

Kazimierz JÓZWIAK¹, Janusz SMULKO²

¹ZPR MIFLEX S.A.

²POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTRONIKI, TELEKOMUNIKACJI I INFORMATYKI

Problemy wytwarzania i testowania kondensatorów z folii metalizowanej

Mgr inż. Kazimierz JÓZWIAK

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Pracownik ZPR MIFLEX S.A. w dziale Laboratorium Badawcze oraz Konstrukcyjno-Technologicznym. Zajmuje się konstrukcją oraz testowaniem jakości kondensatorów wykonanych z folii metalizowanej.



e-mail: kaz14@op.pl

Dr hab. inż. Janusz SMULKO

Adiunkt w Katedrze Optoelektroniki i Systemów Elektronicznych na Wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej. Jest autorem lub współautorem ponad 100 publikacji. Zajmuje się niedestrukcyjnymi metodami oceny jakości elementów elektronicznych oraz problemami pomiarów i analizy zjawisk fluktuacyjnych.



e-mail: jsmulko@eti.pg.gda.pl

Streszczenie

Kondensatory są powszechnie stosowanymi elementami biernymi w układach i urządzeniach elektronicznych, elektrotechnicznych oraz energetycznych. Stąd, istotnym jest, aby koszty produkcji były możliwie jak najniższe równocześnie przy zachowaniu ich wysokiej niezawodności. W pracy przedstawiono problemy napotymane podczas wytwarzania oraz testowania kondensatorów produkowanych na bazie folii polipropylenowych metalizowanych. Szczegółowo opisano zjawiska zachodzące w produkowanych kondensatorach, aby wskazać na potencjalne przyczyny powstawania ich wad, prowadzących do ewentualnych uszkodzeń.

Słowa kluczowe: jakość, kondensatory, wyładowania niezupełne.

Problems of foil-based capacitor fabrication and testing

Abstract

Capacitors are ubiquitous passive elements in electronics, electrotechnics and energetics. Therefore, it is important to reduce their fabrication costs while maintaining their high quality. This paper presents problems experienced during production of the foil-based capacitors. The detailed description of various phenomena in the capacitor structures are presented to point at reasons of their possible damage. The equivalent circuits of the capacitor are presented and their elements are applied to determine the capacitor quality. The main reasons of the capacitor failure result from poor quality contacts between the wound foils and the metalized layer, too low dielectric resistance isolation or voids within the capacitor structure. It has to be underlined that monitoring changes of capacitance and dielectric loss after long-term excessive charging and discharging at elevated temperature do not exclude all the samples that would collapse. Therefore, it is suggested to monitor partial discharges phenomena that would give more information about voids within the wound foils. The authors suppose that these voids can plausibly lead to the capacitor damage.

Keywords: quality, capacitors, partial discharges.

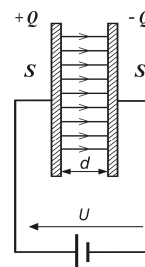
1. Wstęp

Kondensator jest jednym z podstawowych elementów biernych stosowanych w elektronice, elektrotechnice i energetyce. Najprostszy kondensator to układ dwóch przewodników oddzielonych od siebie dielektrykiem, który charakteryzuje się zdolnością gromadzenia ładunków elektrycznych (rys. 1). Podstawowym parametrem charakteryzującym kondensator jest pojemność C , odpowiadająca ładunkowi Q , jaki będzie przechowywany w kondensatorze przy jednostkowej różnicy potencjałów U między jego okładzinami. Pojemność kondensatora zależy od jego wymiarów geometrycznych oraz właściwości zastosowanego dielektryka [1]:

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d} \quad [\text{F}], \quad (1)$$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^9} \approx 8,85 \cdot 10^{-12} \quad [\text{F/m}], \quad (2)$$

gdzie: S – powierzchnia okładziny [m^2], d – grubość dielektryka [m], ϵ_0 – przenikalność dielektryczna próżni [F/m], ϵ – stała dielektryczna materiału.



