

Wiesław TARCZYŃSKI*
Ryszard KOPKA*

SZACOWANIE CZASU UŻYTKOWANIA SUPERKONDENSATORÓW NA PODSTAWIE PRZYSPIESZONYCH TESTÓW STARZENIOWYCH Z WYKORZYSTANIEM MODELI STOCHASTYCZNYCH

W artykule przedstawiono sposób szacowania rozkładu funkcji niezawodności superkondensatorów z zastosowaniem przyspieszonych testów starzeniowych. Przyspieszenie procesu starzenia zrealizowano poprzez przyjęcie wyższego napięcia pracy kondensatora, a jego niezawodność określono na podstawie pomiaru zmian wartości szeregowej rezystancji zastępczej. Rozkład funkcji niezawodności wyznaczono z wykorzystaniem stochastycznych modeli różniczkowych. Parametry modeli wyznaczono na podstawie obserwacji zmian parametrów kondensatora na początku testowania. W celu wyeliminowania wpływu innych czynników przyspieszających procesy starzenia, kondensator był umieszczony w komorze temperaturowej zapewniającej stałą temperaturę. W artykule opisano budowę stanowiska pomiarowego, algorytm prowadzenia badań, procedurę szacowania stopnia niezawodności oraz uzyskane na jej podstawie wyniki.

SŁOWA KLUCZOWE: superkondensator, przyspieszone testy starzeniowe, procesy degradacji, stochastyczne modele różniczkowe, niezawodność

1. WPROWADZENIE

Wzrost wymagań użytkowników w zakresie poprawności działania elementów i układów elektronicznych oraz wzrost konkurencyjności, zmusza producentów do wprowadzania na rynek produktów spełniających coraz wyższe wymagania niezawodnościowe. Jednak ciągły rozwój technologii, opracowywanie nowych rozwiązań czy pojawianie się nowych materiałów, powoduje, że projektanci i producenci mają bardzo mało czasu na badania nowo opracowanych i wprowadzanych produktów [8].

Szacowanie czasu użytkowania dla elementów o bardzo dużej niezawodności jest zagadnieniem bardzo trudnym. Bardzo długi nominalny czas pracy powoduje, że praktycznie nie można przeprowadzić badań rozkładu czasu użytkowania, testując urządzenia lub elementy w ich nominalnych warunkach. Z te-

* Politechnika Opolska.

go powodu praktycznym rozwiązaniem jest stosowanie przyspieszonych testów starzeniowych.

Standardowo ocena niezawodności realizowana jest w oparciu o przyspieszone testy starzeniowe prowadzące do powstania uszkodzenia. Jednak tego typu badania, w przypadku właśnie elementów o bardzo dużej niezawodności, są mało skuteczne. Pomimo przyspieszenia procesów starzenia, ich uszkodzenia mogą się zdarzyć bardzo rzadko i to dopiero po bardzo długim czasie testowania. Rozwiązaniem tego problemu może być wnioskowanie o niezawodności elementów na podstawie tylko obserwacji zmian, czyli degradacji, wybranych parametrów podczas takich testów. *Przyspieszone testy degradacyjne* pozwalają więc na szacowanie rozkładu funkcji niezawodności na podstawie obserwacji i symulacji, jeszcze zanim dojdzie do ich uszkodzenia.

Prowadząc przyspieszone testy degradacyjne istotne znaczenie ma zarówno właściwe określenie wpływu warunków przyspieszających procesy degradacyjne jak i dobór modelu matematycznego, opisującego zachowanie się zmian obserwowanych parametrów [7].

W pracy przedstawiono wyniki szacowania rozkładu czasu do uszkodzenia superkondensatorów. Dla takich elementów, czas ten może być szacowany na podstawie obserwacji zmiany dwóch parametrów: pojemności i szeregowej rezystancji zastępczej. Zamieszczone wyniki ograniczają się jedynie do wnioskowania na podstawie zmian szeregowej rezystancji zastępczej. Jako czynnik wpływający na przyspieszenie procesu starzenia, przyjęto wzrost napięcia polaryzującego kondensator. Natomiast do opracowania modelu matematycznego opisującego procesy degradacyjne, wykorzystano stochastyczne równania różniczkowe. Stochastyczny czynnik występujący w tego typu modelach, pozwala na uwzględnienie losowego charakteru wielu zjawisk występujących w rzeczywistych elementach i procesach.

