

Jarosław GIELNIAK, Andrzej GRACZKOWSKI, Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK
POLITECHNIKA POZNAŃSKA,
ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań

Czy proces depolimeryzacji celulozy wpływa na odpowiedź dielektryczną układu izolacyjnego papier-olej?

Dr inż. Jarosław GIELNIAK

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor i współautor ponad 80 publikacji, głównie z zakresu badań właściwości izolacji papier-olej oraz metod związanych z diagnostyką izolacji transformatora. Współwykonawca 2 projektów międzynarodowych oraz 6 badawczych krajowych, w tym kierownik jednego projektu.



e-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl

Dr inż. Andrzej GRACZKOWSKI

Adiunkt w Zakładzie Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Autor ponad 70 publikacji z zakresu materiałoznawstwa elektrotechnicznego, diagnostyki wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych, spektroskopii dielektrycznej, rozkładu pola elektrycznego przy napięciu stałym. Współwykonawca 2 projektów międzynarodowych oraz 7 badawczych krajowych, w tym kierownik jednego projektu.



e-mail: andrzej.graczkowski@put.poznan.pl

Prof. dr hab. inż. Hanna MOŚCICKA-GRZESIAK

Profesor zwyczajny na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej. Wieloletni kierownik Zakładu Wysokich Napięć i Materiałów Elektrotechnicznych. Autorka ponad 200 publikacji z zakresu inżynierii materiałowej oraz diagnostyki wysokonapięciowych układów izolacyjnych. Promotor 19 prac doktorskich. Członek IEEE oraz Komitetu Elektrotechniki PAN. Koordynator 2 projektów międzynarodowych i kierownik 13 krajowych projektów badawczych.



e-mail: hanna.moscicka@put.poznan.pl

Keywords: cellulose insulation, polymerization degree, dielectric response, time domain measurements, frequency domain analysis.

1. Wprowadzenie

Spektroskopia dielektryczna jest dziedziną zajmującą się oddziaływaniem pola elektromagnetycznego na dielektryk. Od wielu lat prowadzone są badania na temat wykorzystania spektroskopii dielektrycznej do oceny stanu układów izolacyjnych. Reakcję dielektryków na działanie pola elektromagnetycznego nazywa się odpowiedzią dielektryczną. Odpowiedź dielektryczna w dziedzinie czasu stanowi podstawę metody RVM (Recovery Voltage Method) oraz metody PDC (Polarisation and Depolarisation Current) [1, 2, 3]. Odpowiedź dielektryczna w dziedzinie częstotliwości jest podstawą metody FDS (Frequency Domain Spectroscopy). Fundamenty tej metody zostały opisane w publikacjach [4, 5].

Metody oparte na odpowiedzi dielektrycznej wykorzystuje się w elektroenergetyce, głównie do oceny stanu izolacji papier-olej stosowanej w transformatorach energetycznych i kablach morskich napięcia stałego [2, 3, 5, 6, 8, 10].

W wielu publikacjach można znaleźć stwierdzenie, że odpowiedź dielektryczna, zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości, zależy od zawilgocenia i zesterzenia izolacji. Na temat wyznaczania zawilgocenia izolacji celulozowej wykonano dotychczas wiele wartościowych prac. Badania wykonane na próbkach i modelach, a następnie weryfikowane na transformatorach przekazanych do remontu, pozwalają obecnie na wiarygodną ocenę zawilgocenia izolacji transformatorów będących w eksploatacji [6, 7, 8, 9].

Wzór sumaryczny celulozy ma postać $(C_6H_{10}O_5)_n$, gdzie n jest stopniem polimeryzacji celulozy, któremu przypisuje się, zaczerpnięty z literatury angielskiej, skrót DP (Degree of Polymerization) Średni stopień polimeryzacji celulozy mierzono zgodnie z procedurą podaną w [11].