Rys. 1. Budowa kondensatora
Fig. 1. Capacitor construction

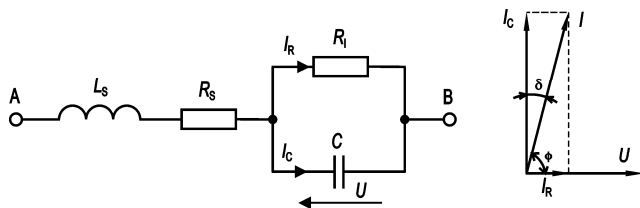
W produkowanych kondensatorach występują poza pojemnością C dodatkowe elementy pasożytnicze, które muszą być uwzględnione przy ocenie ich jakości. Stąd, w praktyce należy stosować bardziej złożony, niż jednoelementowy schemat zastępczy kondensatora. Dodatkowo, w produkcji należy zastosować określone normy przemysłową procedury, które pozwolą ocenić, czy wytworzone kondensatory będą wystarczająco niezawodne podczas długotrwałej eksploatacji. Istniejące w tym zakresie normy, mimo że zostały opracowane niedawno, nie zawsze pozwalają wykryć wszystkie egzemplarze, które ulegają zniszczeniu już po krótkim okresie pracy [2, 3]. Obecnie, ze względu na konkurencję, szczególnie z państw rozwijających się, istnieje konieczność stosowania coraz tańszych materiałów, co wymaga poszukiwania bardziej precyzyjnych metod oceny jakości kondensatorów niż przewidywane według dotychczas obowiązujących norm.

2. Schemat zastępczy kondensatora

Jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących kondensator poza jego pojemnością C jest upływność, powodująca, że ładunek zgromadzony w kondensatorze zmniejsza się w czasie, w wyniku przepływu niewielkiego prądu przez dielektryk o skończonej rezystancji izolacji R_i . W idealnym kondensatorze nie występują straty energii, a prąd wyprzedza napięcie o kąt $\varphi = 90^\circ$. W rzeczywistej konstrukcji wartość tego kąta jest nieco mniejsza niż 90° . Kąt dopełniający do 90° jest oznaczany powszechnie literą δ , a wartość $\text{tg} \delta$ jest jedną z miar jakości kondensatora (rys. 2). Ta wartość jest proporcjonalna do strat mocy czynnej, jakie występują w rzeczywistym kondensatorze.

Drugim istotnym elementem pasożytniczym, jaki należy wyróżnić w kondensatorze jest rezystancja szeregową R_S , wynikająca ze skończonej rezystancji wyprowadzeń jego kontaktów, rezystancji między czołami folii, na które napyłono metal, a wyprowadzeniami kontaktów. Ponieważ cały prąd płynący przez kondensator przepływa przez tą rezystancję (rys. 2), to jej istnienie jest powodem wydzielania się ciepła w tym obszarze i powstawania ewentualnych uszkodzeń w wyniku nadmiernego i często nierównomiernego nagrzewania się objętości kondensatora.

Innym, dodatkowym elementem pasożytniczym, wyróżnianym w kondensatorze jest indukcyjność L_S powodowana wyprowadzeniami jego kontaktów oraz sposobem zwinienia folii. Obecnie, podczas produkcji, czoła folii metalizuje się tak, że wpływ jej indukcyjności może być pominięty. Wpływ indukcyjności wyprowadzeń kontaktów, jako mało istotny dla zakresu częstotliwości akustycznych, dla których dokonuje się typowo pomiarów jakościowych kondensatorów foliowych, jest zwykle pomijany.



Rys. 2. Schemat zastępczy kondensatora o pojemności C , rezystancji upływności R_l , rezystancji szeregowej R_S i indukcyjności pasożytniczej L_S z wykresem wskazowym zależności fazowych między napięciem na kondensatorze U oraz jego prądem I_C ; I_R – prąd płynący przez rezystancję R_l

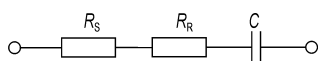
Fig. 2. Equivalent circuit of the capacitor C having leakage resistance R_l , serial resistance R_S and passive inductance L_S with a diagram of phase dependency between the capacitor voltage U and its current I_C ; I_R – current flowing through R_l

Rezystancje R_S i R_l są bardzo istotne przy ocenie jakości kondensatorów, ponieważ określają straty powstające w ich elementach metalowych oraz w zastosowanym dielektryku. Wartości tych parametrów zależą od wielu czynników, jak temperatura oraz napięcie, przy którym pracuje kondensator. Ponadto, ulegają zmianom w trakcie starzenia się kondensatora, głównie ze względu na degradację właściwości dielektryka pod wpływem wydzielania ciepła w jego objętości. Wartości tych rezystancji są powiązane z wartością $\text{tg}\delta$.