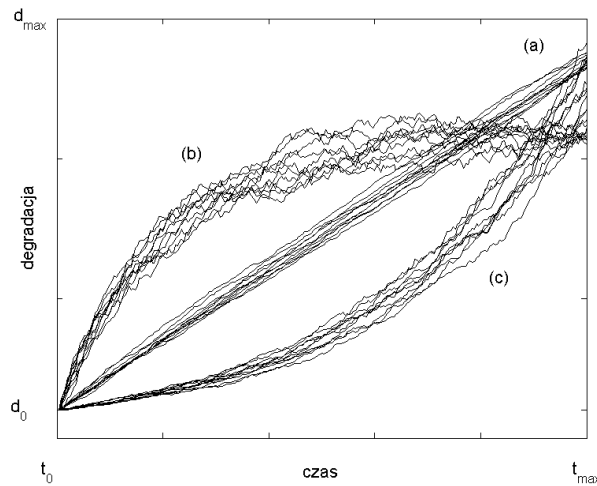
2. PODSTAWY TEORETYCZNE

2.1. Stochastyczne modele procesów degradacji

Ogólną postać procesu stochastycznego można przedstawić jako

$$dy_t = F(t, y_t)dt + G(t, y_t)dW_t, \quad (1)$$

gdzie funkcja $F(t, y_t)$ jest nazywana dryftem, a funkcja $G(t, y_t)$ zmiennością procesu. Ich postać może być funkcją czasu t oraz stanu procesu y_t . Natomiast dW_t jest procesem Wienera określonym dla $t \geq 0$. Przyjmując odpowiednią postać funkcji $F(t, y_t)$ oraz $G(t, y_t)$, zależność (1) może symulować narastające procesy degradacyjne postępujące według różnych trendów. Przykładowe realizacje procesów liniowych, wykładniczych oraz logarytmicznych przedstawiono na rys. 1 [6, 9].



Rys. 1. Przykładowe realizacje postępujących procesów degradacyjnych; (a) – model liniowy, (b) – model logarytmiczny, (c) – model wykładniczy

Przyjmując postać funkcji dryftu oraz zmienności, jako:

$$F(t, y_t) = \alpha y_t \text{ oraz } G(t, y_t) = \beta y_t, \quad (2)$$

i po podstawieniu do równania (1) otrzymuje się proces opisany zależnością:

$$dy_t = \alpha y_t dt + \beta y_t dW_t. \quad (3)$$

Przyjmując warunek początkowy $y(t_0) = y_0$ oraz stosując dla procesu opisanego zależnością (3), formułę całkowania Itô, otrzymuje się rozwiązanie postaci:

$$y_t = y_0 \exp \left[\left(\alpha - \frac{\beta^2}{2} \right) t + \beta W_t \right]. \quad (4)$$

Proces ten ma postać funkcji wykładniczej i jest nazywany geometrycznym ruchem Browna [4, 10, 11]. Wartości parametrów modelu wyznaczone są natomiast na podstawie szeregu różnic, obliczonych jako:

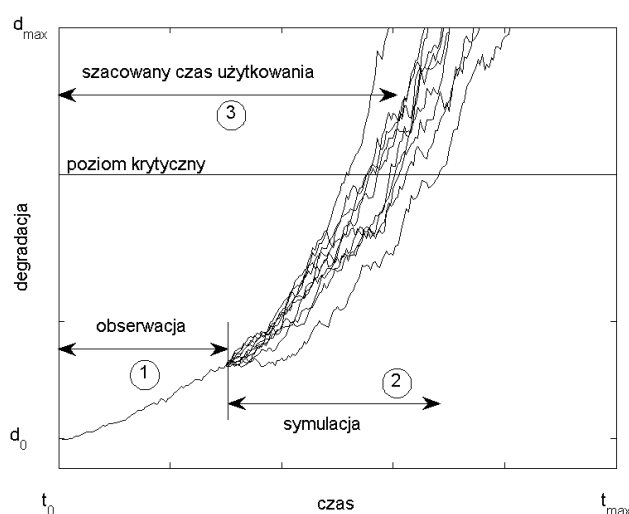
$$y_i = \ln \frac{p_{i+1}}{p_i}, \quad (5)$$

gdzie p_i są zmierzonymi wartościami wielkości opisującej proces degradacji.