Dotychczas nierozwiązanym i kontrowersyjnym problemem jest ocena zesterzenia izolacji przy wykorzystaniu metod odpowiedzi dielektrycznej. W pracy opublikowanej w 1998 r. [1] zamieszczono wykres przedstawiający spektrum napięcia powrotnego dla próbek celulozowych impregnowanych olejem starzonych w temperaturze 120°C. Starzenie prowadzono w czasie 500, 2000 i 4000 h. Stopień polimeryzacji (DP) próbek wynosił odpowiednio 1200, 600 i 400. omawiany wykres przedstawiono na rysunku 1. Analizując ten wykres, można wyciągnąć mylny wniosek, że zmniejszenie stopnia polimeryzacji celulozy powoduje zmniejszenie wartości dominującej stałej czasowej. Autorzy pracy [1] uważają, że starzenie izolacji musi być analizowane kompleksowo, tzn., że trzeba badać oprócz DP, również wszystkie produkty starzenia rozpuszczalne w wodzie, gdyż mogą one mieć istotny wpływ na przebieg napięcia powrotnego. Autorzy pracy [1] nie

Streszczenie

Celem pracy jest ocena wpływu stopnia polimeryzacji celulozy DP na odpowiedź dielektryczną układu izolacyjnego papier-olej. Obiektami badań były próbki preszpanowe nowe i starzone o stopniu polimeryzacji odpowiednio 1435 i 406. Badano odpowiedź dielektryczną w dziedzinie czasu i częstotliwości. Badania wykazały, że charakterystyki odpowiedzi dielektrycznej próbek nowych i zesterzonych, o identycznej zawartości wody są bardzo zbliżone. Ich różnice mieszczą się w granicach rozrzutu.

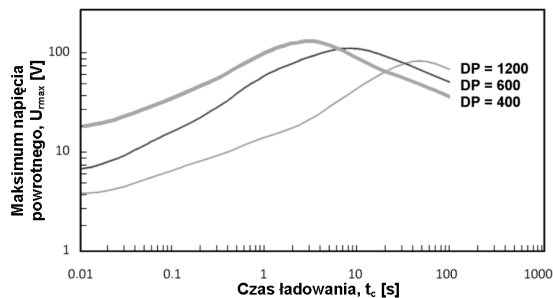
Słowa kluczowe: izolacja celulozowa, stopień polimeryzacji, odpowiedź dielektryczna, pomiary w dziedzinie czasu, analiza w dziedzinie częstotliwości.

Does the process of cellulose depolymerization affect the dielectric response of oil-paper insulation?

Abstract

Up to now the controversial and unsolved problem up has been evaluation of insulation ageing, using the dielectric response method. Figs. 1 and 2 show the influence of aging of oil impregnated paper samples on the dielectric response. However, it is not clear yet if these changes are caused by reducing DP or by ageing of by-products such as acids formed during the ageing [7, 8, 9, 10]. The purpose of this work is to evaluate the influence of the cellulose polymerization degree (DP) on the dielectric response. The research objects were new and aged pressboard samples of the polymerization degree 1435 and 406, respectively (Tab. 2). The authors investigated the dielectric response in the time and frequency domains. Results concerning the frequency analysis are presented in Figs. 3 and 4. It can be seen that increase in moisture from 0.5 % to 3.3 % causes a large shift of the dielectric response characteristics. On the other hand, decrease in DP from 1435 to 406 causes a small change of the characteristic shape. Figs. 5, 6 and 7 show investigation results of the recovery voltage. In this case, also the shift of the characteristics corresponding to the samples of different DP values is very small. From the presented investigations it follows that DP does not affect the quantities characterizing the recovery voltage, which are used in practice most often. The research showed that the dielectric response characteristics of new and aged samples, of different DP and identical water content are very close. Their differences are within the limits of statistical dispersion.

wyciągnęli ostatecznego wniosku dotyczącego związku dominującej stałej czasowej i DP.



Rys. 1. Spektrum napięcia powrotnego próbek papieru impregnowanych olejem, starzonych w temperaturze 120 °C w czasie (500, 2000, 4000) h; DP wynosi odpowiednio 1200, 600 i 400; temperatura pomiarów 60 °C [1]
Fig. 1. Recovery voltage spectrum of paper samples impregnated with oil, aged at the temperature of 120 °C in the time of (500, 2000, 4000) h; DP is 1200, 600, and 400, respectively; the measurement temperature 60°C [1]

