



Parametry dielektryczne w diagnostyce układów izolacyjnych – wybrane zagadnienia pomiarów i modelowanie

Streszczenie. Artykuł omawia wybrane problemy pomiarów prądowej i napięciowej odpowiedzi układów izolacyjnych wysokiego napięcia oraz przedstawia wyniki modelowania wpływu pewnych elementów ich schematów zastępczych na wartości wybranych parametrów diagnostycznych. Wyniki wykonanych symulacji numerycznych potwierdzają konieczność stosowania schematów zastępczych odpowiadających rzeczywistym strukturom modelowanych układów izolacyjnych.

Abstract. (Dielectric parameters in diagnostic of insulation systems – selected topics of measurements and modelling). Paper describes problems with measurement of current/voltage response of insulation systems and presents results of response modelling. Influence of equivalent circuits elements on selected diagnostically useful parameters is shown as well as necessity of proper selection of equivalent circuit structure.

Słowa kluczowe: układy izolacyjne, odpowiedź dielektryczna, parametry diagnostyczne, modelowanie.

Keywords: insulation systems, dielectric response, diagnostics parameters, modelling.

Tło i charakterystyka tematu

Układy izolacyjne wysokiego napięcia stanowią jeden z podstawowych elementów składowych wszystkich wysokonapięciowych aparatów i urządzeń elektroenergetycznych. Współczesne wymagania stawiane układom stosowanym w wytwarzaniu, przesyłaniu i rozdziale energii elektrycznej obejmują m.in.:

- zapewnienie długiego czasu życia eksploatowanych i nowo instalowanych obiektów technicznych;
- podwyższenie ich niezawodności i odporności na oddziaływanie czynników zewnętrznych;
- zapewnienie w miarę wygodnej i równocześnie efektywnej diagnostyki;
- łatwość dokonywania obsługi serwisowej.

W praktyce nie zawsze jest możliwe całkowite spełnienie wszystkich tych wymagań, jednak jest to podstawowy cel badań w dziedzinie materiałów i konstrukcji oraz metod badań i pomiarów. Jednym z elementów tego kierunku jest coraz szersze stosowanie w serwisie eksploatacyjnym metod i narzędzi strategii *CBM* (*Condition Based Maintenance*). Strategia ta prowadzi do zastąpienia metodyki obsługi urządzeń technicznych bazującej na wypracowanych latach doświadczeń zasadach i harmonogramach przeglądowo-remontowych, podejściem opartym na ocenie aktualnego stanu danego urządzenia. Pozwala to na bardziej racjonalne i efektywne ekonomicznie zarządzanie zasobami technicznymi, przy równoczesnym wzroście niezawodności ich działania. Pociąga to jednak za sobą konieczność ponoszenia kosztów związanych ze stosowaniem nowych metod diagnostycznych opartych coraz częściej na pomiarach typu *on-line*. Wspomniana ocena diagnostyczna stanu układu izolacyjnego urządzenia musi zawierać odniesienie do współczesnego stanu wiedzy teoretycznej na temat danego rodzaju izolacji, a także mieć związek z indywidualnymi doświadczeniami eksploatacyjnymi jej użytkownika. Warunek ten można spełnić gromadząc odpowiednie bazy danych stanowiące źródło wiedzy dla tworzonych w tym celu systemów ekspertowych. Są one obecnie traktowane jako systemy wspomagające podejmowanie decyzji, a więc będące swego rodzaju wirtualnymi konsultantami o dużej, aczkolwiek uogólnionej wiedzy. Szeroki przegląd opracowywanych i stosowanych współcześnie metod i aplikacji monitorowania stanu *CM* (*Condition Monitoring*) znaleźć można m.in. w [1, 2].

