

## METODY OCENY JAKOŚCI KONDENSATORÓW FOLIOWYCH

Kazimierz JÓZWIAK<sup>1</sup>

1. ZPR MIFLEX SA, ul. Grunwaldzka 3,  
99-300 Kutno, tel: 508 668 887,  
fax: 48 24 3551188 e-mail:kaz14@op.pl

**Streszczenie:** Kondensatory foliowe są jednym z podstawowych typów kondensatorów. Technologia i konstrukcja tych kondensatorów jest uzależniona od ich zastosowania. Trwałość kondensatorów foliowych jest determinowana przez zjawiska zachodzące w dielektryku oraz w kontaktach metalizacji folii z metalicznymi czołami. Poprawa jakości lub ograniczenie kosztów produkcji można uzyskać przez zastosowanie nowych materiałów lub zmiany w technologii produkcji. Efektywność tych działań wymaga oceny jakości kondensatorów. Obecne metody pomiarowe zawarte w stosowanych normach nie są wystarczająco skuteczne do takiej oceny, a czas ich trwania jest bardzo długi. Stąd, zaproponowano dodatkowe metody oceny jakości kondensatorów foliowych stanowiących uzupełnienie już istniejących metod, co pozwala szybko reagować na złą jakość materiałów i błędy w procesach technologicznych.

**Słowa kluczowe:** kondensatory, jakość, emisja akustyczna

## 1. WSTĘP

Kondensatory foliowe są powszechnie stosowanymi elementami w układach elektrycznych i elektronicznych. Bardzo często stosuje się je w układach zasilania oraz do silników jako kondensatory rozruchowe i pracy w sprzęcie AGD. Uszkodzenie kondensatora może powodować zakłócenia w funkcjonowaniu urządzenia, co narzuca potrzebę jego długotrwałej i niezawodnej pracy.

Poprawa jakości kondensatorów foliowych lub ograniczenie kosztów ich produkcji może być uzyskane przez zastosowanie nowych materiałów lub zmiany w technologii produkcji. Wymaga to oceny jakości produkowanych kondensatorów.

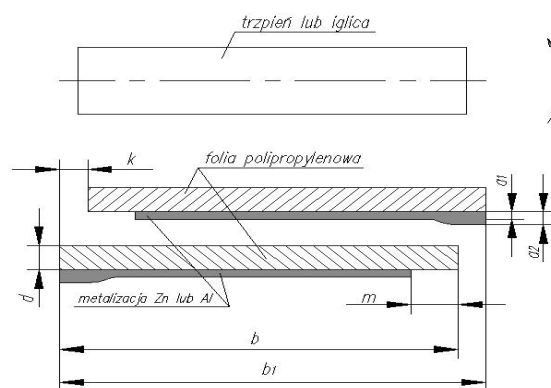
Dotychczasowe metody badawcze zawarte w odpowiednich normach wymagają długiego czasu badań. Są energochłonne, a w związku z tym kosztowne, co przy konieczności częstych zmian materiałów ogranicza możliwości ich stosowania.

Dlatego zaproponowano nowe metody oceny jakości kondensatorów foliowych na podstawie badań dwóch grup kondensatorów: przeciwzakłóceńowych i silnikowych.

## 2. BUDOWA KONDENSATORÓW FOLIOWYCH

Kondensatory foliowe wykonywane są z folii dielektrycznej (najczęściej polipropylenowej lub poliestrowej) o grubości 4÷20 μm z napyłoną warstwą

metalną o grubości ułamka μm (Zn lub Al) stanowiącą okładzinę kondensatora. Zwoje metalizowanej folii tworzą układ przewodników i izolatorów (rys. 1).



Rys. 1. Sposób nawijania folii;  $k$  – przesunięcie między foliami w zwińce,  $d$  – grubość dielektryka,  $b$  – szerokość folii metalizowanej,  $b_1$  – szerokość zwińki kondensatorowej po nawinięciu

Po nawinięciu uzyskuje się zwińkę w kształcie walca, którego podstawy to krawędzie folii od strony metalizacji. Dla niektórych typów kondensatorów zwińki poddaje się procesowi spłaszczania przez wywieranie nacisku w odpowiedniej temperaturze celem uzyskania owalnego kształtu.