2.2. Szacowanie niezawodności z wykorzystaniem modeli stochastycznych

Obserwując postępujące procesy degradacyjne w badanych elementach oraz przyjmując pewien poziom krytyczny h , przekroczenie którego należy traktować jako uszkodzenie się elementu, można wyznaczyć wartości czasów do powstania uszkodzeń t_F [1]. Jednak w przypadku elementów o dużej niezawod-

ności, czasy te są bardzo długie. Znaczne skrócenie czasu szacowania niezawodności uzyskuje się właśnie dzięki zastosowaniu przyspieszonych testów degradacyjnych. Podczas takich testów obserwuje się zmiany wybranych parametrów badanego elementu, w krótkim przedziale czasu, a następnie na ich podstawie szacuje się parametry modelu matematycznego. Dalsze już symulacje pozwalają na wyznaczenie czasu osiągnięcia poziomu krytycznego, definiującego moment pojawienia się uszkodzenia (rys. 2).



Rys. 2. Szacowanie czasu użytkowania na podstawie obserwacji postępujących przyspieszonych procesów degradacyjnych w początkowym okresie eksploatacji

Na podstawie wartości otrzymanych czasów do momentu przekroczenia wartości granicznych, można szacować parametry funkcji gęstości prawdopodobieństwa oraz funkcji niezawodności. Model uzależniony jest od charakteru procesu degradacyjnego opisanego zależnością (1). W przypadku procesów liniowych, funkcja gęstości prawdopodobieństwa oraz niezawodności opisane są odwrotnym rozkładem Gaussa. Przyjmując natomiast proces opisany równaniem (3), rozkład czasów do uszkodzeń będzie miał postać rozkładu normalnego z funkcją gęstości prawdopodobieństwa opisaną jako:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

oraz dystrybuantą:

$$F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x-\mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right], \quad (7)$$

gdzie funkcja $\operatorname{erf}(x)$ jest nazywana funkcją błędu i jest zdefiniowana, jako:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-x}^x e^{-t^2} dt. \quad (8)$$

Parametry rozkładu $f(x; \mu, \sigma)$, nazywane odpowiednio *średnią* i *odchyleniem standardowym*, szacowane są na podstawie zaobserwowanych czasów x_i , tj. czasów osiągnięcia przez proces (3) poziomu krytycznego h . W takim przypadku wartości parametrów modelu są oszacowane jako typowe parametry rozkładu normalnego:

$$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

oraz

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu})^2}. \quad (10)$$

Natomiast funkcja niezawodności jest określona jako:

$$R(x; \mu, \sigma) = 1 - F(x; \mu, \sigma). \quad (11)$$

Możliwość zastosowania transformacji liniowej dla rozkładu normalnego, ma szczególne znaczenie w przyspieszonych testach starzeniowych. W takim przypadku można zastosować proces skalowania:

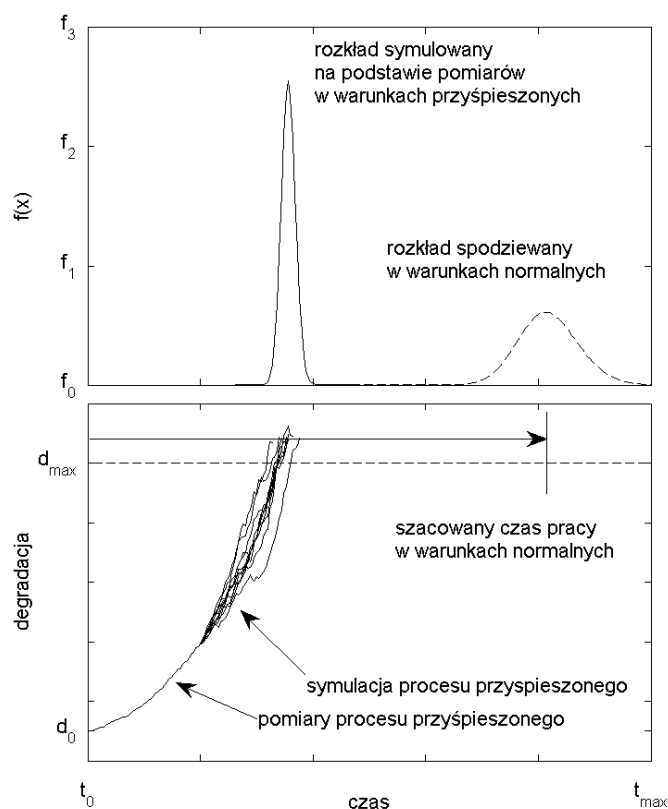
$$X \sim N(\mu, \sigma^2) \Rightarrow kX \sim N(k\mu, |k|\sigma^2), \quad (12)$$

