

Analiza apsorpcionih karakteristika za procenu nehomogenosti i degradacije dielektrika

Miroljub Jevtić, Jordan Radosavljević i Andreja Todorović

Fakultet tehničkih nauka u Kosovskoj Mitrovici

Univerzitet u Prištini

Kosovska Mitrovica, Srbija

miroljub.jevtic@gmail.com

Sadržaj—U radu se vrši analiza apsorpcionih procesa u dielektriku na bazi dva fizička modela i dva ekvivalentna kola – Maxwell-Wagnerovog i Voigt-ovog. Na konkretnom primeru poliimidne kondenzatorske folije pokazana je korelacija između eksperimentalnih krivih odziva na dovedeni napon polarizacije tj krive napona samopražnjenja i kriva povratnog napona, sa jedne strane, i parametara ekvivalentnog kola i parametara nehomogenog dielektrika, sa druge strane. Pri rešavanju ovog zadatka primenjena je metodologija razlaganja krive napona samopražnjenja na eksponencijalne krive. Posebno su razmatrana električne provodnosti pojedinih slojeva nehomogenog dielektrika i celog dielektrika i data je njihova temperaturna zavisnost.

Ključne reči—apsorpcioni procesi; apsorpcione karakteristike; nehomogeni dielektrik;

I. UVOD

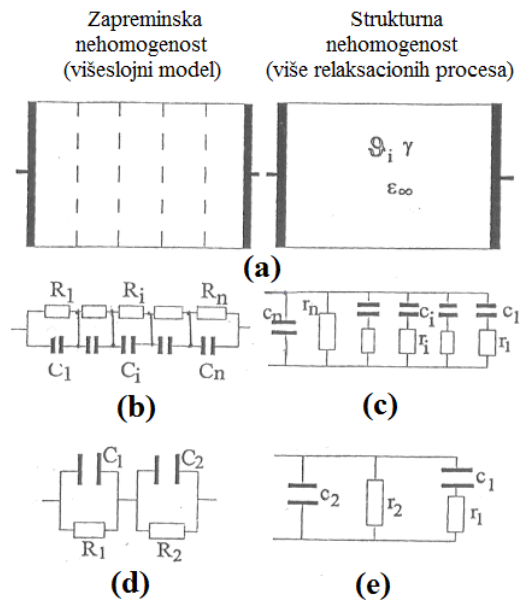
Eksperimentalno snimljene apsorpcione karakteristike (krive odziva struje i napona na odskočni napon polarizacije) koriste se za nedestruktivna dijagnostička ispitivanja starenja dielektrika i električne izolacije [1]-[10]. Analize apsorpcionih procesa u dielektrcima na osnovu dva fizička modela (slojevite i strukturne nehomogenosti) i odgovarajuće dve ekvivalentne šeme (Maxwell-Wagner i Voigt) vršene su u [1]-[4].

Cilj ovog rada je da se izvrši analiza apsorpcionih karakteristika (krive napona samopražnjenja i povratnog napona) i da se eksperimentalno, na primeru kondenzatorske folije, potvrdi njihova veza sa parametrima, nehomogenošću i starenjem dielektrika.

U Maxwell-Wagnerovom fizičkom modelu kojim se predstavljaju apsorpcioni procesi u dielektriku (sl. 1a) nehomogeni dielektrik se modeluje kao višefazni (sa više slojeva) a u odgovarajućem ekvivalentnom kolu (sl. 1b) svaki sloj je predstavljen paralelnom vezom kapacitivnosti C_i i otpornosti R_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) čije relaksaciono vreme je $\tau_i = R_i C_i$. Uprošćeni model sa dva sloja predstavljen je na sl. 1d.

Drugi fizički model kojim se predstavljaju dielektrik i polarizacioni procesi u njemu je model Voigt-a (sl. 1a, 1c i 1e). U njemu se strukturna nehomogenost dielektrika predstavlja relaksacionim polarizacionim komponentama sa odgovarajućim relaksacionim vremenima $\square_i = r_i c_i$ ($i = 1, 2, \dots, n-1$) a ostali parametri dielektrika su: γ - električna provodnost, ϵ_∞ - visokofrekventna permitivnost, r_n - rezistansa i

c_n - visokofrekventna kapacitivnost. Svaka komponenta relaksacione polarizacije u Voigt-ovom ekvivalentnom kolu je predstavljena serijskom vezom rezistanse r_i i kapacitivnosti c_i , a iste su vezane paralelno sa visokofrekventnom kapacitivnošću c_n i otpornošću r_n iz koje se može izračunati i provodnost dielektrika γ .



