



POLITECHNIKA GDAŃSKA  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji  
i Informatyki



**Kazimierz Józwiak**

**Metody oceny jakości  
kondensatorów foliowych**

Rozprawa doktorska

Promotor:

dr hab. inż. Janusz Smulko

Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki

Politechnika Gdańska

Gdańsk, 2011

---

## Spis treści

---

|   |    |
|---|----|
| <b>1. Wstęp</b> .....   | 6  |
| 1.1. Cel, tezy i zakres pracy .....   | 8  |
| <b>2. Budowa i właściwości kondensatorów foliowych</b> .....                    | 13 |
| 2.1. Konstrukcja kondensatorów foliowych .....                                  | 13 |
| 2.2. Właściwości stosowanych dielektryków .....                                 | 17 |
| 2.3. Proces technologiczny wytwarzania kondensatorów foliowych .....            | 19 |
| 2.4. Parametry elektryczne kondensatorów foliowych .....                        | 23 |
| 2.5. Podsumowanie .....   | 40 |
| <b>3. Produkcyjne metody testowania jakości kondensatorów foliowych</b> .....   | 41 |
| 3.1. Pomiary materiałów kwalifikowanych do produkcji .....                      | 41 |
| 3.2. Pomiary w procesie produkcyjnym .....                                      | 42 |
| 3.3. Podsumowanie .....   | 44 |
| <b>4. Charakterystyka badań laboratoryjnych według norm przemysłowych</b> ..... | 45 |
| 4.1. Badania kondensatorów przeciwzakłóceńowych .....                           | 45 |
| 4.1.1. Ogólna charakterystyka badań .....                                       | 45 |
| 4.1.2. Badania odporności na narażenie impulsem napięciowym .....               | 47 |
| 4.1.3. Opis próby trwałości .....   | 48 |
| 4.2. Badania kondensatorów silnikowych .....                                    | 50 |
| 4.2.1. Ogólna charakterystyka badań .....                                       | 50 |
| 4.2.2. Opis próby trwałości .....   | 50 |
| 4.2.3. Opis próby samoregeneracji .....   | 51 |
| 4.3. Podsumowanie .....   | 51 |

---

---

|  |     |
|--|-----|
| <b>5. Zjawiska wyładowań niezupełnych w kondensatorach foliowych</b> .....                   | 52  |
| 5.1. Mechanizmy powstawania wyładowań niezupełnych .....                                     | 52  |
| 5.2. Metody charakteryzowania wyładowań niezupełnych.....                                    | 55  |
| 5.3. Wpływ wyładowań niezupełnych na parametry kondensatorów foliowych.....                  | 61  |
| 5.4. Podsumowanie .....  | 63  |
| <b>6. Wyniki badań eksperymentalnych</b> .....   | 64  |
| 6.1. Badania trwałości kondensatorów przeciwzakłóceniovych .....                             | 64  |
| 6.1.1. Wyniki próby trwałości 2000 h.....  | 65  |
| 6.1.2. Analiza uszkodzeń w kondensatorach po próbie trwałości 2000 h.....                    | 68  |
| 6.1.3. Wyniki próby trwałości 4500 h.....  | 76  |
| 6.1.4. Analiza uszkodzeń w kondensatorach po próbie trwałości 4500 h.....                    | 84  |
| 6.2. Badania trwałości kondensatorów silnikowych .....                                       | 90  |
| 6.3. Emisja akustyczna indukowana naprężeniami mechanicznymi.....                            | 94  |
| 6.4. Podsumowanie .....  | 100 |
| <b>7. Ocena jakości połączenia warstwy metalizacji z metalizacją zwijki kondensatora</b> ... | 102 |
| 7.1. Badania zwijek kondensatorów silnikowych o pojemności 4 $\mu$ F .....                   | 108 |
| 7.2. Badania kondensatorów przeciwzakłóceniovych o pojemności 470nF .....                    | 109 |
| 7.3. Podsumowanie .....  | 119 |
| <b>8. Wnioski końcowe</b> .....  | 120 |
| <b>9. Literatura</b> .....   | 124 |
| <b>Dodatek A</b>   |     |
| Aproksymacja czasu poprawnej pracy kondensatorów podczas próby trwałości .....               | 131 |
| <b>Dodatek B</b>   |     |
| Instrukcja badania jakości kondensatorów foliowych .....                                     | 135 |
| <b>Dodatek C</b>   |     |
| Badania rozkładu natężenia pola elektrycznego w kondensatorach foliowych .....               | 145 |