gdzie współczynnik skalowania k będzie odpowiadał współczynnikowi przyspieszenia procesu starzenia, jak to jest przedstawione na rys. 3.

Prowadząc ocenę rozkładu czasu użytkowania elementów na podstawie obserwacji przyspieszonych procesów degradacyjnych należy przyjąć, że analizowane procesy zachodzące w elemencie są nieodwracalne oraz, że przyjęty model odpowiada pojedynczemu mechanizmowi degradacyjnemu. Zakłada się również, że stopień degradacji elementu przed rozpoczęciem procesu badań oraz niepewność pomiaru zmian degradacyjnych są pomijalne. Istotnym warunkiem prowadzenia przyspieszonych testów starzeniowych, jest również założenie, że proces uszkodzeń w warunkach przyspieszających starzenie, jest taki sam, jak w warunkach nominalnych.

2.3. Parametry niezawodnościowe supekondensatorów

Podstawowymi parametrami opisującymi własności niezawodnościowe superkondensatorów jest ich pojemność C i szeregową rezystancja zastępcza ESR . Zmiana wartości tych parametrów w czasie jest wynikiem postępujących procesów degradacyjnych wewnątrz kondensatora. Należą do nich takie procesy jak utlenianie elektrod węglowych, zmniejszanie się powierzchni czynnej elektrod oraz zmniejszanie się liczby jonów na skutek zubożenia elektrolitu. Powoduje to zmniejszanie pojemności i zwiększanie szeregową rezystancji zastępczej.

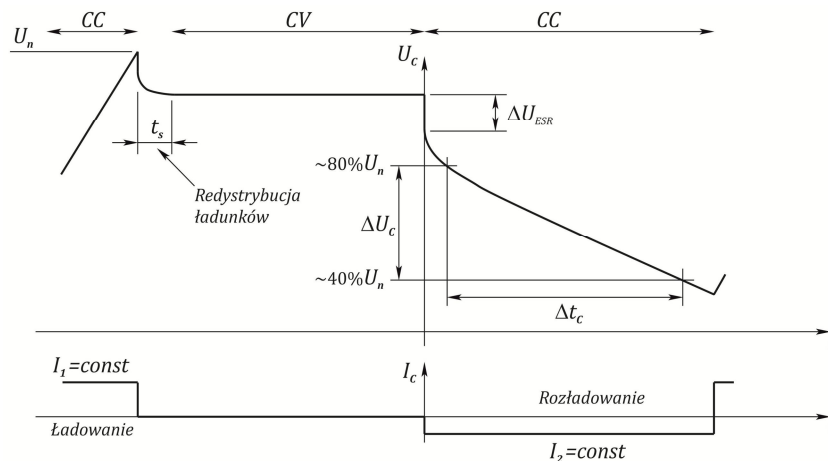


Rys. 3. Wyznaczenie funkcji gęstości prawdopodobieństwa na podstawie obserwacji czasów do powstania uszkodzeń parametrycznych podczas przyspieszonych testów starzeniowych

W przemyśle samochodowym przyjmuje się, że spadek pojemności o 20% względem pojemności nominalnej lub wzrost szeregowej rezystancji zastępczej o 100%, powinien być traktowany jako uszkodzenie parametryczne superkondensatora. W takiej sytuacji kondensator powinien zostać wycofany z eksploatacji.