W pracach [2, 3, 4] badano wpływ zestarzenia próbek papierowych i preszpanowych na odpowiedź dielektryczną w dziedzinie częstotliwości. W pracy [4] dokładnie opisano sposób preparacji próbek. Przygotowano dwa komplety próbek papierowych o zawilgoceniu 0,6% i 4% oraz dwa komplety próbek preszpanowych o identycznym zawilgoceniu. Próbkę umieszczono w czterech hermetycznych, ciśnieniowych pojemnikach i starzono w temperaturze 130 °C przez 800 h. W czasie starzenia nastąpiły duże zmiany stopnia polimeryzacji DP, co przedstawiono w tablicy 1. Zgodnie z oczekiwaniami, próbki o wysokim poziomie zawilgocenia (4%), po procesie starzenia, wykazały dużo mniejszą wartość stopnia polimeryzacji, niż próbki o małym zawilgoceniu (0,6%), co szczególnie widać w przypadku preszpanu. Pokazuje to, w sposób ewidentny, że woda obecna w izolacji celulozowej jest akceleratorem procesów starzeniowych. Przed pomiarami odpowiedzi dielektrycznej, próbki były sezonowane przez sześć miesięcy, co miało zapewnić stan równowagi między zawartością wody w próbkach i w oleju.

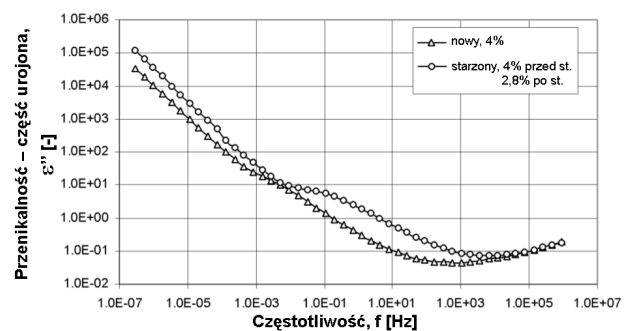
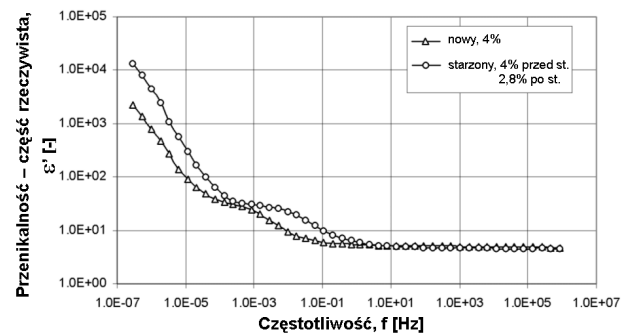
Tab. 1. Stopień polimeryzacji badanych próbek [9]
Tab. 1. Degree of polymerization of selected samples [9]

Materiał	Stan próbki	DP
papier	nowa	1320
	starzona – 0,6% przed starzeniem	490
	starzona – 4% przed starzeniem	340
preszpan	nowa	1230
	starzona – 0,6% przed starzeniem	695
	starzona – 4% przed starzeniem	260

Na rysunku 2 porównano część rzeczywistą i urojoną zespolonej przenikalności próbek preszpanu nowych i starzonych. Zarówno przenikalność ϵ' jak i ϵ'' są znacznie większe dla próbki starzonej. Niestety, wnioski z tego porównania nie są jednoznaczne. W czasie starzenia próbek zmalało ich zawilgocenie z 4% do 2,8%, co stanowiło dla nas zaskoczenie, bo specjalnie użyto hermetycznych pojemników niemożliwiających ucieczkę wody na zewnątrz oraz zastosowano bardzo długie kondycjonowanie próbek po starzeniu. Jednocześnie wzrosła przewodność elektryczna próbek z 0,71 pS/m do 1,8 pS/m, co jest skutkiem obecności produktów starzenia, głównie oleju, rozpuszczalnych w wodzie. Tak więc, w tym eksperymencie, trudno jest powiązać odpowiedź dielektryczną ze stopniem polimeryzacji DP celulozy, gdyż zjawisko jest maskowane przez dwa inne czynniki [2, 3, 4].

Stopień polimeryzacji celulozy (DP) jest bardzo ważną wielkością decydującą o wytrzymałości mechanicznej papieru. Duża wytrzymałość papieru jest wymagana szczególnie ze względu na zwarcia powodujące odkształcenia uzwojeń transformatora. Moż-

liwość wyznaczania DP w sposób pośredni, przy wykorzystaniu metod odpowiedzi dielektrycznej, mogłaby mieć duże znaczenie dla diagnostyki transformatorów.