Slika 1. (a) Dva fizička modela nehomogenog dielektrika; i (b) njihova odgovarajuća ekvivalentna kola: Maxwell-Wagnerovo ekvivalentno kolo; (c) Voigt-ovo ekvivalentno kolo; (d) Uprošćeno Maxwell-Wagnerovo ekvivalentno kolo; (e) Uprošćeno Voigt-ovo ekvivalentno kolo.

U slučaju Maxwell-Wagnerovog ekvivalentnog kola može se napisati sistem diferencijalnih jednačina:

$$I_M = \frac{Q_i}{\tau_i} + \frac{dQ_i}{dt}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1a)$$

$$U_M = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{C_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1b)$$

gde je Q_i naelektrisanje kondenzatora C_i .

Iz Voigt-ovog ekvivalentnog kola može se napisati sistem diferencijalnih jednačina:

$$I_V = \frac{dq_n}{dt} + \frac{q_n}{\vartheta_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{dq_i}{dt}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (2a)$$

$$U_V = \frac{q_n}{c_n} = \frac{q_i}{c_i} + r_i \frac{dq_i}{dt}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (2b)$$

gde su q_n i q_i naelektrisanja na kondenzatorima c_n i c_i i $\vartheta_n = r_n c_n$.

Rešavanjem sistema jednačina (1) i (2) (primenom Laplasove transformacije) [1], [3], dobijaju se izrazi za napon samopražnjenja i povratni napon, kao odzivi na odskočni napon polarizacije U_p , u slučaju Maxwell-ove ekvivalentne šeme (izrazi sa leve strane jednakosti u (3) i (4)) i u slučaju Voigt-ove ekvivalentne šeme (izrazi sa desne strane jednakosti u (3) i (4)):

$$U_d(t) = U_p \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{R_\Sigma} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) = U_p \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{k=1}^{n-1} (\tau_i - \vartheta_k)}{\prod_{k \neq i} (\tau_i - \tau_k)} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (3)$$

$$U_r(t) = U_p \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{R_\Sigma} \exp\left(1 - \frac{\tau_\Sigma}{\tau_i}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) = U_p \sum_{i=1}^n \frac{\prod_{k=1}^n (\tau_i - \vartheta_k)}{\tau_i \prod_{k \neq i} (\tau_i - \tau_k)} \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (4)$$

gde su $U_d(t)$ i $U_r(t)$ napon samopražnjenja i povratni napon, respektivno; U_p napon polarizacije dielektrika; $R_\Sigma = \sum_{i=1}^n R_i$; $\tau_\Sigma = R_\Sigma / \sum_{i=1}^n (R_i / \tau_i)$.

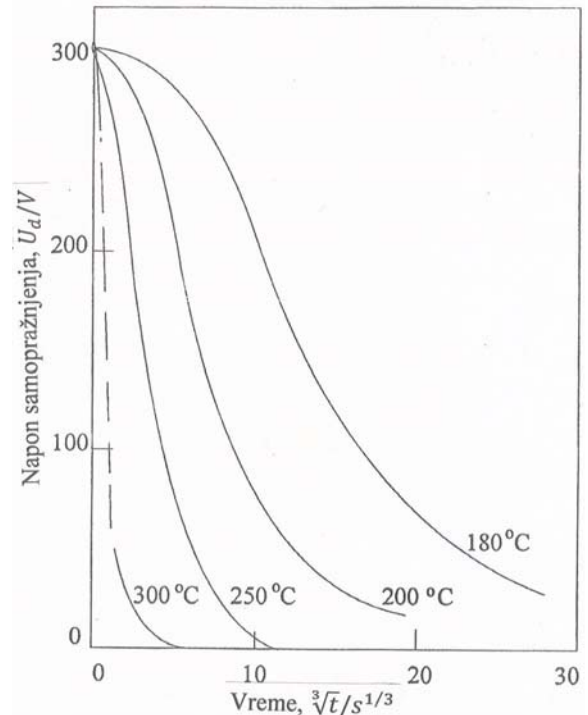
II. METODA PRORAČUNA KRIVE POVATNOG NAPONA I PARAMETARA DIELEKTRIKA IZ EKSPERIMENTALNE KRIVE NAPONA SAMOPRAŽNJENJA