Z reguły stan badanego układu izolacyjnego jest charakteryzowany pewną liczbą parametrów opartych na pomiarze wybranych wielkości fizycznych lub chemicznych. Parametry te mogą posiadać różny stopień wrażliwości na zmiany jego własności izolacyjnych. Sposób zdefiniowania i wyboru parametrów uznawanych za diagnostycznie istotne wpływa więc zasadniczo na poprawność i wiarygodność sformułowanej oceny końcowej. Wydaje się, że im więcej parametrów wykorzystuje się w opisie stanu obiektu tym pełniejsza jest jego charakterystyka [3]. Należy jednak mieć świadomość faktu, że bardzo często wyznaczane parametry diagnostyczne są wzajemnie zależne, co sprawia, że ilość uzyskiwanej efektywnie informacji jest dużo niższa niż wstępnie zakładana. Bazując na dostępnej wiedzy należy dążyć do takiego ich doboru, aby stanowiły jak najwerniejszą *sygnaturę* stanu badanego obiektu (*fingerprint*). Równocześnie, biorąc pod uwagę niepożądane czynniki zewnętrzne, statystyczny charakter wielkości mierzonych oraz dokładności metod i przyrządów, stosowanie pewnej redundancji w liczbie parametrów - polegającej na pozostawieniu w sygnaturze obiektu parametrów częściowo zależnych - może być działaniem właściwym, pozwalającym na dodatkową weryfikację uzyskiwanych wyników i zwiększenie wiarygodności stawianej diagnozy.

Uwzględniając powyższe rozważania, niniejszy artykuł opisuje - na podstawie literatury - pewne aspekty praktyki pomiarowej oraz przedstawia modelowanie wybranej grupy parametrów opisujących własności polaryzacyjne, wykorzystywanych w diagnostyce układów izolacyjnych, z ukierunkowaniem na badania stanu izolacji papierowo-olejowej transformatorów energetycznych.

Pomiary odpowiedzi dielektrycznej układu izolacyjnego

Odpowiedzi czasowe oraz charakterystyki częstotliwościowe układów izolacyjnych uzyskiwane podczas badań wykonywanych na próbkach materiałów, jak i rzeczywistych obiektach, znacząco odbiegają od przybliżeń procesów relaksacyjnych opartych na prostym modelu Debye'a. Inne rodzaje aproksymacji - zarówno czasowe jak i częstotliwościowe [4, 5] - będące próbą opisu obserwowanych pomiarowo zjawisk fizycznych na poziomie analitycznego aparatu matematycznego - pozwalają często na dokładniejsze dopasowanie do dużej liczby różnych danych pomiarowych. Tym niemniej, dla potrzeb diagnostycznych,

w oparciu o model Debye'a tworzone są *modele rozszerzone*. Umożliwiają one - poprzez bezpośrednią analogię do postaci elektrycznych schematów zastępczych - czytelne odwzorowanie procesów relaksacyjnych występujących w układach izolacyjnych. W praktyce diagnostycznej funkcjonuje cały szereg metod i technik pomiarowych pozwalających na bardziej lub mniej dokładną analizę stanu tych układów [6,7]. Zakres stosowalności metod zależy w pewnym stopniu od rodzaju badanej izolacji. Istotną ich grupę stanowią właśnie metody oparte o badania zmian własności dielektrycznych na podstawie pomiaru i analizy wyżej wymienionych zjawisk. Mogą one być realizowane zarówno poprzez pomiary w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Pierwszy przypadek dotyczy pomiarów przy *napięciu stałym* (a w zasadzie przy *pobudzeniu skokiem napięcia o ustalonej wartości*) i obejmuje metody rejestracji prądowej lub napięciowej odpowiedzi układu [8,9,10]. Uzyskiwane w ich wyniku dane są teoretycznie równoważne, jednak różnica pomiędzy podlegającymi rejestracji wielkościami fizycznymi (*prąd/napięcie*) powoduje konieczność stosowania aparatury pomiarowej o diametralnie odmiennych parametrach obwodów wejściowych (rys.1):

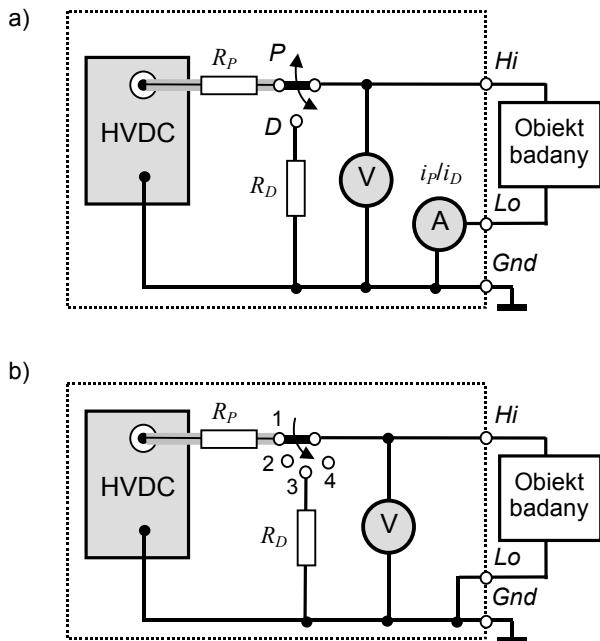
- *metody prądowe*

względnie niska impedancja wejściowa (do $10^4 \div 10^5 \Omega$),
wejście na nieustalonym potencjale,
pomiary małych prądów w zakresie $10^{-3} \div 10^{-12} A$;