Pomiar współczynnika strat $\text{tg}\delta$ wykonuje się zazwyczaj mostkami C i $\text{tg}\delta$ lub RLC, posiadającymi dodatkowo możliwością pomiaru $\text{tg}\delta$. Kondensator jest podłączany do mostka pomiarowego zewnętrznymi zaciskami w punktach A i B (rys. 2). Stąd, nie ma możliwości pomiaru każdego z parametrów oddzielnie, ponieważ nie ma dostępu do wszystkich punktów potencjału występujących na schemacie zastępczym kondensatora. Zamieniając opisany schemat zastępczy kondensatora na równoważny schemat według połączenia szeregowego (rys. 3) można wyznaczyć na podstawie pomiarów mostkiem istotne parametry kondensatora – współczynnik strat $\text{tg}\delta$ oraz szeregowe połączenie rezystancji $R = R_S + R_R$ powstałej w wyniku przejścia na schemat szeregowy:

$$\begin{aligned} \text{tg}\delta &= 2\pi f \cdot C \cdot R = 2\pi f \cdot C \cdot (R_S + R_R) = \\ &= 2\pi f \cdot C \cdot \left(R_S + \frac{R_l}{1 + R_l^2 \cdot 4\pi^2 f^2 \cdot C^2} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$R = R_S + R_R = R_S + \frac{R_l}{1 + R_l^2 \cdot 4\pi^2 f^2 \cdot C^2} \quad (4)$$



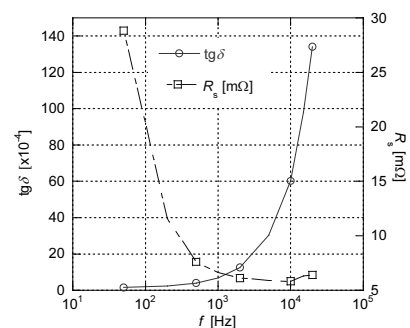
Rys. 3. Szeregowy schemat zastępczy kondensatora
Fig. 3. Capacitor series equivalent circuit

Podane zależności (3) i (4) przewidują, że rezystancja R w kondensatorze maleje ze wzrostem częstotliwości, natomiast $\text{tg}\delta$ rośnie, co potwierdzają wyniki pomiarów (rys. 4). Wartości rezystancji R_S można wyznaczyć dla danego kondensatora przeprowadzając pomiary R w funkcji częstotliwości. Wartość graniczna R , obserwowana dla względnie dużych częstotliwości jest równa w przybliżeniu wartości R_S kondensatora.

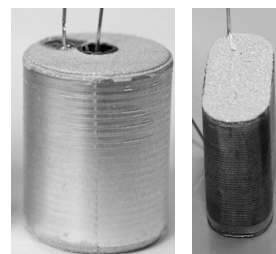
3. Sposób wytwarzania kondensatorów

Kondensatory z folii polipropylenowej metalizowanej są wykonywane jako układ dwóch metalizowanych folii nawiniętych na izolacyjnym trzpieniu lub układ dwóch metalizowanych folii nawiniętych na iglicy o określonej średnicy a następnie spłaszczonych (rys. 5). Folia jest nawijana w taki sposób, aby jej krawędzie były skierowane metalizowaną warstwą na zewnątrz tworząc tzw. czoło zwijki. Obszary czoł są poddawane procesowi potocznie nazywanym „szoperowaniem” i oznaczającym ciśnieniowe napylenie roztopionego cynku lub cyny. Roztopione cząstki metalu trafiają na czoło zwijki tworząc warstwę metalizacji, która pozwala na dołączenie zewnętrznych metalowych kontaktów. Warstwa metalu na folii jest zbyt cienka, aby pozwoliła na wytworzenie odpowiedniego kontaktu. Dodatkowo, taki sposób połączenia folii z kontaktami ogranicza indukcyjność pasożytniczą kondensatora.

Jakość galwanicznego połączenia metalizacji folii za pomocą warstwy napyłonego metalu decyduje często o właściwościach i jakości kondensatora. Przez to połączenie przepływa całkowity prąd płynący przez kondensator. Stąd, opór tego połączenia, określany przez wartość R_S , decyduje o znaczącej części ciepła wydzielanego w kondensatorze. Jeżeli w danej populacji kondensatorów występują takie, w których ten parametr odbiega od pozostałych, to świadczy to o złym połączeniu warstwy napyłonego metalu i metalizacji folii. Wówczas to miejsce jest najbardziej narażone na uszkodzenie podczas przepływu prądu, a zwłaszcza przy obciążeniu kondensatora przebiegami odkształconymi, o dużej zawartości wyższych harmonicznych sygnału sieci, lub impulsami prądowymi.