Ispitivanje je sprovedeno na kondenzatoru kapacitivnosti $51.87 \cdot 10^{-9}$ F sa poliimidnom folijom kao dielektrikom. Kondenzatoru je najpre doveden jednosmerni napon U_p u toku vremena t_1 zatim se napon isključuje i registruje promena napona samopražnjenja $U_d(t)$ pomoću voltmetra kapacitivnog tipa. Kriva promene povratnog napona $U_r(t)$ se dobija registrovanjem promene napona nakon kratkotrajnog kratkog spoja kondenzatora preko otpornosti. Krive napona samopražnjenja u formi $U_d(t) = f(t^{1/3})$ poliimidne kondenzatorske folije su snimljene za temperaturni opseg od 180 °C do 300 °C (sl. 2).

Na sl. 3 (kriva 1) data je eksperimentalna kriva $\log U_d(t) = f(t)$. Ova kriva je razložena na tri eksponencijalne krive (krive 1', 2' i 3') u skladu sa relacijom:

$$U_d(t) = \sum_{i=1}^n U_i \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (5)$$

gde su: U_i predeksponecijalni koeficijent eksponencijalne funkcije u (5); $\tau_i = R_i C_i$ vreme relaksacije i -tog sloja u Maxwell-ovom modelu.



Slika 2. Zavisnost napona samopražnjenja od vremena za poliimidni kondenzator ($C=51.87 \cdot 10^{-9}$ F) pri različitim temperaturama.

Metoda koja je primenjena u ovom radu, bazira se na teoretskim razmatranjima u radovima [1]-[3] i na aproksimaciji krive $\log U_d(t) = f(t)$ pravom linijom za velike vrednosti t . Prava linija (1' na sl. 3) je opisana eksponencijalnim zakonom:

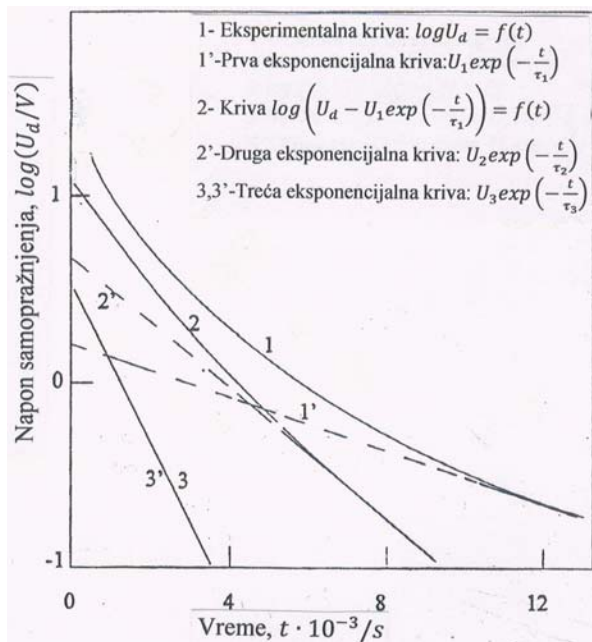
$$U_1(t) = U_1(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \quad (6)$$

Sa ove krive određene su vrednosti $U_1(0)$ i τ_1 . Posle toga, izračunavana je razlika $U_d(t) - U_1(t)$ i nacrtana funkcija $\log[U_d(t) - U_1(t)] = f(t)$ (sl. 3, kriva 2). Dalje se crta prava (sl. 3, kriva 2'):

$$U_2(t) = U_2(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (7)$$

Oдавde se određuje vreme relaksacije τ_2 . Ovaj postupak je nastavljen sve dok kriva $\log[U_d(t) - \sum_{i=1}^{n-1} U_i(t)] = f(t)$ ne postane prava linija koja je opisana funkcijom:

$$U_n(t) = U_n(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (8)$$



Slika 3. Metoda razlaganja krive $U_d(t)$ na eksponencijalne krive za poliiimidni kondenzator ($C=51.87 \cdot 10^{-9}$ F).

U ovom eksperimentu, kako se vidi na sl. 3, dobijene su tri krive ($n=3$). Vrednosti parametara U_i i τ_i date su u tabeli I.