Na czoła nawiniętych zwińek przy określonej temperaturze i ciśnieniu napyłany jest metal celem wytworzenia elektrod, do których będą dołączone wyprowadzenia kondensatorów. Jakość połączenia między krawędziami zwojów metalizowanej folii a metalicznym czołem decyduje o wytrzymałości i odporności kondensatora na przewodnictwo prądu, w szczególności na narażenia impulsowe.

Po procesie metalizacji czoł, zwińki poddaje się obróbce termicznej w celu uzyskania odpowiednich właściwości dielektrycznych, co powoduje poprawę parametrów zwińki, głównie przez usunięcie pustek powietrznych zawartych w zwojach zwińki.

Cienka folia dielektryczna, która nie była jeszcze polaryzowana elektrycznie, może okazać się lokalnie zwarta, stąd istnieje potrzeba regeneracji elektrycznej zwińki, przeprowadzanej przez jej polaryzację impulsami

napięciowymi, prowadzącymi do przebić w miejscach o słabej wytrzymałości izolacji i ich odizolowywaniu od czynnej okładziny folii. Proces ten przeprowadza się na zwijce przed umieszczeniem jej w obudowie, aby wydzielane gazy mogły być usunięte poza objętość zwijki.

W celu wykonania wyprowadzeń kondensatora o odpowiedniej wytrzymałości prądowej i mechanicznej, do napyłonych metalicznych czoł zwijek są dołączane przez zgrzewanie lub lutowanie wyprowadzenia o określonej średnicy. Wykonane zwijki są umieszczane w obudowie i w zależności od potrzeb hermetyzowane odpowiednimi materiałami izolacyjnymi (tzw. syciwami).

Podstawowymi parametrami kondensatora są jego pojemność  $C$ , współczynnik strat dielektrycznych  $tg\delta$  oraz rezystancja izolacji  $R_{izol}$ . Kondensator foliowy jest odmianą kondensatora płaskiego, w związku z tym jego pojemność można wyznaczyć z wzoru:

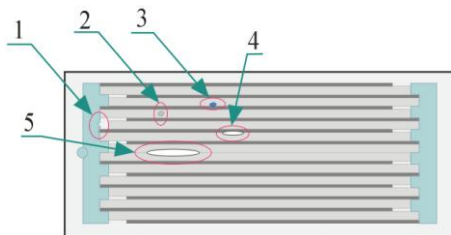
$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot 2 \cdot S}{d} \quad (1)$$

gdzie:  $S$  – powierzchnia czynna okładziny (iloczyn czynnej długości folii i czynnej szerokości metalizacji),  $\epsilon_0$  – przenikalność dielektryczna próżni,  $\epsilon$  – przenikalność dielektryczna folii dielektrycznej,  $d$  – grubość folii dielektrycznej

Współczynnik strat dielektrycznych  $tg\delta$  oraz rezystancja izolacji  $R_{izol}$  są parametrami powodującymi występowanie strat mocy czynnej w kondensatorach.

### 3. TYPOWE WADY I USZKODZENIA KONDENSATORÓW FOLIOWYCH

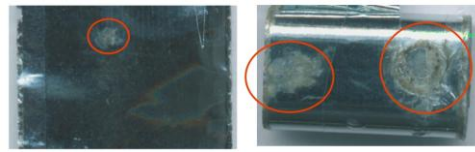
Dielektryk kondensatora nie jest strukturą idealną. Posiada niedoskonałości, takie jak wtrąciny stałe lub gazowe. Ponadto, między zwojami folii mogą znajdować się pustki powietrzne oraz zmarszczenia lub załamania folii, jako pozostałość procesu nawijania (rys. 2). Kontakt metalicznego czoła z metalizacją folii może również wykazywać wady połączenia powstałe podczas procesu napyłania czoł lub wynikające z wad materiału.