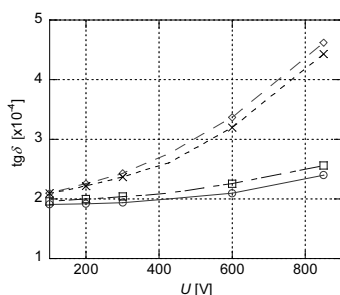
Rys. 4. Charakterystyki $\text{tg}\delta$ i R_S w funkcji częstotliwości f pomierzone dla kondensatora typu MKSP-118 (7,5µF/425V) przy napięciu skutecznym polaryzacji 1V; pomiary wykonano mostkiem RLC GenRad 1689M
Fig. 4. Characteristics of $\text{tg}\delta$ and R_S vs. frequency f observed in a capacitor of type MKSP-118 (7,5µF/425V) at polarization of 1V rms voltage; measurements were taken with the RLC bridge GenRad 1689M



Rys. 5. Widok zwijek kondensatorów – walcowa (lewa) i spłaszczona (prawa)
Fig. 5. Wound foils of capacitors – cylindrical (left) and flat (right)

Drugim podstawowym czynnikiem, który wpływa na jakość kondensatora jest dielektryk. W opisywanych typach kondensatorów dielektrykiem jest cienka folia polipropylenowa lub poliestrowa o grubości $5\div 10\mu\text{m}$, na którą naniesiono warstwę metalizacji. Jako miarę jakości dielektryka zastosowanego w kondensatorze stosuje się współczynnik strat $\text{tg}\delta$. Przebieg wartości $\text{tg}\delta$ w funkcji napięcia polaryzacji pozwala uwidocznic ewentualne wady dielektryka. W przypadku dielektryków o niskiej jakości obserwuje się szybszy wzrost wartości $\text{tg}\delta$ w funkcji napięcia niż dla materiałów o wyższej izolacyjności (rys. 6).

W trakcie wytwarzania (procesy nawijania oraz szpewowania) dielektryk ulega często lokalnym uszkodzeniom. Ponadto, posiada mikroskopijne nieciągłości w budowie, w postaci wtrącin gazowych lub materiałów stałych. W tych obszarach, po przyłożeniu napięcia do zacisków kondensatora, ze względu na lokalnie duży gradient pola elektrycznego, zachodzą zjawiska wyładowań niezupełnych powodujące jego lokalne przegrzewanie się. Stąd, z czasem właściwości izolacyjne dielektryka ulegają w tych obszarach pogorszeniu, aż do ich całkowitej utraty i nawet zniszczenia kondensatora. Podany mechanizm występuje także w dielektrykach stosowanych w innych urządzeniach elektrycznych [4, 5].



Rys. 6. Mierzone wartości $\text{tg}\delta$ w funkcji wartości skutecznej zmiennego napięcia polaryzacji U o częstotliwości 50 Hz dla kondensatorów typu MKSP-I18 ($7,5\mu\text{F}/425\text{V}$); pomiary wykonano mostkiem Tettex 2805

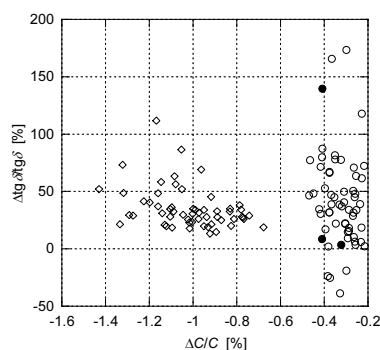
Fig. 6. Measured $\text{tg}\delta$ vs. rms harmonic polarization voltage U at frequency 50 Hz for the capacitors MKSP-I18 ($7,5\mu\text{F}/425\text{V}$); the bridge Tettex 2805 was used

Najistotniejszą dla użytkownika cechą kondensatora jest jego trwałość, czyli minimalny czas poprawnej pracy gwarantowany przez producenta i podawany w kartach katalogowych wraz z parametrami pracy. Zarówno producent jak i odbiorca są zainteresowani tym, aby ten czas była jak najdłuższy, a po jego upływie kondensator nadal spełniał wymogi bezpieczeństwa. Niestety, tylko pomiary $\text{tg}\delta$ lub R_S nie pozwalają przewidzieć, który z badanych kondensatorów ulegnie uszkodzeniu. Wymienione parametry nie dają informacji o występowaniu zjawisk wyładowań niezupełnych, jakie mogą powodować uszkodzenie kondensatora i utratę jego cech funkcjonalnych (np. pojemności w wyniku lokalnego przebicia).

Długoterminowe badania kondensatorów na ramie trwałości, gdy kondensatory są poddawane między innymi wielokrotnemu ładowaniu i rozładowaniu przy napięciu wyższym od napięcia znamionowego U_n ich normalnej pracy wskazują, że zmiany ich pojemności oraz wartości $\text{tg}\delta$ lub R_S nie pozwalają przewidzieć, które egzemplarze ulegną zniszczeniu. Przykładowe wyniki zmian pojemności C i współczynnika strat $\text{tg}\delta$ dla próby 60 sztuk kondensatorów o pojemności $7,5\mu\text{F}$ (typ MKSP-I18) podczas testowania na ramie trwałości przedstawiono na rys. 7. Kondensatory testowano przez poddawanie ich ciągłemu procesowi ładowania i rozładowywania przy podwyższonym napięciu $1,35U_n$ oraz w temperaturze 85°C .