- *metody napięciowe*

bardzo wielka impedancja wejściowa,
wejście na ustalonym potencjale (pomiary z dobrze
określoną masą elektryczną badanego obiektu),
pomiary napięć w zakresie $10^{-3} \div 10^4 V$.

W przypadku metod napięciowych duże wartości rezystancji izolacji sprawiają, że impedancja wejściowa przyrządu pomiarowego może mieć istotny wpływ na uzyskiwane wyniki, a równocześnie uwidaczniają się specyficzne źródła zakłóceń np. wilgotność powietrza czy też elektryzacja powodowana wiatrem [11]. Niekiedy, ze względów praktycznych konieczne jest wręcz celowe obniżanie wartości impedancji poprzez równoległe dołączenie dodatkowego rezystora [12].



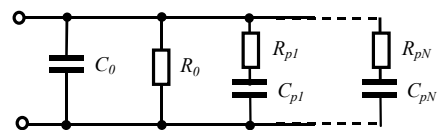
Rys. 1. Uprozczone schematy zastępcze układów do badania układów izolacyjnych wysokiego napięcia metodami pomiaru:

- a) prądów polaryzacji/depolaryzacji (PDC, IRC),
b) odpowiedzi napięciowej (RV, RVM).

Elementy schematów przedstawionych na rysunku 1 to: HVDC - źródło wysokiego napięcia stałego, R_P , R_D - rezystory ograniczające prąd, reprezentujące występujące w miernikach zabezpieczenia nadprądowe, V - woltomierz, A - amperomierz o wysokiej czułości (elektrometr). Przed pomiarami izolację obiektów należy rozładować np. w transformatorze - zewrzeć wszystkie uzwojenia z kadzią na okres czasu dłuższy niż planowany czas jej polaryzowania. Dla analizy prądów depolaryzacji czas przyłożenia stałego napięcia polaryzującego winien być, co najmniej 10-krotnie dłuższy od czasu rejestracji tych prądów [4]. Ponadto należy ograniczać występowanie zjawisk nieliniowych, stosując możliwie niskie wartości napięć - uwzględniając przy tym potrzebę zachowania odpowiedniego odstępu sygnał/szum [13,14]. Metody analizy czasowej zjawisk polaryzacyjnych w izolacji papierowo-olejowej transformatorów energetycznych wymagają rejestracji wielkości mierzonych w przedziałach czasu od ok. $10^0 s$ do ok. $10^4 s$, a niekiedy nawet do ponad $10^5 s$ [9]. Zmiana wartości stałych czasowych dominujących procesów relaksacyjnych jest związana z występującymi efektami starzeniowymi, poziomem zawilgocenia oraz parametrami oleju. Wyniki badań prowadzonych w ostatnich latach wskazują, że zmiany w *widmach polaryzacyjnych* spowodowane wilgocią i efektami starzeniowymi uwidaczniają się najsilniej w zakresie czasów powyżej 1000 s, a wpływ przewodności oleju dla czasów poniżej 100 s [15,16,17]. Bardzo niskie częstotliwości próbkowania (nie wyższe niż 1 Hz) pozwalają na stosowanie wolnych przetworników analogowo-cyfrowych o dużej dokładności oraz silnie całkujących wejściowych układów eliminacji zakłóceń. Ze względu na długie czasy rejestracji w przyrządach specjalizowanych stosuje się również rejestrację ze zmiennym odstępem próbkowania, np. z logarytmiczną skalą czasu i kilkudziesięcioma próbkami na dekadę [18].