Rys. 2. Typowe wady w kondensatorze foliowym: 1 – wada kontaktu metalizacji z czołem, 2 – cząstka stała wewnątrz dielektryka, 3 – cząstka stała między zwojami folii, 4 – wtrącina gazowa między zwojami folii

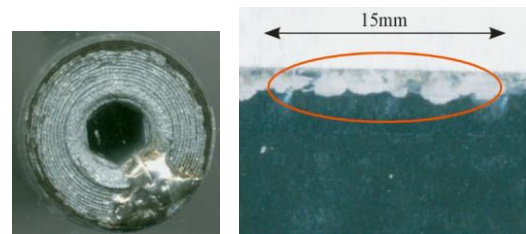
Podczas pracy kondensator ulega starzeniu wskutek oddziaływania pola elektrycznego oraz przepływu prądu. Degradacja dielektryka jest powodowana głównie wyładowaniami niepełnymi, których następstwem są samoregeneracje. Proces ten polega na odizolowaniu się fragmentów folii kondensatora wskutek lokalnych przebić dielektryka przez wyparowanie metalu wokół miejsca

przebiecia podczas jego pracy. Jeżeli samoregeneracje są zbyt liczne lub zbyt gwałtowne, to może dojść do znacznego osłabienia struktury dielektryka, co prowadzi do obniżenia jego rezystancji izolacji i ewentualnego uszkodzenia (rys. 3).



Rys. 3. Pojedyncza samoregeneracja oraz skutki gwałtownych i licznych samoregeneracji zwijki, uszkodzenie struktury dielektryka

Uszkodzenie kontaktu między metalizacją folii a metalicznymi czołami kondensatora następuje podczas przepływu impulsów prądowych (rys. 4). Jeżeli wskutek lokalnego uszkodzenia wystąpi brak połączenia kilkunastu zwojów folii z warstwą metalizacji kontaktów, to udział tej odłączonej powierzchni folii w całkowitej pojemności kondensatora jest znacząco ograniczony, ze względu na duży wzrost rezystancji szeregowej.



Rys. 4. Widok wadliwego czoła kondensatora oraz fragment folii tego kondensatora po rozwinięciu z widocznym ubytkiem metalizacji przy krawędzi

### 4. POMIARY PARAMETRÓW KONDENSATORÓW FOLIOWYCH

#### 4.1. Pomiary wyładowań niepełnych

Dielektryk w kondensatorach foliowych poddawany jest narażeniom napięciowym podczas eksploatacji. Polaryzacji kondensatora towarzyszy szereg zjawisk. Jedną z najistotniejszych grup są wyładowania niepełne, rozwijające się lokalnie w objętości dielektryka, w wyniku występowania obszarów o podwyższonym natężeniu pola elektrycznego [1,2].

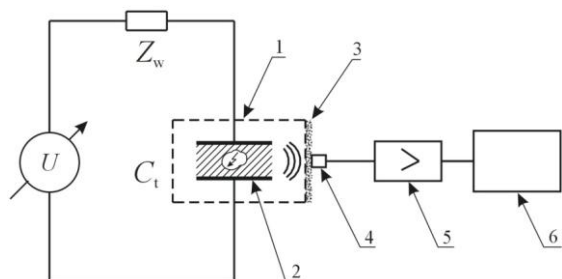
Wyładowania niepełne występujące w kondensatorach można charakteryzować mierząc różne wielkości:

- impulsy prądowe w układzie z kondensatorem sprzęgającym,
- sygnały emisji akustycznej,
- zmiany strat dielektrycznych w funkcji napięcia pomiarowego,
- zmiany rezystancji izolacji w funkcji napięcia pomiarowego.

Charakteryzowanie wyładowań niepełnych za pomocą pomiarów sygnałów emisji akustycznej jest możliwe ze względu na powstawanie ultradźwięków podczas wyładowań niepełnych [3]. Ultradźwięki można mierzyć w systemie zawierającym przetwornik piezoelektryczny, wzmacniacz napięciowy oraz oscyloskop cyfrowy lub kartę akwizycji danych (rys. 5).