---

## Wykaz ważniejszych oznaczeń

|                   |   |
|-------------------|---|
| $a$               | szerokość warstwy wzmocnionej metalizacji                                   |
| $\alpha$          | współczynnik nachylenia funkcji   |
| $b$               | szerokość folii metalizowanej   |
| $b_1$             | szerokość zwijki kondensatora po nawinięciu                                 |
| $C$               | pojemność kondensatora  |
| $C_1$             | pojemność wtrąciny w dielektryku  |
| $C'_2$            | pojemność zastępcza   |
| $C'_3$            | główna część pojemności kondensatora  |
| $C_k$             | pojemność kondensatora wzorcowego   |
| $C_t$             | pojemność kondensatora testowanego  |
| $d$               | grubość dielektryka   |
| $\delta$          | kąt między wektorami składowej prądu pojemnościowego a prądem rzeczywistym  |
| $\Delta C/C$      | względna zmiana pojemności  |
| $\Delta tg\delta$ | przyrost wartości współczynnika strat dielektrycznych $tg\delta$            |
| $du/dt$           | szybkość zmian napięcia na zaciskach kondensatora                           |
| $\epsilon$        | względna przenikalność dielektryczna materiału                              |
| $\epsilon_0$      | przenikalność dielektryczna próżni  |
| $E$               | natężenie pola elektrycznego  |
| $E_C$             | energia cieplna wydzielana w kondensatorze                                  |
| $ESR$             | zastępcza rezystancja szeregową kondensatora                                |
| $F$               | siła nacisku na zwijkę podczas formowania termicznego                       |
| $\phi$            | kąt fazowy między wektorami napięcia i prądu w kondensatorze                |
| $f$               | częstotliwość   |
| $f_1, f_2$        | częstotliwości graniczne  |
| $h$               | wysokość między dyszą urządzenia metalizującego a powierzchnią czoła zwijki |
| $I$               | prąd  |
| $I_C$             | składowa pojemnościowa prądu w kondensatorze                                |
| $i_C$             | wartość chwilowa prądu w kondensatorze                                      |
| $I_{max}$         | maksymalna wartość prądu  |
| $I_{Cmax}$        | dopuszczalna wartość skuteczna prądu kondensatora                           |
| $I_H$             | prąd źródła   |
| $I_R$             | składowa rezystancyjna prądu w kondensatorze                                |
| $I_{rms}$         | wartość skuteczna prądu   |
| $I_u$             | prąd upływu   |
| $J_{imp}$         | wartość szczytowa gęstości prądu na jednostkę długości folii                |
| $J_{rms}$         | wartość skuteczna gęstości prądu na jednostkę długości folii                |

---

|                    |   |
|--------------------|---|
| $k$                | przesunięcie między foliami w zwijce  |
| $K$                | wzmocnienie wzmacniacza pomiarowego   |
| $l$                | długość folii metalizowanej (okładziny)   |
| $L_S$              | szeregowa indukcyjność pasożytnicza kondensatora                                |
| $m$                | szerokość marginesu folii metalizowanej   |
| $q_p$              | ładunek pozorny wyładowania niezupełnego  |
| $r$                | promień obszaru wtrąciny  |
| $r_r$              | promień obszaru samoregeneracji   |
| $R_{izol}$         | rezystancja izolacji kondensatora   |
| $R_i$              | rezystancja kontaktu między metalizacją folii a metalizacją czoła               |
| $R_R$              | część rzeczywista impedancji w schemacie zastępczym kondensatora                |
| $R_S$              | rezystancja szeregową kondensatora  |
| $R_{sw}$           | rezystancja szeregowego rezystora wzorcowego                                    |
| $\rho_V$           | rezystywność dielektryka  |
| $R_f$              | rezystancja metalizacji folii   |
| $R_w$              | rezystancja wewnętrzna źródła napięciowego                                      |
| $r_{xy}$           | współczynnik korelacji liniowej między zmiennymi $x$ i $y$                      |
| $S$                | powierzchnia okładziny kondensatora   |
| $\tau$             | zmierzony czas poprawnej pracy kondensatora                                     |
| $\tau_0$           | ekstrapolowany czas poprawnej pracy kondensatora                                |
| $\tau_c$           | stała czasowa kondensatora  |
| $T$                | okres powtarzania impulsów prądowych  |
| $T_p$              | okres podstawowy oscylacji prądu w badaniu obciążeniem impulsowym kondensatorów |
| $tg\delta$         | współczynnik strat dielektrycznych  |
| $t$                | czas  |
| $U$                | napięcie  |
| $U_1, U_2$         | napięcia wyjściowe wzmacniaczy pomiarowych                                      |
| $U_{Cmax}$         | dopuszczalna wartość skuteczna napięcia na zaciskach kondensatora               |
| $u_g$              | napięcie gaśnięcia wyładowań niezupełnych                                       |
| $U_i$              | wartość szczytowa impulsu napięciowego  |
| $U_N$              | napięcie znamionowe kondensatora  |
| $U_P$              | napięcie pomiarowe  |
| $U_{rms}$          | wartość skuteczna napięcia  |
| $u_z$              | napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych   |
| $\bar{x}, \bar{y}$ | wartość średnia zmiennej $x, y$   |
| $z$                | standaryzowana zmienna losowa o rozkładzie Gaussa                               |
| $Z$                | impedancja dwójnika   |
| $\gamma_1$         | skośność (współczynnik asymetrii)   |
| $\gamma_2$         | kurtoza (współczynnik spłaszczenia)   |
| $\sigma_x^2$       | wariancja sygnału $x(t)$  |