Analiza modelowa wskaźników polaryzacyjnych

Porównanie aktualnie stosowanych parametrów diagnostycznych dla oceny stanu układów izolacyjnych znacząco wykracza poza ramy niniejszego referatu, dlatego poniżej przedstawiono jedynie wybrane zagadnienia dotyczące *wskaźników polaryzacyjnych (współczynników absorpcji)*. Ta prosta i zarazem dość powszechnie stosowana metoda polega na określeniu stosunków zmieniających się w czasie wartości rezystancji np.: R_{60}/R_{15} , R_{300}/R_{15} lub R_{600}/R_{60} (identyfikowany często skrótem PI). Ich wyznaczenie opiera się na rejestracji przebiegu prądu polaryzacji o kształcie odnoszonym z reguły do *modelu multi-Debye'a* (rys.2).



Rys. 2. Schemat zastępczy układu izolacyjnego z N niezależnymi procesami relaksacyjnymi Debye'a

Odpowiedź takiego modelu liniowego układu izolacyjnego na pobudzenie skokiem napięcia $U_{DC} \mathbf{1}(t)$ może być określona za pomocą krzywej zawierającej oprócz składowej impulsowej rozładowania pojemności $Q_C \delta(t)$ oraz stałoprądowej składowej ustalonej I_R również pewną liczbę wzajemnie niezależnych procesów relaksacyjnych, co dla prądu polaryzacji prowadzi do równania:

$$(1) \quad i_p = Q_C \delta(t) + I_R + \sum_{n=1}^N I_n \exp\left(-t/\tau_n\right)$$

gdzie: I_n , τ_n - parametry n-tego procesu Debye'a. Równanie to odpowiada schematowi zastępczemu, zawierającemu

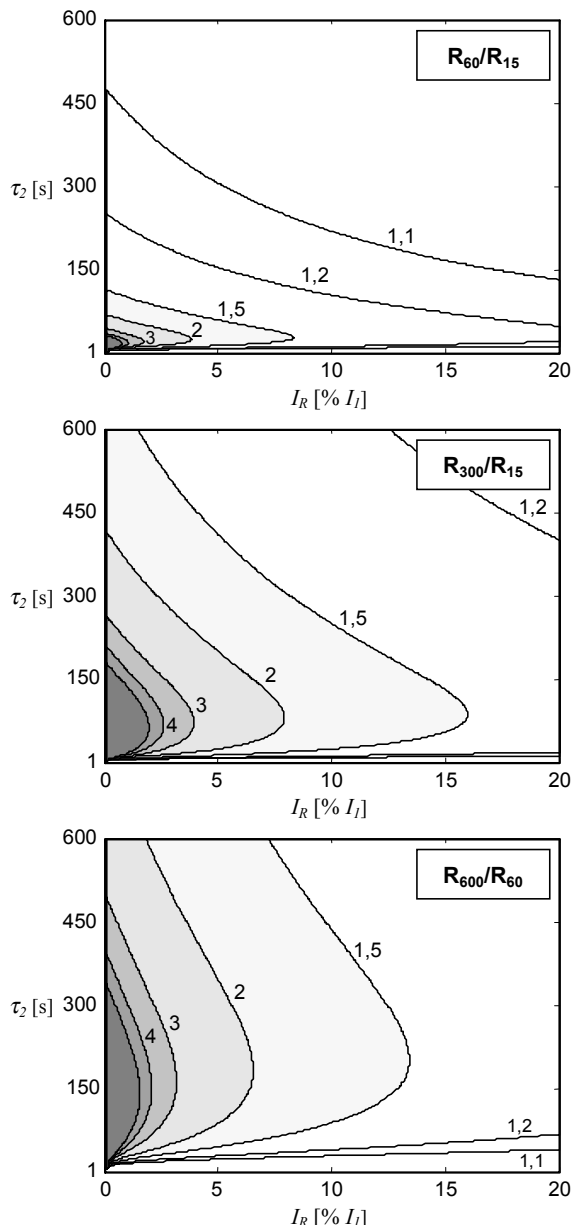
pojemność geometryczna C_0 , rezystancję R_0 oraz N dołączonych równolegle gałęzi R_i-C_i – reprezentujących niezależne procesy relaksacyjne.

Jak wspomniano, dla celów diagnostycznych istotną jest informacja o zmianach kształtu widma relaksacyjnego – charakterystycznego dla danego układu izolacyjnego. Z tego powodu koniecznym jest określenie parametrów poszczególnych jego składowych. Można to zrobić „sprzętowo” – jak ma to miejsce w metodzie RVM, w której widmo relaksacyjne jest skanowane w serii selektywnych czasowo sekwencji pomiaru maksymalnej wartości napięcia powrotnego – lub „programowo” poprzez dokonanie numerycznego „rozplecenia” uzyskanych krzywych prądu polaryzacji/depolaryzacji, minimalizując średniokwadratowy błąd dopasowania przyjętego modelu. Procedury takiego dopasowania są rozbudowane i wymagają użycia dużych mocy obliczeniowych [18,19].