Parametry superkondensatorów mogą być wyznaczone podczas specjalnych procedur diagnostycznych lub w czasie ich normalnej eksploatacji. Podobnie jak w przypadku klasycznych kondensatorów, wartości parametrów są wyznaczone podczas cyklu ich rozładowywania jak przedstawione jest to na rys. 4. Wartość szeregowej rezystancji zastępczej ESR jest szacowana na podstawie spadku napięcia ΔU_{ESR} spowodowanego przez przepływający prąd rozładowania I_2 , czyli:

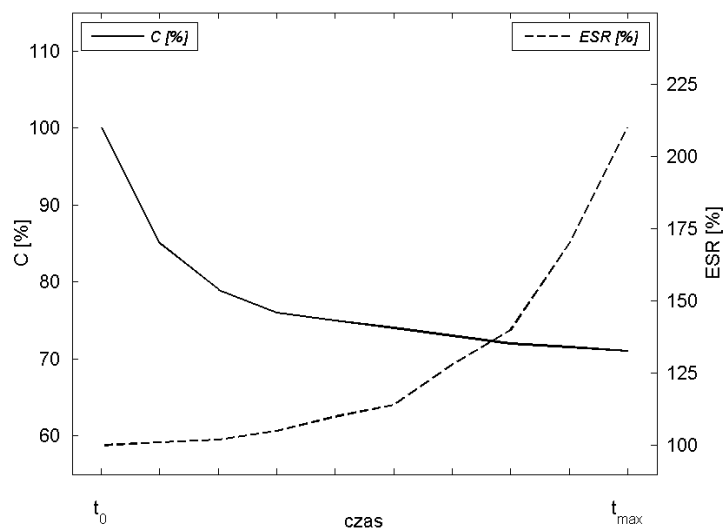
$$ESR = \frac{\Delta U_{ESR}}{I_2}. \quad (13)$$



Rys. 4. Sposób pomiaru parametrów zastępczych superkondensatora wyznaczanych podczas cyklu jego rozładowywania

Natomiast pojemność C jest wyznaczana na podstawie zmiany napięcia ΔU_C spowodowanej zmianą ładunku ΔQ_C w czasie Δt_C , czyli

$$C = \frac{\Delta Q_C}{\Delta U_C} = I_2 \frac{\Delta t_C}{\Delta U_C} \tag{14}$$



Rys. 5. Przykładowe względne zmiany w czasie pojemności C i szeregowej rezystancji zastępczej ESR superkondensatora

2.4. Przyspieszenie procesów starzenia

Istnieje kilka sposobów realizacji przyspieszonych testów starzeniowych superkondensatorów. Czynniki wpływającymi na szybsze postępowanie procesów degradacyjnych może być wzrost temperatury, jak również zwiększone napięcie pracy. Wpływ tych czynników na działanie elementów elektronicznych jest opisywane różnymi modelami. W przypadku temperatury, współczynnik przyspieszający procesy starzenia definiowany jest prawem Arrheniusa lub prawem Eyringa. W przypadku wzrostu napięcia, czas użytkowania definiowany jest na podstawie tzw. odwrotnego prawa mocy [2, 6]. Zgodnie z nim, wartość współczynnika przyspieszającego proces starzenia, określany jest jako

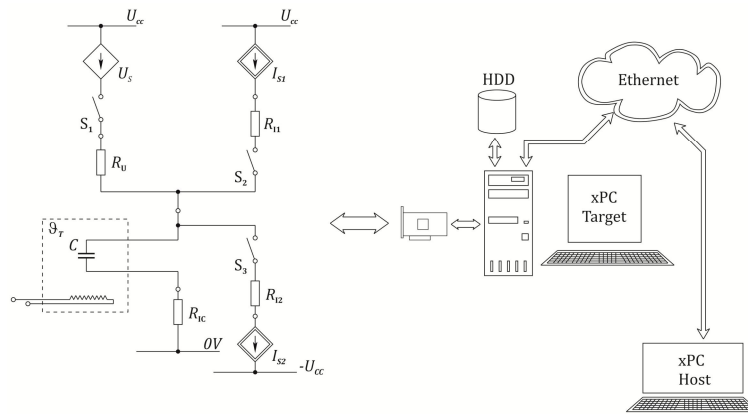
$$AF_U = \frac{T_N}{T} = \left(\frac{U}{U_N} \right)^\delta, \quad (15)$$