Do zalet pomiarów wyładowań niezupełnych za pomocą sygnałów emisji akustycznej, w porównaniu z metodami elektrycznymi należy zaliczyć:

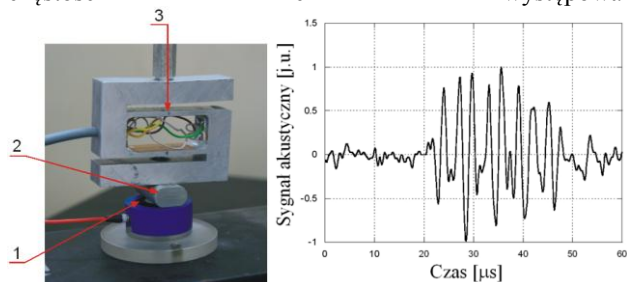
- możliwość lokalizacji obszaru wyładowania przez zastosowanie dwóch lub więcej czujników,
- mniejszy wpływ zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych na odczyty z czujnika,
- możliwość pomiarów wyładowań niezupełnych w kondensatorach o dużych pojemnościach, gdy pomiary elektryczne są trudniejsze do przeprowadzenia.



Rys. 5. Układ do pomiarów wyładowań niezupełnych za pomocą sygnałów emisji akustycznej;  $U$  – regulowane źródło napięcia przemiennego,  $Z_w$  – impedancja wewnętrzna źródła napięcia,  $C_t$  – kondensator badany, 1 – obudowa kondensatora, 2 – zwijka folii w kondensatorze z wtrąciną gazową, 3 – żel ograniczający opory akustyczne dla sygnału docierającego do czujnika, 4 – czujnik piezoelektryczny, 5 – wzmacniacz, 6 – układ akwizycji danych

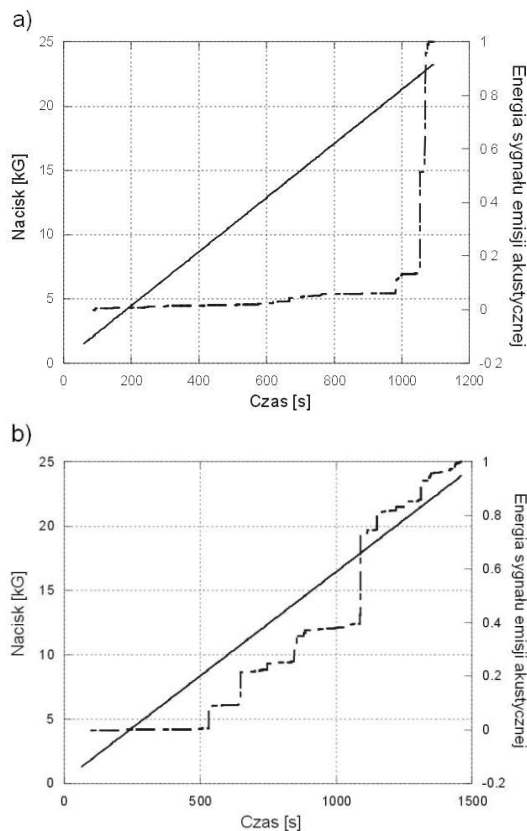
#### 4.2. Pomiary emisji akustycznej podczas mechanicznego ściskania zwijki

Proces termicznej obróbki zwijki nie zawsze usuwa wtrąciny gazowe z jej wnętrza. Brak jest metod oceny jakości tego procesu. Proponuje się pomiary sygnałów emisji akustycznej podczas mechanicznego ściskania zwijki (rys. 6). W trakcie ściskania ze względu na tarcie wokół wtrącin gazowych powstają sygnały emisji akustycznej świadczące o częstotliwości ich występowania.