Iz funkcije povratnog napona:

$$U_r(t) = \sum_{i=1}^n U_i \exp\left(1 - \frac{\tau_\Sigma}{\tau_i}\right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_i}\right) \quad (9)$$

dobijene su relacije za proračun vrednosti $\tau_\Sigma = R_\Sigma C_\Sigma$ pri uslovu $U_r(t)=0$ za $t=0$:

$$\tau_\Sigma = \frac{U_p}{\sum_{i=1}^n \frac{U_i}{\tau_i}}; U_p = \sum_{i=1}^n U_i \quad (10)$$

Vrednosti parametra τ_Σ date su u tabeli I. Iz vrednosti τ_Σ izračunavaju se provodnost γ_Σ i rezistansa R_Σ dielektrika koje su date u tabeli I:

$$\gamma_\Sigma = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\tau_r}; R_\Sigma = \frac{\tau_\Sigma}{C_\Sigma}; C_\Sigma = C_n = 51.87 \cdot 10^{-9} \text{ F} \quad (11)$$

gde je $\epsilon_0 \epsilon_r$ permitivnost poliiimidne folije.

TABELA I. PARAMETRI RAZLAGANJA KRIVE NAPONA SAMOPRAŽNENJA NA EKSPONENCIJALNE KRIVE.

T $^{\circ}\text{C}$	U_1 V	U_2 V	U_3 V	τ_1 s	τ_2 s	τ_3 s	τ_Σ s	γ_Σ $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$	$R_\Sigma \cdot 10^{-9}$ Ω
180	117	157	26	14520	1908	720	2372	1.12	45.7
200	51	105	144	6320	1030	180	330	8.04	6.37
220	52	105	143	923	180	26	48.9	54.4	0.94
250	80	111	109	346	66.7	19	23.6	112	0.46
280	12.2	25.7	262	296	30	2.5	2.86	921	0.056
300	10	43.7	246	113	8.4	2.7	3.11	810	0.063

Iz vrednosti parametara razložene krive napona samopražnjenja (tabela I) izračunate su vrednosti višeslojnog modela dielektrika odnosno Maxwell-Wagner-ovog ekvivalentnog kola:

$$R_i = \frac{U_i}{U_p} R_\Sigma; C_i = \frac{\tau_i}{R_i}; \gamma_i = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{ri}}{\tau_i}; \frac{d_i}{d} = \frac{C_n}{C_i} \quad (12)$$

gde su: C_n i C_i kapacitivnosti folije i i -tog sloja, respektivno; d i d_i debljine folije i i -tog sloja, respektivno. U [4] je utvrđeno da su permitivnost polimerne folije i permitivnost slojeva u Maxwell-Wagner-ovom ekvivalentnom kolu približno iste, pa je ova aproksimaciju uvršćena u (12): $\epsilon_0 \epsilon_{ri} = \epsilon_0 \epsilon_r$. Rezultati ovih proračuna dati su u tabelama II i III.

TABELA II. PARAMETRI R_i I C_i MAXWELL-WAGNER-OVOG EKVIVALENTNOG KOLA ZA POLIIIMIDNU KONDENZATORSKU FOLIJU.

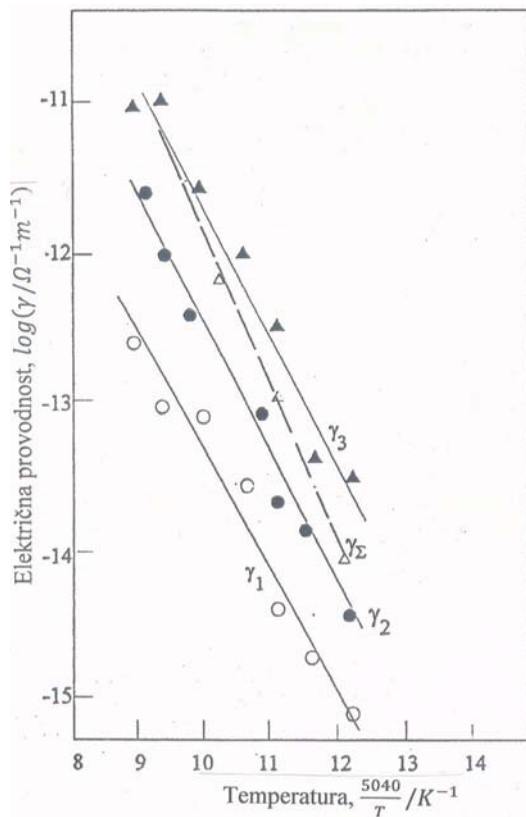
T $^{\circ}\text{C}$	$R_1 \cdot 10^{-8}$ Ω	$R_2 \cdot 10^{-8}$ Ω	$R_3 \cdot 10^{-8}$ Ω	C_1 μF	C_2 μF	C_3 μF
180	176	239	40	0.814	0.080	0.182
200	10.8	22.3	30.6	5.84	0.463	0.059
220	1.63	3.30	4.49	5.65	0.546	0.058
250	1.22	1.69	1.66	2.85	0.395	0.061
280	0.022	0.047	0.48	130	6.35	0.052
300	0.02	0.087	0.49	56.6	0.96	0.055

TABELA III. PARAMETRI γ_i , γ_Σ I d_i MAXWELL-WAGNER-OVOG EKVIVALENTNOG KOLA ZA POLIIIMIDNU KONDENZATORSKU FOLIJU.