Wskaźniki polaryzacyjne dają pewną możliwość oceny stanu układu izolacyjnego związaną ze zmianami procesów relaksacyjnych, jednak w wielu przypadkach informacja przez nie przenoszona może być fałszywa. Rysunek 3 przedstawia zależność w/w wskaźników dla modelu równoległego (rys.2) z dwoma dominującymi procesami polaryzacyjnymi (stały, szybkozmienny: o amplitudzie $I_1=100$ j.u. i stałej czasowej $\tau_1=0,2$ s oraz zmienny: o amplitudzie $I_2=10$ j.u. i stałej czasowej τ_2 w zakresie od 0 do 600 s) i zmiennym udziałem składowej stałoprądowej I_R (o wartości od 0 do 20 j.u.). Faktyczny wpływ na wartości wskaźników ma stała czasowa τ_2 oraz wielkość składowej stałoprądowej. Uzyskane rozkłady ich wartości uwidaczniają występowanie efektu selektywności poszczególnych wskaźników względem dominującej stałej czasowej. Kombinacja kilku wskaźników może więc pozwolić na oszacowanie tendencji zmian tej stałej. Równocześnie wzrost wartości składnika stałoprądowego (przewodności) przy ustalonych parametrach procesów relaksacyjnych zawsze skutkuje obniżeniem wartości wyznaczonych wskaźników. Publikowane wyniki badań eksploatacyjnych pokazują jednak, że np. dokonanie wymiany oleju na jakościowo lepszy, a więc o niższej przewodności, może prowadzić w efekcie do - nieco zaskakującego - obniżenia wartości wskaźnika R_{60}/R_{15} [16]. Biorąc pod uwagę wyniki modelowania (rys. 3) oznacza to, że poza zmniejszeniem składowej stałoprądowej dochodzi równocześnie do takiej zmiany parametrów procesów polaryzacyjnych, że efektem jest zmniejszenie wartości wskaźnika.

Omówiony model nie jest adekwatny dla analizy odpowiedzi dielektrycznej transformatora z izolacją papierowo-olejową. Uwzględnienie konstrukcji układu izolacyjnego tego obiektu prowadzi do modelu warstwowego (rys. 4a) przyjętego m.in. przez grupę roboczą CIGRE TF 15.01.09 [8,13,14,16]. Jego parametry X i Y uwzględniają wzajemne zależności geometryczne poszczególnych elementów konstrukcyjnych. Na jego podstawie tworzone są elektryczne schematy zastępcze np. przedstawione na rysunkach: 4b [16] i 4c [17], a zawierające: pojemności C , rezystancje R oraz gałęzie R_i-C_i odwzorowujące procesy relaksacyjne. Są one oznaczone literowymi indeksami opisującymi odpowiednio: olej (O) oraz preszpan odstępników (S) i przegród (B).

Dla schematu 4c - jednak bez gałęzi R_i-C_i dla oleju - dokonano przykładowej symulacji wpływu rezystancji R_0 , co odpowiada zmianie przewodności oleju, na wartości współczynników R_{60}/R_{15} oraz R_{600}/R_{60} (tabela 1). Rysunek 5a przedstawia prądy polaryzacji i_p dla czterech wartości rezystancji R_0 , a rysunek 5b wyznaczone na ich podstawie wykresy $i_p \cdot t = f(\log_{10} t)$, pozwalające na szacowanie dominujących stałych czasowych oraz poziomów energetycznych metodą Simmonsa-Tama [21,22].



Rys. 3. Zależność wartości wybranych wskaźników polaryzacyjnych od wartości dominującej stałej czasowej oraz względnej wartości prądu upływu (składowej przewodnościowej).