Rys. 6. Układ do pomiaru sygnałów emisji akustycznej podczas mechanicznego ściskania zwijki; 1 – czujnik piezoelektryczny, 2 – badana zwijka, 3 – źródło nacisku z czujnikiem do pomiaru siły oraz przykładowy przebieg sygnału emisji akustycznej zarejestrowany podczas ściskania zwijki

Podczas testów przebadano kilkadziesiąt zwijek. Zmierzone ich podstawowe parametry ( $C$ ,  $tg\delta$ ,  $R_{izol}$ ), a następnie zarejestrowano sygnały emisji akustycznej podczas ściskania. Po tych pomiarach zwijki poddano próbie trwałości i po jej zakończeniu ponownie pomierzono podstawowe parametry. Zaobserwowano różnice w intensywności sygnałów emisji akustycznej, której miarą była ich energia. Stwierdzono ich związek ze zmianami pojemności po próbie trwałości (rys. 7).



Rys. 7. Linia przerywana – energia rejestrowanego sygnału emisji akustycznej, linia ciągła – liniowo narastające naprężenie mechaniczne zwijki. Zmiany pojemności po próbie trwałości: a) - 5,4%, b) -9,4%.

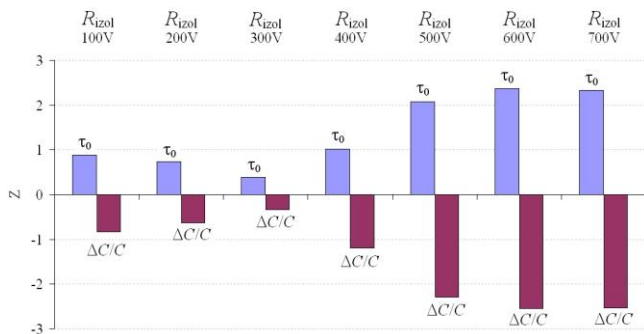
#### 4.3. Pomiar $R_{izol}$ i $tg\delta$ w funkcji napięcia polaryzującego kondensator

Pomiary rezystancji izolacji  $R_{izol}$  i współczynnika strat  $tg\delta$  wykonywane przy wyższych napięciach niż zalecane przez normy dają istotną informację o zmianach parametrów kondensatorów po próbie trwałości [5,6]. Charakterystyki wykazują zróżnicowanie nachyleń oraz przyrostów  $\Delta R_{izol}$  i  $\Delta tg\delta$  podczas tych pomiarów. Zaobserwowano istotną korelację dla  $\log(\Sigma \Delta R_{izol})$  rejestrowanych przy napięciach z zakresu  $100 V_{DC} \div 800 V_{DC}$  oraz  $\Delta tg\delta$  przy napięciach z zakresu  $100 V_{rms} \div 850 V_{rms}$  (50Hz) a obserwowaną zmianą pojemności  $\log(\Delta C/C)$  po próbie trwałość.

Ponadto zaobserwowano korelację między  $R_{izol}$ ,  $tg\delta$  a czasem poprawnej pracy  $\tau_0$ , gdy pomiary wykonywano przy wyższych napięciach polaryzacji. Pomiary  $R_{izol}$  wykonano przy napięciach z zakresu  $100 \div 700 V_{DC}$  a  $tg\delta$  przy napięciach z zakresu  $100 \div 275 V_{rms}$  (rys. 8).

#### 4.3. Pomiary odporności na narażenia impulsem prądowym

Impulsy prądowe niszczą delikatne połączenie cienkiej warstwy metalizacji folii z napylnym czołem. Podczas przepływu prądu może dojść do przerwania połączenia w wyniku lokalnego przegrzania, co skutkuje utratą pojemności. Metody pomiaru według norm nie zapewniają właściwej oceny jakości tego połączenia.