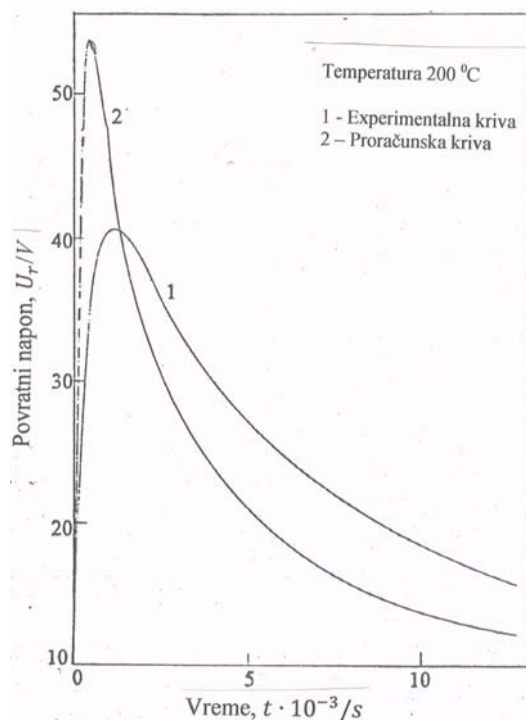
T $^{\circ}\text{C}$	$\gamma_1 \cdot 10^{-14}$ Ωm	$\gamma_2 \cdot 10^{-14}$ Ωm	$\gamma_3 \cdot 10^{-14}$ Ωm	$\gamma_\Sigma \cdot 10^{-14}$ Ωm	d_1/d	d_2/d	d_3/d
180	0.183	1.39	3.69	1.12	0.064	0.651	0.285
200	0.420	2.58	14.7	8.04	0.009	0.112	0.879
220	2.88	14.7	102	54.36	0.009	0.095	0.896
250	7.67	39.8	263	112.3	0.018	0.131	0.851
280	8.97	88.5	1054	921	0.0004	0.0082	0.9914
300	23.5	316	983	810	0.0009	0.0539	0.9452

Na sl. 4 date su temperaturne zavisnosti $\gamma_i(T)$ ($i=1,2,3$), i $\gamma_\Sigma(T)$ u obliku $\log \gamma = f(1/T)$ i $\log \gamma_\Sigma = f(1/T)$. Ove krive, koje karakterišu stepen nehomogenosti poliiimidne folije, su prave linije a odgovarajuća energija aktivacije je $W=0.9-1.1$ eV, što je u saglasnosti sa podacima iz literature datim za temperaturnu provodnost poliiimidne folije [11]. Sl. 4 pokazuje da, u ovom slučaju, postoje tri komponente nehomogenog dielektrika (poliiimidne folije) sa različitim električnim provodnostima. Vrednosti provodnosti γ_i komponente sa najmanjim sadržajem u foliji ($d_i/d=0.06-0.001$) su 10 do 30 puta niže nego vrednosti osnovne komponente (γ_3) i cele folije (γ_Σ). To znači da je i električno naprezanje ove komponente 10 do 30 puta veće nego srednje električno naprezanje folije ($E_m=U/d$). Verovatno su ove nehomogenosti tanki slojevi uz elektrode, koji određuju blokirajuća svojstva kontakata.

Iz podataka table I, primenom formule (9) dobijena je proračunska kriva povratnog napona $U_r(t)$ (sl. 5, kriva 2). Na sl. 5 nacrtana je i eksperimentalna kriva povratnog napona (kriva 1). Sa sl. 5 se vidi da između ove dve krive postoji izvesno odstupanje, naročito u njihovim maksimumima. Razlog i eliminacija ovog odstupanja biće traženi u daljim istraživanjima.



Slika 4. Temperaturne zavisnosti električnih provodnosti, $\log \gamma = f(1/T)$ i $\log \gamma_{\Sigma} = f(1/T)$ nehomogenog dielektričnog modela – poliimidne kondenzatorske folije.