Rys. 2. Część rzeczywista i urojona przenikalności elektrycznej preszpanu; próbka nowa o zawilgoceniu 4%; próbka starzona o zawilgoceniu 4% przed i 2,8% po procesie starzenia; temperatura 20 °C [2, 3, 4]
Fig. 2. Real and imaginary parts of the complex permittivity of pressboard; new sample 4% moisture intake; aged sample 4% before and 2,8% moisture intake after aging; temperature 20 °C [2, 3, 4]

2. Cel pracy

Celem tej pracy ma być odpowiedź na pytanie – czy stopień polimeryzacji DP celulozy wpływa na odpowiedź dielektryczną układu izolacyjnego papier-olej w dziedzinie czasu i częstotliwości, i czy korzystając z metod odpowiedzi dielektrycznej można w sposób pośredni wyznaczyć DP. Aby to było możliwe, preparację próbek tak zaplanowano, aby zmianom DP nie towarzyszyły zmiany żadnych czynników, które mogą mieć wpływ na odpowiedź dielektryczną.

3. Preparacja próbek

Do badań użyto próbki preszpanowe o grubości 1,5 mm i średnicy 160 mm. Przygotowano kilka kompletów próbek preszpanowych nowych i starzonych, o mocno różniących się wartościach DP. Próbkę starzono w kontakcie z powietrzem w temperaturze 170 °C przez 14 h. W ten sposób w próbkach nie było chemicznych produktów starzenia oleju, które bardzo zwiększają przewodność próbek i maskują wpływ DP na odpowiedź dielektryczną. Stopień polimeryzacji DP próbek nowych wynosił 1435, a starzonych 406. W kolejnym etapie próbki nowe oraz starzone suszono w komorze próżniowej. Następnie, próbki umieszczone na wadze, zawilgaczano w kontakcie z powietrzem dożądanego poziomu. Zawilgocenie próbek wyznaczano na podstawie zmiany ich masy oraz dodatkowo korzystając z metody miareczkowania Karla Fishera. W ten sposób skompletowano wiele zestawów próbek różniących się stopniem polimeryzacji DP i poziomem zawilgocenia.

Kolejnym etapem była impregnacja próbek nowym, suchym olejem mineralnym. Używano do tego bardzo małe hermetyczne komory, dzięki czemu ograniczono możliwość migracji wody

z preszpanu do oleju i z oleju do preszpanu. Ostatnim etapem była stabilizacja własności próbek. W tym celu hermetyczne komory z próbkami i olejem kilkakrotnie podgrzewano do temperatury 60 °C. Następnie próbki kondycjonowano w komorach przez 12 h. Z naszych doświadczeń wynika, że stabilizacja i kondycjonowanie próbek są niezbędne, aby uzyskać niezmiennie w czasie właściwości próbek.

Wykonano wiele badań rekonesansowych i kilkanaście serii pomiarowych. Dla wybranych czterech zestawów próbek o charakterystycznych parametrach wyniki podano w tabelicy 2. Dwa zestawy próbek użyte były w badaniach metoda FDS, a dwa w badaniach metodą RVM.

Tab. 2. Stopień polimeryzacji DP i zawilgocenia badanych próbek
Tab. 2. Degree of polymerization DP and moisture content of investigated samples

Stan próbki	DP	% H ₂ O	Metoda badań
nowa	1435	0,5	FDS
starzona	406	0,5	
nowa	1435	3,3	FDS
starzona	406	3,3	
nowa	1435	1,5	RVM
starzona	406	1,5	
nowa	1435	2,5	RVM
starzona	406	2,5	

W czasie preparacji próbek starano się uzyskać identyczne zawilgocenie próbek o różnych wartościach DP, gdyż wpływ zawilgocenia na odpowiedź dielektryczną jest bardzo duży i mógłby zamaskować interesujący nas wpływ DP. Pomiaru odpowiedzi dielektrycznej wykonywano co najmniej na trzech próbkach z każdej grupy.

4. Układy pomiarowe

Odpowiedź dielektryczną spreparowanych próbek preszpanowych badano w dziedzinie częstotliwości oraz w dziedzinie czasu.