gdzie U_N jest nominalną wartością pracy elementu, a U napięciem podwyższonym, przyspieszającym procesy degradacji. Wartość współczynnika δ określa wpływ wzrostu napięcia i szacowana jest w sposób doświadczalny. Tak zdefiniowana wartość współczynnika przyspieszającego procesy degradacyjne AF_U będzie odpowiadać współczynnikowi k z zależności (12), pozwalającego na przeprowadzenie procesu skalowania, określającego niezawodność w normalnych warunkach eksploatacji.

3. UKŁAD POMIAROWY I PROCEDURA BADAŃ

Badanie przyspieszonych testów degradacyjnych przeprowadzono w układzie jak na rys. 6 [3]. Badany superkondensator umieszczony był w komorze temperaturowej zapewniającej stałą temperaturę odniesienia. Proces ładowania i rozładowywania realizowany był ze źródeł prądowych I_{s1} oraz I_{s2} , natomiast w czasie cyklu redystrybucji ładunku, kondensator był podłączony do źródła napięciowego U_S . Całość układu była sterowana i zarządzana z komputera poprzez kartę pomiarową. Algorytm pracy układu został przygotowany w programie Matlab, a zbierane wyniki zapisywane były na dysku komputera docelowego (xPC Target).

Badaniom poddano superkondensator o parametrach nominalnych $U_N = 2,7$ V, $C_N = 10$ F oraz $ESR_{DC} < 0,08$ Ω . Kondensator poddano cyklom ładowania i rozładowywania prądem o wartości $I_1 = I_2 = 1$ S, dla różnych wartości górnego napięcia ładowania, odpowiednio: 2,8 V, 3,2 V oraz 3,7 V. Dla każdego napięcia wykonano kilkaset cykli ładowania i rozładowania. Wyznaczenie wartości parametrów superkondensatora przeprowadzono podczas jego cyklu rozładowania zgodnie z rys. 4, na podstawie zależności (13) i (14).



Rys. 6. Schemat ideowy układu do testowania superkondensatora [3]

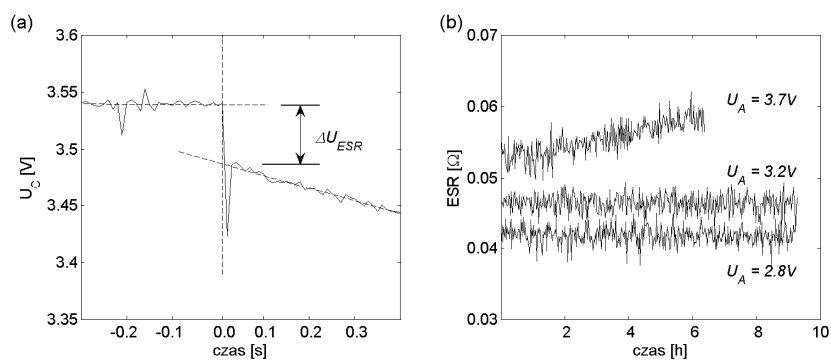
4. ANALIZA WYNIKÓW

Fragment przykładowego cyklu rozładowania kondensatora dla napięcia $U_A = 2,7$ V przedstawiono na rys. 7a. Na podstawie takich cykli wyznaczono wartości pojemności i szeregowej rezystancji zastępczej [5]. Otrzymane wyniki zmian rezystancji przedstawiono na rys. 7b. Na ich podstawie estymowano parametry modeli geometrycznego ruchu Browna. Wyniki zmierzonych wartości parametrów modeli oraz wartości pojemności i rezystancji dla poszczególnych napięć, zestawiono w tabeli 3.1. Dodatkowo oszacowano średni czas do uszkodzenia parametrycznego, tj. do momentu osiągnięcia przez symulowany proces degradacyjny wartości 200% początkowej rezystancji superkondensatora. Na tej podstawie oraz uwzględniając wartość napięcia przyspieszającego procesy starzenia, wyznaczono średnią wartość współczynnika δ .

