien wewnętrzny potencjał elektryczny. Podobne zależności otrzymano również w izolacji eksploatowanego przez 4 lata i nowego pręta uzwojenia stojana (rys.5b,c). Zwraca uwagę fakt, że spowodowana kierunkiem pola elektrycznego w układzie elektrod grafit – miedź, asymetria przewodnictwa najbardziej uwidacznia się w przedziale czasowym  $10^0 - 10^3$  sekund, co w dziedzinie częstotliwości odpowiada zakresowi 1 – 0,001 Hz (rys.1).



**Rys. 5.** Zależności czasowe prądu upływu w izolacji stojana generatora GTHW-230-2A. a – izolacja międzyfazowa, b – pręt eksploatowany 4 lata, c – pręt nowy

#### 4. WNIOSKI

- Pomiar wykazały, że w przewodnictwie elektrycznym kompozytowej izolacji w układzie żywica temoutwardzalna-mika-szkło duży udział ma zjawisko wymiany jonów z elektrodą pomiarową. Zależy ono od takich czynników jak: rodzaj polaryzacji i materiału elektrody oraz morfologii izolacji. Powstawanie impedancji Warburga w pobliżu elektrody powoduje, że związane z przewodnictwem rozproszenie dielektryczne w izolacji ma pewne cechy właściwe dla elektrolitów stałych. Ich rola rośnie wraz ze wzrostem ruchliwości jonów w masie izolacji oraz w zakresie krótkich czasów.
- Spowodowane istnieniem impedancji Warburga różnice w charakterystykach  $J_p = f(t)$  dla odmiennych polaryzacji elektrod dowodzą, że wyliczone z nich zależności częstotliwościowe zespolonej impedancji rozproszenia będą inne niż wyznaczone z pomiarów w dziedzinie częstotliwości. Rozbieżność ta będzie narastać wraz ze wzrostem stosunku rezystancji wymiany jonów z elektrodą i impedancji ich dyfuzji.

## 5. LITERATURA

- [1] **Bogusz W., Krok F.:** *Elektrolyty stałe-właściwości elektryczne i sposoby ich pomiaru*, WNT, Warszawa 1995
- [2] **Albinsson, Mellander E., Stevens J.:** *Ionic conductivity in poly(styrene oxide) modified poly(dimethylsiloxane) complexed with lithium salts*, Polymer, vol.32, No15, 1991, pp.2712-2715
- [3] **Wintersgill M., Fontanella J., Pak Y., Greenbaum G., Al-Mudaris A., Chadwick A.:** *Electrical conductivity, differential scanning calorimetry and nuclear magnetic resonance studies of amorphous poly(ethylene oxide) complexed with sodium salts*, Polymer, vol.30, 1989, pp.1123-1126
- [4] **Wintle H. J.:** *Charge Motion and Trapping in Insulators: Surface and Bulk Effects*, 1998 IEEE Symposium on Electrical Insulation, Arlington, USA, 7-10 June 1998, pp.1-11
- [5] **Penteado R., Robert R., Mondini I.:** *Ion diffusion in polyethylene films*, 10-th ISH, Montreal, 1997
- [6] **Karasev G., Dikarev B., Romanets R., Nikitin V.:** *Peak phenomena investigation of reversal current in dielectric liquids*, 1998 IEEE Symposium on Electrical Insulation, Arlington, USA, 7-10 June 1998, pp.627-630

### DC CONDUCTIVITY IN GENERATORS WINDING INSULATION

The effect of the electrodes kinds and polarization signs on the current-time relationships in generators stator insulation was observed. The temperature measurements confirmed that depending on the sign of copper electrode polarization two different mechanisms of conductivity processes was obtained. The results enable to formulate conclusion, that complex dispersion impedance calculated on the base of measurements at time and frequency domains will be different.