Rys. 8. Wartości współczynnika korelacji liniowej  $r_{xy}$  [4] między wynikami pomiarów wstępnych rezystancji izolacji  $R_{izol}$  zmierzonej przy różnych napięciach, a zmianami pojemności  $\Delta C/C$  po próbie trwałości oraz czasem poprawnej pracy  $\tau_0$  kondensatorów

Opracowano metodę badania w układzie generatora impulsów prądowych. Kondensator jest ładowany niewielkim prądem (ok.  $0,1I_p$ ) do napięcia  $U$  i następnie rozładowywany przez indukcyjność  $L$ . Wartość  $L$  determinuje amplitudę impulsu prądowego. Wyznaczono eksperymentalnie wartości graniczne prądu przypadające na jednostkę długości folii dla kondensatorów przeciwwzłóceniovych ( $2\div 10 \mu F$ ) oraz silnikowych ( $1\div 100 \mu F$ ), które wynoszą:

współczynnik wartości szczytowej prądu

$$J_{max} = 0,15 \text{ A/cm},$$

współczynnik wartości skutecznej prądu

$$J_{rms} = 5 \text{ mA/cm}.$$

Test impulsem prądowym o takich parametrach niszczy złe połączenia, a jednocześnie nie wpływa na trwałość poprawnie wykonanych kondensatorów.

Możliwość zastosowania tej metody udowodniono na przykładzie kondensatorów silnikowych  $4 \mu F$ . Połowę próbki wykonano poprawnie, a drugą połowę wykonano przegrzewając w procesie napyłania kontaktu jedno z czoł. Po takim wytworzeniu kondensatorów pomiary ich parametrów nie wykazały znaczących różnic między egzemplarzami. Zastosowany test impulsem prądowym wykrył, które kondensatory zostały wykonane wadliwie. Średnia zmiana pojemności po teście w grupie z wadliwym

kontaktem wyniosła:  $\Delta C/C_{sr} = -35\%$ , natomiast w grupie z poprawnie wykonanymi kontaktami zmiana wyniosła  $\Delta C/C_{sr} = -0,01\%$ .

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Jakość kondensatorów oraz ich parametry są uzależnione od zjawisk zachodzących w wyróżnionych obszarach: dielektryku oraz kontaktach metalizacji folii z warstwą metalizacji czoł zwijki. Oba wyróżnione obszary są kształtowane w odrębnych procesach technologicznych. Stąd, zaproponowano oddzielne metody oceny jakości kondensatorów, dotyczące poszczególnych procesów technologicznych. Proponowane metody pozwalają na rezygnację z długotrwałych badań starzeniowych, co przyspiesza opracowywanie nowych konstrukcji. Te metody wypełniają potrzebę szybkich badań ze względu na występujące częste zmiany dostawców materiałów do produkcji, które są bardzo różnej jakości. Pozwalają szybko reagować na złą jakość tych materiałów oraz błędy powstające w procesach technologicznych.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Polska Akademia Nauk, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa, 1993.
2. Wodziński J.: Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów. WNT, Warszawa 1997.
3. Boczar T.: Widma emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niepełne w izolacji olejowej, SiM, z. 114, Politechnika Opolska, Opole 2003.
4. Bendat J., Piersol A.: Random Data: Analysis & Measurement Procedures. Wiley & Sons, New York, 2000.
5. Norma PN-EN 60252-1. Kondensatory silnikowe prądu przemiennego.
6. Norma PN-EN 60384-14 Kondensatory stałe stosowane w urządzeniach elektronicznych

## METHOD OF QUALITY ASSESSMENT OF THE FOIL-BASED CAPACITORS

**Key-words:** capacitors, quality, acoustic emission

Foil-based capacitors are very popular capacitors. Technology and construction of these capacitors depends on their applications. Their reliability is determined by phenomena within dielectric foil and the metal layer sprayed on the foil heads to assure the metalized contacts. Improvements of their quality or production costs limitations can be obtained by new materials use or changes at production stages. These actions require quality assessment of the modified capacitors. The present methods of their quality determination are not sufficiently effective due too time-consuming procedures. Thus, the author proposes additional methods of quality assessment of the produced foil-based capacitors which are supplementary to the existing methods. Thanks to the proposed methods a fast response to low quality of materials and failures within technology processes can be assured.