Tabela 3.1. Estymowane parametry modeli degradacyjnych oraz zmierzone wartości parametrów zastępczych superkondensatora, uzyskane podczas przyspieszonych testów starzeniowych

Lp.	U_A	C_A	ESR_A	α	β	$\overline{t_F}$	δ
	[V]	[F]	[Ω]			[h]	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2.8	8.83	0.0425	6.61e-10	5.36e-3	268800	17.17
2	3.2	8.91	0.0464	4.86e-9	4.91e-3	31344	
3	3.7	8.92	0.0530	5.02e-8	4.20e-3	2275	
$U_N = 2,7$ V , $C_N = 10$ F , $ESR_{DC} \leq 0,08$ Ω							

Przyjmując oszacowane wartości parametrów modelu dla napięcia $U_A = 2,7$ V, $U_A = 3,2$ V oraz $U_A = 2,8$ V wygenerowano przykładowe realizacje procesów degradacyjnych oraz wyznaczono czas osiągnięcia przez nie przyjętej wartości granicznej. Traktując te czasy, jako czas do powstania uszkodzenia, wyznaczono rozkłady funkcji gęstości prawdopodobieństwa oraz niezawodności dla warunków przyspieszonych. Następnie uwzględniając współczynnik przyspieszenia procesu starzenia, wyznaczono rozkłady tych funkcji dla nominalnych warunków pracy, tj. dla $U_N = 2,7$ V. Tak otrzymane przebiegi przedstawiono na rys. 8.

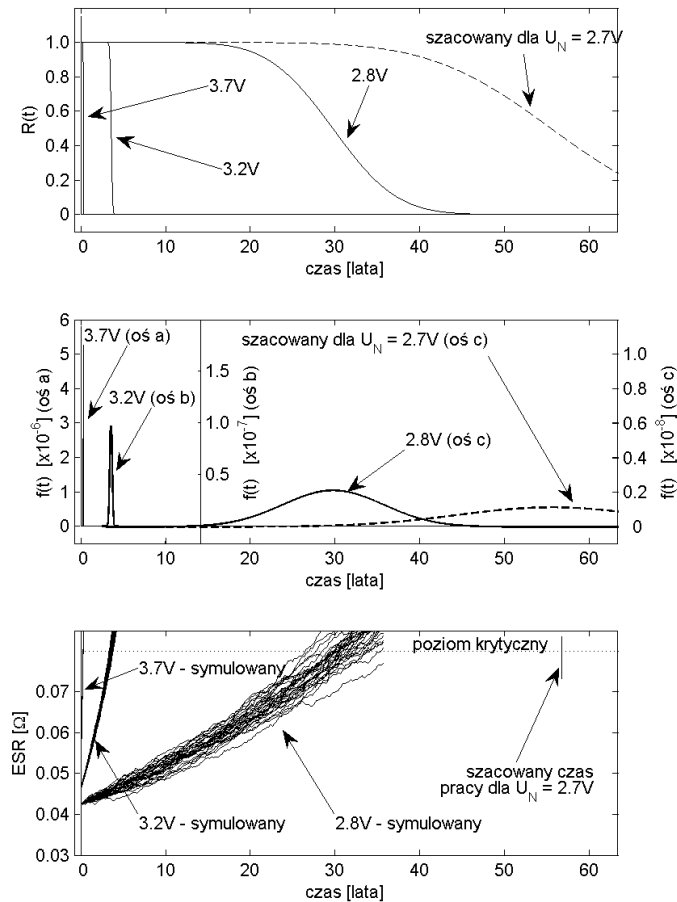


Rys. 7. Przykładowa zmiana napięcia ΔU_{ESR} na rezystorze *ESR* spowodowana włączeniem prądu rozładowującego $I_2 = 1$ A dla napięcia starzenia $U_A = 3,7$ V (a), oraz wyniki pomiarów wartości *ESR* dla wszystkich napięć przyspieszających starzenie (b)