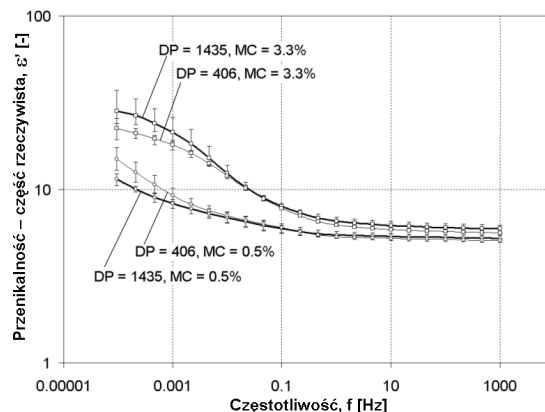
Odpowiedź dielektryczną w dziedzinie częstotliwości badano wykorzystując system pomiarowy IDAX 300 firmy PAX Diagnostics. Pomiaru wykonywano w układzie trójelektrodowym. Elektroda pomiarowa miała średnicę 15 mm. Odpowiedni docisk elektrod do próbki zapewniał system sprężyn. Siłę docisku dobrano w taki sposób, aby elektrody pomiarowe przylegały do próbki na całej powierzchni i nie deformowały próbki, co zapewniło powtarzalność uzyskiwanych wyników. Próbka wraz z układem elektrod zanurzona była w oleju. Napięcie pomiarowe wynosiło 40 V wartości skutecznej.

Odpowiedź dielektryczna w dziedzinie czasu była badana przy wykorzystaniu miernika RVM 5462 firmy Tettex. Pomiaru realizowano w układzie dwuelektrodowym. Średnica elektrody pomiarowej wynosiła 150 mm. Docisk elektrod do próbki zapewniał obciążnik o masie 20 kg. Elektrody wraz z badaną próbką umieszczano w hermetycznej komorze. Napięcie pomiarowe wynosiło 2 kV.

5. Wyniki badań i ich interpretacja

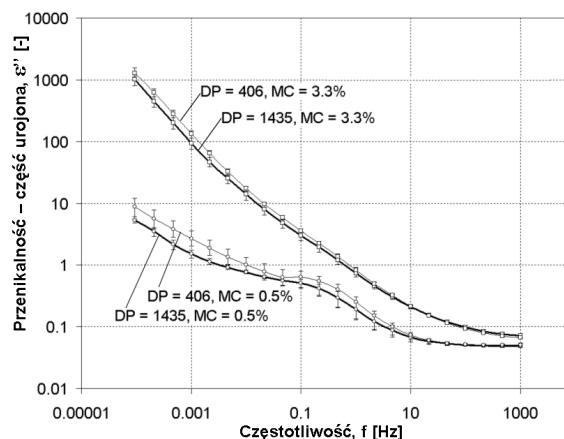
Wyniki dotyczące analizy częstotliwościowej przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Na rysunku 3 pokazano część rzeczywistą przenikalności elektrycznej ϵ' próbek o dwóch różnych stopniach polimeryzacji DP wynoszących 1435 oraz 406 i zawilgoceniu 3,3% oraz 0,5%. Na rysunku 4 przedstawiono natomiast część urojonej przenikalności elektrycznej ϵ'' dla tych samych próbek. Na krzywych zaznaczono dyspersję mierzonych wartości przenikalności. Widzimy, że wzrost zawilgocenia od 0,5% do 3,3% powoduje bardzo duże przesunięcie charakterystyk odpowiedzi dielektrycznej. Przy częstotliwości 0,0001 Hz wartość ϵ'' rośnie aż o dwa rzędy wielkości. Przy mniejszej częstotliwości, rzędu 0,01, różnice ϵ'' są również znaczne i sięgają jednego rzędu.

Natomiast zmniejszenie DP od 1435 do 406 powoduje bardzo małe zmiany kształtu charakterystyk, a ilościowe zmiany wynoszą \pm kilkanaście %, a więc mają statystyczny rozrzut i nie wykazują żadnej tendencji.



