



Piotr Frączak*

WSPOMAGANE KOMPUTEROWO MODELOWANIE PROCESU STARZENIA DIELEKTRYKÓW ORGANICZNYCH

Streszczenie: Proces starzenia dielektryków organicznych wymuszano powierzchniowymi wyładowaniami niezupełnymi (PWNZ). PWNZ inicjowano polem elektrycznym. Uzyskano zależność ubytków masy M od energii W PWNZ traconej na próbkach. Zależność $M(W)$ opisano trójparametrowym równaniem Hoerla. Parametry równania wyznaczono w oparciu o dane doświadczalne. Zastosowano metodę najmniejszych kwadratów w ujęciu macierzowym. Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu Mathcad.

Słowa kluczowe: dielektryki organiczne, proces starzenia

1. Wstęp

Izolatory organiczne wysokiego napięcia podczas eksploatacji ulegają procesowi starzenia. Proces starzenia przejawia się m.in. erozją powierzchni, która wpływa w istotny sposób na zmiany własności elektrycznych izolatorów (rezystywność powierzchniowa, odporność na prądy pełzające, odporność na łuk elektryczny i inne). Erozja powierzchni izolatorów organicznych wywołana jest przede wszystkim powierzchniowymi wyładowaniami niezupełnymi (PWNZ). Powierzchniowym wyładowaniom elektrycznym towarzyszy wydzielanie się produktów gazowych (wodór, tlen, dwutlenek węgla i inne). Produkty gazowe powstają na skutek częściowej destrukcji chemicznej materiału dielektryka. Konsekwencją tego procesu jest m.in. zmiana masy izolatora.

Wiele kwestii dotyczących procesów starzenia dielektryków stanowi przedmiot zainteresowania wielu instytucji naukowych i ośrodków przemysłowych na całym świecie.

Niniejsza praca stanowi próbę syntetycznego ujęcia wspomnianej problematyki.

* Uniwersytet Szczeciński, ul. Wielkopolska 15, 70-451 Szczecin

2. Część doświadczalna

2.1. Przedmiot badań

Do badań użyto próbek wykonanych z kompozytów epoksydowych o składzie zamieszczonym w tabeli 1.

Tabela 1. Skład kompozycji żywic epoksydowych użytych do badań

Lp.	Skład kompozycji	A1, A2, A3		B1, B2, B3		C1, C2, C3	
		(a)		(b)		(c)	
1	Żywica (cz. w.)	Ep2	100	CY185	100	Ep2	100
2	Utwardzacz (cz. w.)	F	30	HHF	30	F	30
3	Przyspieszacz (cz. w.)	E2	0,3	DYG65	6	E2	0,5
4	Wypełniacz (cz. w.)	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	200	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	320	SiO ₂	200

(a) – oznaczenie próbek kompozycji epoksydowej A;

(b) – oznaczenie próbek kompozycji epoksydowej B;

(c) – oznaczenie próbek kompozycji epoksydowej C.

2.2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na próbkach wykonanych z materiałów izolacyjnych (tabela 1). Próbki te były wykonane w formie płytek. Na próbkach ustawiano elektrody (elektroda wewnętrzna — walec $\varnothing_1 = 26$, elektroda zewnętrzna — pierścień o średnicy wewnętrznej $\varnothing_2 = 51$ i zewnętrznej $\varnothing_2 = 70$). Starzenie próbek wywoływano napięciem ($U = 6 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$), które doprowadzano do elektrod. Wartość energii W wydzielanej na badanych próbkach obliczono w oparciu o mierzone prądy PWNZ i czas starzenia [1]. Natomiast zmiany masy próbek dokonywano na podstawie ważenia ich po określonym czasie działania PWNZ. Zależności $M(W)$ zamieszczono w tabeli 2.

3. Model matematyczny procesu starzenia dielektryków organicznych

3.1. Trójparametrowe równanie Hoerla

W oparciu o badania doświadczalne (rozdział 2), analizę ich wyników oraz studia literaturowe zastosowano do modelowania matematycznego trójparametrowe równanie Hoerla A. E. [2]:

$$M(W) = \beta_0 W^{\beta_1} \exp(\beta_2 W) \quad (1)$$

Równanie to wiąże zmiany masy M próbek z energią W PWNZ traconą na nich podczas starzenia. Przydatność równania Hoerla do modelowania matematycznego ujawnia się różnorodnością kształtów wykresu tego równania. Inną, równie ważną cechą omawianego równania jest możliwość jego linearyzacji na drodze logarytmowania.