Slika 5. Eksperimentalna i proračunska kriva povratnog napona za poliimidnu kondenzatorsku foliju ($C = 51.87 \cdot 10^{-9} \text{ F}$) pri $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

III. ZAKLJUČAK

Analiza apsorpcionih procesa u dielektricima i elektroizolacionim sistemima pokazuje da postoji korelacija između apsorpcionih karakteristika (krive napona samopražnjenja i krive povratnog napona) i parametara dielektrika. Ova korelacija omogućuje da se na bazi eksperimentalnih apsorpcionih karakteristika mogu procenjivati: (a) električni parametri dielektrika; (b) stepen nehomogenosti dielektrika; (c) stepen starenja dielektrika tokom eksploatacije. Ovakav način provjere stanja dielektrika je pogodan jer se vrši na osnovu nedestruktivnih ispitivanja i može se sprovesti na dielektricima i elektroizolacionim sistemima direktno u pogonu.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao u okviru projekta TR 33046 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Autori se zahvaljuju Ministarstvu na pomoći.

LITERATURA

- [1] S. N. Kojkov, M. Jevtić and V. N. Sozonov, "Diagnostic of electrical insulation by means of absorption characteristic" Proc. II International Conference of Electrotechnical Materials and Components ICEMS-97, 1-4 December 1997, Moscow, pp. 39-40, 1997.
- [2] E. Nemeth, "Measuring voltage response: a non-destructive diagnostic test method of HV insulation", IEE Science, Measurement and Technology, vol 146, Iss. 5, pp. 249-252, 1999.
- [3] S. N. Kojkov, "Theoretical analysis of absorption processes as a basis of non-destructive testing techniques of dielectric", Proc. International Conference on Dielectrics and Insulation ICDI-97, Budapest 10-13 September 1997, pp. 149-152, 1997.
- [4] M. E. Borisova, S. N. Kojkov, "Dijagnostika élektricheskoy isolyatsii po absorpsionim kharakteristikam diélektrikov", Sankt Peterburgskiy gosudarstveniy tekhnicheskoy universitet, Sankt Peterburg, 1994.
- [5] M. A. Dakka, A. Bulinski and S. S. Bamji, "On-site diagnostics of medium-voltage underground cross-linked polyethylene cables", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 27, No 4, pp. 34-44, 2011.
- [6] D. Kamenka and M. Beigert, "Diagnosis at oil-paper insulation with the method of the return voltage measurement", 17th International Cable Symposium 2002, 22-26 September 2002, Zlatibor, 2002.
- [7] T. K. Saha, J. H. Yew and P. Purkait, "Experience with dielectric response measurements on oil-paper insulated cables", XIII International Symposium on High Voltage Engineering, Netherlands 2003, pp. 1-4, 2003.
- [8] Yao, Zheng Tong and Saha, Tapan K., "Experience with Return Voltage Measurements for Assessing Insulation Conditions in Service Aged Transformers", IEEE Transactions on Power Delivery, vol 18 No 1, pp. 128-135.
- [9] P. Cichecki, E. Gulski, J. J. Smit and F. Vries, "Integral condition assessment by dielectric response diagnosis of service aged external gas pressure HV power cables", Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on, 9-12 June 2008, pp. 11-14.
- [10] M. Farahani, H. Borsi and E. Gockenbach, "Calculation and measurement of dielectric response function in insulation systems of high voltage rotating machines", Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on, 1-5 June 2003, vol 1, pp. 290-293, 2003.
- [11] G. Li, D. Stoffi and K. Nevill, New Linear Polymers, Khimiya, Moscow, 1972.

ABSTRACT

This paper gives an analysis of absorption processes in dielectric on the base of two physical models and two equivalent circuits – Maxwell-Wagner and Voigt. On the concrete example of polyimide capacitor film it is shown the correlation between the experimental curves of decay voltage and return voltage, on the one side, and parameters of equivalent circuit and inhomogeneous dielectric, on the other side. For the solving this problem it is implemented the method

of decomposition of decay voltage curves into exponential curves. It is considered the electrical conductivity of separate layers of inhomogeneous dielectric and whole dielectric, and their temperature dependence is given.

ANALYSIS OF ABSORPTION CHARACTERISTICS FOR ASSESSMENT OF DIELECTRIC INHOMOGENEITY AND DEGRADATION

Miroljub Jevtić, Jordan Radosavljević and Andreja Todorović