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Czas użytkowania superkondensatorów definiowany jest na podstawie obserwacji dwóch parametrów: pojemności i szeregowej rezystancji zastępczej. Wraz z upływem czasu parametry te ulegają degradacji, tj. zmniejsza się pojemność i rośnie rezystancja. Przedstawione w artykule wyniki oszacowania tego czasu z wykorzystaniem przyspieszonych testów starzeniowych oparto uwzględniając jedynie zmiany rezystancji szeregowej. Czas ten określono mierząc postępujące procesy degradacyjne w ich początkowym okresie, w warunkach przyspieszonych, a następnie szacowano ich kontynuację przy pomocy symulacji. Przeprowadzenie takiej procedury dla kilku napięć pozwoliło wyznaczyć wartość współczynnika przyspieszającego proces starzenia. Dzięki niemu można było oszacować czas pracy w warunkach znamionowych. Jako opis matematyczny przyjęto model nazywany geometrycznym ruchem Browna. Czas uszkodzenia określono, jako czas osiągnięcia wartości rezystancji równej 200% jej wartości początkowej, zaś wielokrotna symulacja pozwoliła na wyznaczenie rozkładu funkcji gęstości i niezawodności. Oszacowany w ten sposób czas pracy

dla warunków nominalnych – wynoszący ponad 50 lat, przekracza gwarantowany przez producenta okres minimum 10 lat. Jednak wynik ten otrzymano dla krótkiego czasu obserwacji i jest on obarczony stosunkowo dużą niepewnością.



Rys. 8. Wyniki szacowania rozkładu funkcji niezawodności na podstawie przyspieszonych testów degradacyjnych z wykorzystaniem modeli stochastycznych

Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość wykorzystania zaproponowanej metody do szacowania rozkładu funkcji niezawodności w normalnych warunkach użytkowania. Wymagają one jednak prowadzenia dużo dłuższych obserwacji w okresie początkowym. Dodatkowo w szacowaniu należy uwzględnić również wyniki dotyczące zmian pojemności. Jako czynnik przyspieszający proces starzenia, równoległe do zwiększenia napięcia, można wprowadzić również zmiany temperatury pracy.

LITERATURA

- [1] Bae J.S., Kuo W., Kvam H.P., Degradation models and implied life time distributions, *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 92, pp. 601–608, 2007.
- [2] Escobar A.L., Meeker Q.W., A Review of Accelerated Test Models, *Statistical Science* 2006, Vol. 21, No. 4, pp. 552–577, 2006.
- [3] Kopka R., Tarczyński W., Measurement system for supercapacitors equivalent parameters determination, *Metrology and Measurement Systems*, Vol. XX, No. 4, pp. 581–590, 2013.
- [4] Kopka R., Estymacja parametrów niezawodnościowych półprzewodnikowych źródeł światła, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 85, Nr 11/2009, ss. 313–316, 2009.
- [5] Kopka R., Tarczyński W., Influence of the Operation Conditions on the Supercapacitors Reliability Parameters, *Pomiary, Automatyka, Robotyka*, R. 19, Nr 3/2015, pp. 49–54, 2015.
- [6] Meeker Q.W., Escobar A.L., *Statistical Methods for Reliability Data*, John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [7] Pham H., *Handbook of reliability engineering*, Springer, London, 2003.
- [8] Pham H., *Recent Advances in Reliability and Quality in Design*, Springer, 2008.
- [9] Sobczyk K., *Stochastic Differential Equations: With Applications to Physics and Engineering*, Kluwer Academic Publishers B.V., Dordrecht, 1991.
- [10] Sun, J.Q., *Stochastic Dynamics and Control*. Elsevier, Amsterdam, 2006.
- [11] Zili M., Filatova, D. V., *Stochastic Differential Equations and Processes*, Springer, 2012.

SUPERCAPACITOR LIFE TIME ESTIMATION BASED ON ACCELERATED DEGRADATION TEST AND STOCHASTIC MODELS

Paper presents the procedure of estimating the reliability distribution of supercapacitors based on accelerated aging tests. Acceleration of the aging process was implemented through the higher operating voltage of the capacitor, and their reliability was determined by measuring changes in capacitance and equivalent series resistance. Distribution of reliability function was determined using stochastic differential models. Model parameters were derived based on the observed changes of the reliability parameters. In order to eliminate the influence of the other accelerating factors the capacitor are placed in a chamber at a constant temperature. The article describes the test setup, measuring procedure and the estimation method.

(Received: 2. 03. 2016, revised: 4. 03. 2016)