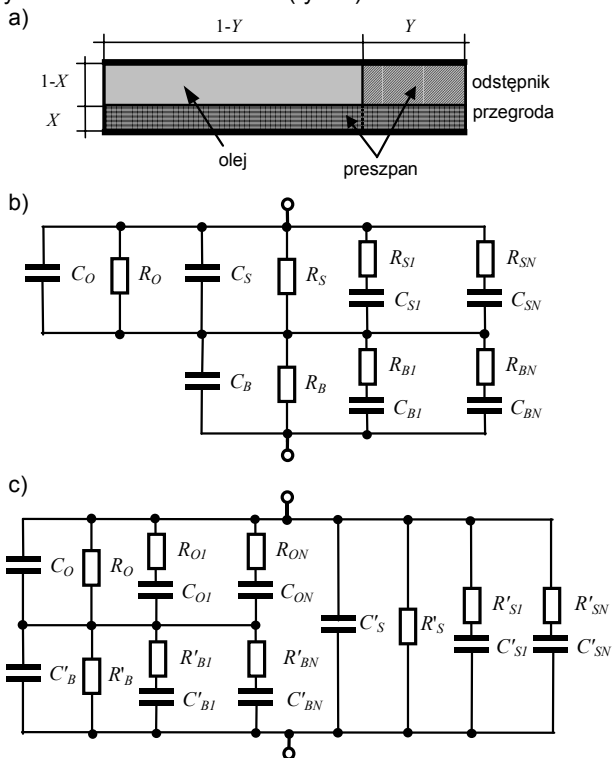
Tabela 1. Wpływ wartości R_0 na wybrane wskaźniki polaryzacyjne

	R_0	$R_0/10$	$R_0/100$	$R_0/1000$
R_{60}/R_{15}	1,25	1,39	2,14	2,76
R_{600}/R_{60}	2,13	2,07	2,16	2,04

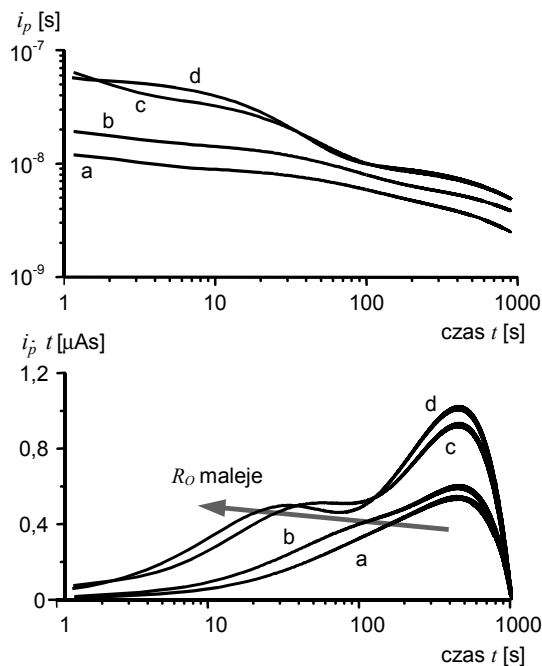
Wnioski i podsumowanie

W artykule przedstawiono krótki opis problemów związanych z pomiarami odpowiedzi dielektrycznej układów izolacyjnych, w szczególności - specyficznych wymagań związanych z parametrami przyrządów pomiarowych oraz czasem rejestracji. W oparciu o trzy schematy zastępcze, modelujące rzeczywiste układy izolacyjne, określono wpływ niektórych ich elementów na wartości wybranych wskaźników polaryzacyjnych. W przypadku modelu równoległego izolacji jednorodnej (rys. 2) wzrost przewodności wpływa zawsze na obniżenie wartości wskaźników polaryzacyjnych. Zmiana zakresu czasów, dla których wyznaczone są wskaźniki pozwala na ich „uwrażliwienie” na różne stałe czasowe (rys. 3). Dla schematu zastępczego modelu warstwowego izolacji transformatora (rys. 4c) zmniejszenie przewodności oleju może prowadzić zarówno do wzrostu

jak i obniżenia wartości wskaźników, przy czym różny jest poziom ich wrażliwości na spadek wartości rezystancji R_O (Tabela 1). Zmiany wartości wskaźników wywołane są skracaniem się stałych czasowych składowych związanych z polaryzacją międzywarstwową. Występowanie efektu przesunięcia stałych czasowych w kierunku krótszych czasów potwierdza analiza zmian kształtu uzyskanych wykresów Simmonsa-Tama (rys. 5)



Rys. 4. Uproszczony model (a) oraz schematy zastępcze (b) i (c) układu izolacyjnego transformatora olejowego (opis w tekście)



Rys. 5. Przebiegi prądów polaryzacji w zależności od wartości rezystancji R_O oraz odpowiadające im wykresy Simmonsa-Tama: a) R_O , b) $R_O/10$, c) $R_O/100$, d) $R_O/1000$

Prezentowane badania były finansowane przez Komitet Badań Naukowych w ramach umowy o badania własne nr: 10.10.120.372: „Przetwarzanie sygnałów w pomiarach wysokonapięciowych”.