Rys. 3. Część rzeczywista ϵ' przenikalności elektrycznej próbek preszpanowych nowych (DP=1435) oraz starzonych (DP=406) o zawilgoceniu 0,5% i 3,3%

Fig. 3. Real part ϵ' of complex permittivity of new (DP=1435) and aged (DP=406) pressboard samples of moisture intake 0.5% and 3.3%



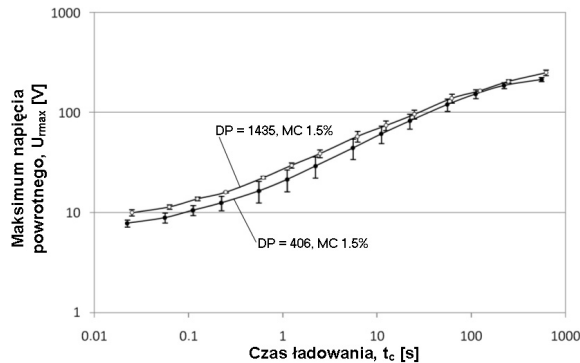
Rys. 4. Część urojona ϵ'' przenikalności elektrycznej próbek preszpanowych nowych (DP=1435) oraz starzonych (DP=406) o zawilgoceniu 0,5% i 3,3%

Fig. 4. Imaginary part ϵ'' of complex permittivity of new (DP=1435) and aged (DP=406) pressboard samples of moisture intake 0.5% and 3.3%

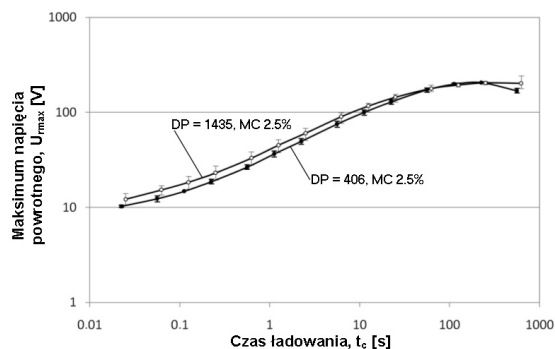
W sytuacji, kiedy bardzo duże zmiany DP wywołują małe zmiany odpowiedzi dielektrycznej i jednocześnie małe zmiany zawartości wody powodują duże zmiany odpowiedzi dielektrycznej, bardzo trudne jest wnioskowanie o wpływie DP na odpowiedź dielektryczną. Mały błąd wyznaczania zawartości wody w celulozie może zupełnie zamaskować wpływ DP na odpowiedź dielektryczną. Tak więc można stwierdzić, że nawet bardzo duże zmiany DP nie wywołują zmian częstotliwościowej odpowiedzi dielektrycznej w stopniu wystarczającym dla potrzeb diagnostyki układów izolacyjnych opartych na materiałach celulozowych.

Na rysunkach 5, 6 i 7 przedstawiono wyniki badania napięcia powrotnego. Na rys. 5 pokazano uśrednione spektra napięcia powrotnego dla próbek preszpanowych o identycznym zawilgoceniu równym 1,5%, ale różnych wartościach DP wynoszących 1435 i 406. Widać, że obie krzywe mają bardzo podobny kształt i ich wzajemne przesunięcie mieści się w granicach statystycznego rozrzutu. Na rysunku 6 pokazano analogiczne krzywe, ale dla próbek zawilgoconych do poziomu 2,5%. W tym przypadku również przesunięcie charakterystyk odpowiadających próbkom o różnych wartościach DP mieści się w granicach rozrzutu. Na rysunku 7 pokazano zależność czasu t_{peck} (czas do osiągnięcia

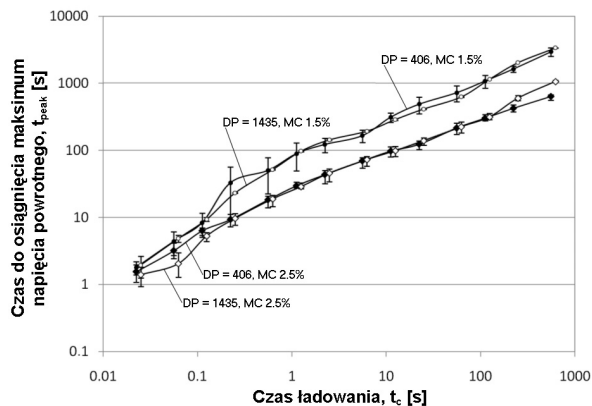
maksimum napięcia powrotnego) od czasu ładowania t_c . Widać wyraźny wpływ zawilgocenia na t_{peck} , natomiast duże zmiany DP nie wywołują istotnych zmian t_{peck} , a zmiany te mieszczą się w granicach rozrzutów.