Tabela 2. Zależność ubytków masy materiału A, B i C od energii W PWNZ

Lp.	W [J]	A $M(W) 10^{-6}$ [kg] (a)	B $M(W) 10^{-6}$ [kg] (b)	C $M(W) 10^{-6}$ [kg] (c)
1	5428,00	15	30	27
2	122,44	23	34	33
3	186,70	25	36	34
4	355,80	29	38	35
5	435,12	30	40	35
6	667,40	34	41	40
7	837,80	36	48	41
8	1025,10	38	49	44
9	1173,55	39	51	45
10	1326,26	43	54	46

- (a) – ubytek masy kompozytu epoksydowego A (wartość średnia wyznaczona z trzech próbek);
 (b) – ubytek masy kompozytu epoksydowego B (wartość średnia wyznaczona z trzech próbek);
 (c) – ubytek masy kompozytu epoksydowego C (wartość średnia wyznaczona z trzech próbek).

3.2. Pasowanie równań do danych doświadczalnych metodą NK w ujęciu macierzowym

Dla wyznaczenia parametrów $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ równania (1) zastosowano metodę najmniejszych kwadratów w ujęciu macierzowym. Procedurę pasowania równania Hoerla do danych doświadczalnych poprzedzono jego linearyzacją. Linearyzację równania (1) dokonano na drodze logarytmowania (2):

$$\ln M(W) = \ln \beta_0 + \beta_1 \ln W + \beta_2 W \quad (2)$$

Następnie w oparciu o wzór (2) oraz dane doświadczalne zamieszczone w tabeli 2 utworzono następujące wektory i macierz:

$$W := \begin{bmatrix} 1 & 4.000 & 54.58 \\ 1 & 4.808 & 122.40 \\ 1 & 5.230 & 186.70 \\ 1 & 5.874 & 355.80 \\ 1 & 6.076 & 435.80 \\ 1 & 6.503 & 667.40 \\ 1 & 6.738 & 837.80 \\ 1 & 6.933 & 1025.10 \\ 1 & 7.068 & 1173.55 \\ 1 & 7.190 & 1326.26 \end{bmatrix} \quad MA := \begin{bmatrix} 2.708 \\ 3.135 \\ 3.219 \\ 3.367 \\ 3.401 \\ 3.526 \\ 3.584 \\ 3.638 \\ 3.663 \\ 3.761 \end{bmatrix} \quad MB := \begin{bmatrix} 3.401 \\ 3.526 \\ 3.584 \\ 3.638 \\ 3.689 \\ 3.714 \\ 3.871 \\ 3.891 \\ 3.932 \\ 3.989 \end{bmatrix} \quad MC := \begin{bmatrix} 3.296 \\ 3.497 \\ 3.526 \\ 3.555 \\ 3.555 \\ 3.689 \\ 3.714 \\ 3.784 \\ 3.807 \\ 3.829 \end{bmatrix}$$

gdzie: W macierz energii PWNZ wydzielonej na materiałach izolacyjnych podczas starzenia; MA, MB, MC — wektory zmian masy materiałów A, B, C podczas starzenia.

Wektor parametrów $\beta(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$ równania (2) zawarty jest w układzie równań normalnych (3), które zapisano w postaci macierzowej [4].

$$W^T W \beta = W^T M \quad (3)$$

Mnożąc lewostronnie równanie (3) przez $(W^T W)^{-1}$, otrzymano (4)

$$\hat{\beta} = (W^T W)^{-1} W^T M \quad (4)$$

Otrzymany wektor $\hat{\beta}$ jest estymatorem parametrów równania (2). Obliczenia przeprowadzono na utworzonych macierzach z zastosowaniem programu MATHCAD [5]. Wyznaczone estymatory parametrów zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Estymatory parametrów wektora $\hat{\beta}$

Lp.	Materiał izolacyjny	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	MCCS	RMS	DF
1	A	4, 229	0, 336	$-1, 139 \cdot 10^{-4}$	0, 923	2, 056	7
2	B	21, 542	0, 085	$2, 272 \cdot 10^{-4}$	0, 975	1, 593	7
3	C	18, 247	0, 107	$1, 163 \cdot 10^{-4}$	0, 960	1, 739	7

MCCS – kwadrat współczynnika korelacji wielokrotnej [3];

RMS – estymator wariancji;

DF – liczba stopni swobody.

Dysponując wartościami liczbowymi wektora (tab. 3) oraz równaniem (1) obliczono teoretycznie zmiany masy materiałów A, B, C w zależności od energii W . Obliczenia te porównano ze zmianami mas określonymi doświadczalnie i zamieszczono w tabelach 4, 5, 6.