Podobne wnioski, niepozwalające na wykrycie, które egzemplarze ulegną uszkodzeniu, uzyskano dla badanej próby przy monitorowaniu wartości rezystancji R_S lub ich zmian podczas kolejnych etapów testu na ramie trwałości. Stąd, autorzy pracy sugerują, że w wielu przypadkach przyczyną uszkodzenia kondensatorów podczas ich eksploatacji są zjawiska wynikające z lokalnej niejednorodności folii propylenowej (dielektryka) lub jej metalizacji. Można przypuszczać, że część tych ukrytych wad przejawia się występowaniem wyładowań niezupełnych, których badanie może dostarczyć dodatkowej informacji, pozwalającej bardziej precy-

zyjnie oceniać jakość kondensatorów. Podany wniosek jest tym bardziej aktualny, że ze względu na trend do wprowadzania coraz cieńszych folii, wzrasta znaczenie jej lokalnych nieciągłości.



Rys. 7. Względne zmiany wartości $\text{tg}\delta$ oraz pojemności C kondensatorów typu MKSP-I18 ($7,5\mu\text{F}/425\text{V}$) rejestrowane podczas przechodzenia testów na ramie trwałości, po upływie 2000h (okręgi) oraz 6000h (romby) – trzy egzemplarze uległy uszkodzeniu po upływie ponad 2000h (czarne okręgi); pomiary wykonano mostkiem Tettex 2805 przy częstotliwości 1 kHz i polaryzacji napięciem 1 V

Fig. 7. Relative changes of $\text{tg}\delta$ and capacitance C for the MKSP-I18 ($7,5\mu\text{F}/425\text{V}$) capacitors registered during their durability tests lasting 2000h (circle) and 6000h (rhombus) – three samples were damaged when the interval of 2000h was exceeded (black circle); the bridge Tettex 2805 was used at frequency 1 kHz and voltage polarization 1 V

4. Wnioski

Jakość kondensatorów foliowych zależy od kilku elementów jego konstrukcji – jakości dielektryka oraz poprawności wytworzenia (sposobu zwinienia folii i dołączenia wyprowadzeń). Pomiary takich parametrów kondensatorów jak współczynnik strat $\text{tg}\delta$ lub rezystancji R_S posiadają duże znaczenie przy ocenie jakości kondensatora. Jakość dielektryka decyduje o odporności na procesy starzenia w kondensatorze powodowane podwyższonym napięciem pracy. Natomiast rezystancja R_S decyduje o odporności kondensatora na działanie impulsów prądowych lub prądów wyższych harmonicznych. Niestety, oba parametry nie przesądzają, czy dany egzemplarz ulegnie uszkodzeniu podczas eksploatacji. Stąd, wydaje się zasadnym poszukiwanie dodatkowych metod oceny jakości kondensatorów. Autorzy sugerują wykorzystanie zjawiska emisji akustycznej, występującej podczas wyładowań niezupełnych, jako dodatkowego narzędzia do bardziej szczegółowej oceny jakości kondensatorów.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009/10 jako projekt badawczy nr N N510 350836.

5. Literatura

- [1] J. Kossakowski: Elementy dyskretne RC Poradnik. MON, Warszawa 1979.
- [2] Norma przemysłowa PN-EN 60252-1. Kondensatory silnikowe prądu przemiennego. Część 1: Wymagania ogólne. Właściwości, badania i wartości znamionowe. Wymagania dotyczące bezpieczeństwa. Wytyczne dotyczące instalowania i użytkowania.
- [3] Norma przemysłowa PN-EN 60384-14 Kondensatory stałe stosowane w urządzeniach elektronicznych. Część 14: Specyfikacja grupowa. Kondensatory stałe do tłumienia zakłóceń elektromagnetycznych podłączone do przewodów zasilających.
- [4] Q. Yanning, W. Guangning, Z. Xueqin, L. Xiaohua, S. Wen: Detecting Instrument for DC Partial Discharge within Storage Capacitor. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation s. 326-331.
- [5] J. Skubis: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Polska Akademia Nauk, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa 1993.
- [6] F. H. Kreuger, E. Gulski, A. Krivda: Classification of Partial Discharges. IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 28 No. 6, December 1993, s. 917-931.