Rys. 5. Normalizowane spektra napięcia powrotnego próbek preszpanowanych nowych (DP = 1435) oraz starzonych (DP = 406) o zawilgoceniu 1,5%
Fig. 5. Normalized recovery voltage spectra of new (DP = 1435) and aged (DP = 406) pressboard samples, moisture intake 1,5%



Rys. 6. Normalizowane spektra napięcia powrotnego próbek preszpanowanych nowych (DP = 1435) oraz starzonych (DP = 406) o zawilgoceniu 2,5%
Fig. 6. Normalized recovery voltage spectra of new (DP = 1435) and aged (DP = 406) pressboard samples, moisture intake 2,5%



Rys. 7. Czas do osiągnięcia maksimum napięcia powrotnego w zależności od czasu ładowania dla próbek preszpanowanych nowych (DP = 1435) i zestarzonych (DP = 406), o zawilgoceniu 1,5% i 2,5%
Fig. 7. Time to reach the maximum recovery voltage depending on the charging time for new (DP=1435) and aged (DP=406) pressboard samples, moisture intake 1.5% and 2.5%, respectively

Z przedstawionych rezultatów badań wynika, że DP nie ma wpływu na najczęściej wykorzystywane w praktyce wielkości charakteryzujące napięcie powrotne.

6. Wnioski

Przedstawione wyniki badań wykazały, że bardzo duże zmiany stopnia polimeryzacji celulozy wywołują bardzo małe zmiany odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego papier-olej, zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Zmiany te zachodzą o obszarze rozrzutów badanych wielkości.

Zawilgocenie izolacji celulozowej powoduje bardzo duże zmiany odpowiedzi dielektrycznej. W tej sytuacji nawet bardzo mały wzrost zawilgocenia izolacji może kompletnie zamaskować nieznaczny wpływ stopnia polimeryzacji na odpowiedź dielektryczną.

Na tym etapie badań, wydaje się, że nie ma możliwości wiarygodnego wyznaczenia stopnia polimeryzacji celulozy w sposób pośredni, wykorzystując techniki oparte na analizie odpowiedzi dielektrycznej.

7. Literatura

- [1] Csépes G., Hámos J., Brooks R. and Karius V.: Practical foundations of the RVM (Recovery Voltage Method) for oil/paper insulation diagnosis, 1998 Annual Report. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Atlanta, Vol.1, s. 345-355, 1998.
- [2] Subocz J.: Analysis of PDC characteristics in transformers insulation, Energetyka, No. VI, s. 32-35, 2005.
- [3] Gubański S. M., Boss P., Csépes G., Der Houbanessian V., Filippini J., Guinic P., Gäfvert U., Karius V., Lapworth J., Urbani G., Werelius P. and Zaengl W.: Dielectric response methods for diagnostics of power transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 3, s. 12-18, 2003.
- [4] Zaengl W. S.: Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, Part I: Theoretical considerations, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 5, pp. 5-19, 2003.
- [5] Zaengl W. S.: Applications of dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 19, No. 6, s. 9-22, 2003.
- [6] International research project financed by European Commission: Reliable diagnostics of HV transformer insulation for safety assurance of power transmission system – REDIATool, Proposal No. NNE5/472, 2001, realization 2003-2006, Partners: Poland, Sweden, Germany.
- [7] Ekanayake C., Gubański S.M., Graczkowski A. and Walczak K.: Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 21, No. 3, 2006, s. 1309-1317.
- [8] Gubański S.M., Blennow J., Karlsson L., Feser K., Tenbohlen S., Neumann C., Mościcka-Grzesiak H., Filipowski A. and Tatarski L.: Reliable diagnostics of HV transformer insulation for safety assurance of power transformers systems, 2006 CIGRE Sesion, Paris, paper No. D1-207.
- [9] Walczak K., Graczkowski A., Gielniak J., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Ekanayake C. and Gubański S. M.: Dielectric frequency response of cellulose samples with various degree of moisture content and aging, Przegląd Elektrotechniczny, No. 1'2006, s. 264-267.
- [10] Gielniak J., Ekanayake C., Walczak K., Graczkowski A. and Gubanski S.M.: Dielectric response of new and aged transformer pressboard in dry and wet states, International Symposium on Electrical Insulating Materials ISEIM 2005, Kitakyushu, Japan, s. 386-389.
- [11] PN-EN 60450, Pomiar średniego lepkościowego stopnia polimeryzacji nowych i starzonych elektroizolacyjnych materiałów celulozowych.