LITERATURA

- [1] Han, Y.; Song, Y.H., Condition monitoring techniques for electrical equipment-a literature survey, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 18, 4-13, 2003
- [2] Kachler A.J., On-site diagnosis of power and special transformers, *Conf. Rec. 2000 IEEE ISEI*, pp. 362-367, Anaheim, CA, 2000
- [3] Grabski F., Jaźwiński J., Metody bayesowskie w niezawodności i diagnostyce, *WKŁ*, Warszawa, 2001
- [4] Jonscher A.K., Dielectric relaxation in solids, *Chelsea Dielectrics Press*, London, 1983
- [5] Havriliak Jr S., Havriliak S.J., Dielectric and mechanical relaxation in materials - Analysis, interpretation, and application to polymers, *Hanser Publishers*, 1997
- [6] Wodziński J., Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów, *PWN*, Warszawa, 1997
- [7] Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J., High voltage engineering - Fundamentals, 2nd ed., *Newness Press*, 2000
- [8] Gubanski S.M. et. al., Dielectric response methods for diagnostics of power transformers, *Electra*, No. 202, 25-35, June 2002
- [9] Zaengl W.S., Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment (transformers, cables etc.), *Conf. Proc. 12th ISH, Keynote Speech Session 9*, pp. 76-85, Bangalore, India, 2001
- [10] Németh E., Measuring voltage response: a non-destructive diagnostic test method of HV insulation, *IEE Proc. Sci. Meas. Technol.*, Vol. 146, No.5, 249-252, 1999
- [11] Krivda A., Russell G., Assessment of oil impregnated paper insulated transformers using recovery voltage measurements, *Conf. Rec. 1998 IEEE ICSD*, pp. 64-68, Västerås, Sweden
- [12] Morshuis P.H.F., van Breen H.J., Smit J.J., Urbani G. Recovery voltage measurements on XLPE cables, *Ann. Rep. 1999 CEIDP*, pp. 568-572, Austin, TX, USA
- [13] der Houhanessian V., Zaengl W., On-site diagnosis of power transformers by means of relaxation current measurements, *Conf. Rec. 1998 IEEE ISEI*, vol. 1, pp. 28-34
- [14] Gafvert U., Frimpong G., Fuhr J., Modelling of dielectric measurements on power transforms, *CIGRE 1998*, paper 15-103
- [15] Csépes G et. al., Correlation between electrical and chemical testing techniques for assessing degradation of oil-paper insulation, *CIGRE 1998*, paper 15-202
- [16] Leibfried T et. al., Ageing and Moisture Analysis of Power Transformer Insulation Systems, *CIGRE 2002*, paper 12-101
- [17] Urbani G.M., Brooks R.S., Using the Recovery Voltage Method to evaluate ageing in oil-paper insulation, *Conf. Rec. 1998 IEEE ICSD*, pp. 93-97, Västerås, Sweden
- [18] ALFF Engineering, Switzerland, <http://www.alf-engineering.ch>, PDC Transformer Data Samples.
- [19] Wintle, H.J., Linear and nonlinear data fitting for dielectrics, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electr. Insulation*, vol. 9, No. 5, pp. 845-849, 2002
- [20] Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Włodek R., Zydróż P., Investigation of HV insulation properties - selected time and frequency domain methods, *Ann. Rep. 2003 CEIDP*, paper no. 196, Albuquerque, USA, 2003 (submitted)
- [21] Simmons J.G., Tam M.C., Theory of isothermal currents and the direct determination of trap parameters in semiconductors and insulators containing arbitrary trap distributions, *Phys. Rev. B*, Vol. 7, No. 8, 3706-3713, 1973
- [22] Beigert M. et. al., Computer-aided destruction free ageing diagnosis for medium voltage cables, *Conf. Proc. 8th Int. Symp. On High Voltage Eng.*, paper 67.11, Yokohama 1993

Autor: dr inż. Paweł Zydróż, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
E-mail: pzydron@agh.edu.pl