4. Podsumowanie

Otrzymano zgodność wyników pomiarów z wartościami obliczonymi z równania (1). Ponadto uzyskano dość wysoką korelację pasowanych równań (tabela 3). Wskazuje to na możliwość matematycznego modelowania procesu starzenia dielektryków organicznych. Natomiast zastosowanie programu Mathcad do wyznaczania parametrów wspomnianego równania metodą NK w ujęciu macierzowym pozwala uniknąć skomplikowanych obliczeń. Procedura obliczania parametrów sprowadza się do zdefiniowania macierzy i wektorów, a następnie wprowadzenia ich do równania (1) w zapisie macierzowym.

Tabela 4. Zmiany masy materiału A określone doświadczalnie i wyznaczone teoretycznie

Lp.	W [J]	A $M(W) 10^{-6}$ [kg] (a)	B $M(W) 10^{-6}$ [kg] (b)	C $M(W) 10^{-6}$ [kg] $\sigma = a - b$
1	54,58	15,0	16,113	-1,113
2	122,44	23,0	20,976	2,024
3	186,70	25,0	23,994	1,006
4	355,80	29,0	29,231	-0,231
5	435,12	30,0	30,995	-0,995
6	667,40	34,0	34,851	-0,851
7	837,80	36,0	36,895	-0,895
8	1025,10	38,0	38,650	-0,650
9	1173,55	39,0	39,769	-0,769
10	1326,26	43,0	40,723	2,227

(a) – wartość określona doświadczalnie; (b) – wartość wyznaczona ze wzoru (1).

Tabela 5. Zmiany masy materiału B określone doświadczalnie i wyznaczone teoretycznie

Lp.	W [J]	A $M(W) 10^{-6}$ [kg] (a)	B $M(W) 10^{-6}$ [kg] (b)	C $M(W) 10^{-6}$ [kg] $\sigma = a - b$
1	54,58	30,0	30,642	-0,642
2	122,44	34,0	33,330	0,670
3	186,70	36,0	35,055	0,945
4	355,80	38,0	38,481	-0,481
5	435,12	40,0	39,857	0,143
6	667,40	41,0	43,572	-2,572
7	837,80	48,0	46,176	1,824
8	1025,10	49,0	49,017	-0,017
9	1173,55	51,0	51,285	-0,285
10	1326,26	54,0	53,651	0,349

(a) – wartość określona doświadczalnie; (b) – wartość wyznaczona ze wzoru (1).

Tabela 6. Zmiany masy materiału C określone doświadczalnie i wyznaczone teoretycznie

Lp.	W [J]	A $M(W) 10^{-6}$ [kg] (a)	B $M(W) 10^{-6}$ [kg] (b)	C $M(W) 10^{-6}$ [kg] $\sigma = a - b$
1	54,58	27,0	28,172	-1,172
2	122,44	33,0	30,959	2,041
3	186,70	34,0	32,631	1,369
4	355,80	35,0	35,657	-0,657
5	435,12	35,0	36,771	-1,771
6	667,40	40,0	39,547	0,453
7	837,80	41,0	41,332	-0,332
8	1025,10	44,0	43,164	0,836
9	1173,55	45,0	44,556	0,444
10	1326,26	46,0	45,952	0,048

(a) – wartość określona doświadczalnie; (b) – wartość wyznaczona ze wzoru (1).

Literatura

- [1] **Frączak P.:** *Metoda określania odporności tworzyw organicznych na erozję wywołaną działaniem powierzchniowych wyładowań niezupełnych.* Praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin 1992
- [2] **Hoerl A. E.:** *Fitting Curves To Data Chemical Business Handbook.* Section 20, P-55-77, New York Mc Graw-Hill 1954
- [3] **Jóźwiak J., Podgórski J.:** *Statystyka od podstaw.* PWE, Warszawa 1997
- [4] **Greń J.:** *Statystyka matematyczna. Modele i zadania.* PWN, Warszawa 1982
- [5] **Wiśniewski M., Żero A.:** *Mathcad 7.0,* Exit, Warszawa 1998

COMPUTER AIDED CIRCUMSCRIBE OF AGEING PROCESS OF ORGANIC DIELECTRIC MATERIALS

The ageing process of organic dielectric materials was caused by surface partial discharges (SPD). The relation between the change of mass and energy in SPD has been obtained. Basing on relation $M(W)$ the mathematical model of ageing process of organic dielectric materials has been created.