---

## 1. Wstęp

---

Zagadnienia oceny jakości elementów pasywnych, w tym w szczególności kondensatorów, są przedmiotem badań już od wielu dziesięcioleci [13-15, 19, 28, 31, 32, 34, 70, 82]. Te zagadnienia stanowią główną tematykę szeregu cyklicznie organizowanych konferencji międzynarodowych (np.: IMAPS – International Microelectronics and Packaging Society Conferences, czy CARTS – Europe Passive Components Marketing Seminars). Dodatkowo organizowane są konferencje dotyczące wybranych technik pomiarów (np.: emisji akustycznej – EWGAE – European Working Group on Acoustic Emission, ICNF – International Conference on Noise and Fluctuations), stosowanych także do oceny jakości elementów pasywnych. Jednym z powszechnie stosowanych w układach zasilania sieciowego elementem pasywnym są kondensatory foliowe. Przewiduje się, że elementy te, ze względu na parametry i technologię produkcji nie będą mogły być szybko zastąpione przez inne rodzaje kondensatorów. Stąd, ocena jakości kondensatorów foliowych ma istotne znaczenie, ze względu na ich obecną i przewidywaną rolę na rynku elementów pasywnych.

Warto podkreślić, że Polska stała się obecnie liderem w produkcji sprzętu AGD w Europie. Szacuje się, że co trzecie urządzenie AGD pochodzące z Europy jest produkowane w Polsce. Prognozowany jest dalszy wzrost produkcji i umocnienie pozycji Polski w tej branży. W większości urządzeń AGD stosowane są kondensatory foliowe w układach przeciwzakłóceń, zasilania oraz w silnikach elektrycznych tych urządzeń. Stosowane w tym sprzęcie kondensatory foliowe są produkowane w dużej części w Polsce.

Wzrost produkcji sprzętu AGD i silna konkurencja ze strony zagranicznych producentów kondensatorów spowodowały zwiększenie wymagań dotyczących jakości stosowanych kondensatorów foliowych, przy jednoczesnym dążeniu do coraz niższych kosztów produkcji. Wytwarzane kondensatory muszą spełniać wymagania techniczne zawarte w stosownych normach przemysłowych. Bardzo często wymagania te są zaostrzane przez odbiorców w celu

---

uzyskania podwyższonej niezawodności, niezbędnej w wielu aplikacjach (np. sprzęt medyczny, sprzęt wojskowy, urządzenia stosowane w przemyśle górniczym, aparatura pomiarowa lub sprzęt AGD o najwyższych standardach). Rynek dla kondensatorów o podwyższonej jakości wzrasta i stanowi pewne wyzwanie dla producentów.

W przypadku popularnych typów kondensatorów uzyskanie wysokiej jakości przy zachowaniu relatywnie niskiej ceny ich wytwarzania wymusza konieczność ciągłej modernizacji ich konstrukcji oraz procesu produkcyjnego. Poprawa jakości może być uzyskana przez wprowadzanie innych materiałów lub zmian technologii wytwarzania. Podstawą wprowadzenia takich zmian jest szczegółowa ocena jakości produkowanych kondensatorów, co jest przedmiotem niniejszej pracy.

Metody badawcze zawarte w normach zwykle wymagają długiego czasu badań, co w znacznym stopniu ogranicza ich przydatność podczas prowadzenia badań przy nowych konstrukcjach. Ponadto, takie badania są kosztowne, co ma znaczenie przy dążeniu do obniżania jednostkowych kosztów produkcji. Jednocześnie, część z nich ma charakter destrukcyjny dla badanych egzemplarzy. Dodatkowo, normy narzucają jedynie zapewnienie pewnych granicznych wartości parametrów kondensatorów. Natomiast z punktu widzenia odbiorcy, istotna jest szacunkowa znajomość prognozowanego czasu poprawnej pracy danego typu kondensatorów, wykonanych z określonych materiałów i z zastosowaniem opracowanej technologii produkcji.

Dany typ kondensatora można wykonać z kilku materiałów (wytwarzanych przez różnych producentów) i w różnych warunkach technologicznych, co znacząco wpływa na koszty produkcji. Wszystkie przyjęte warianty wytwarzania kondensatorów mogą spełniać podstawowe wymagania stawiane w normie, natomiast charakteryzują się one różnym czasem poprawnej pracy lub szybkością degradacji podstawowych parametrów w trakcie użytkowania. Stąd zachowując ustalony, bezawaryjny czas pracy kondensatorów można ograniczyć koszty wytwarzania lub podwyższyć ich jakość przy przyjęciu ustalonych nakładów, w zależności od aktualnych wymagań odbiorcy.

## 1.1. Cel, tezy i zakres pracy

Zasadniczym celem pracy jest opracowanie nowych metod oceny jakości kondensatorów wykonanych z folii metalizowanej, pozwalających na ich wdrożenie u producenta. Proponowane metody powinny stanowić rozszerzenie istniejących już metod, opracowanych i wymaganych w odpowiednich normach przemysłowych. Bardziej szczegółowo, jako główne cele pracy należy wymienić:

1. Wytypowanie metod pomiarów oraz parametrów sygnałów emisji akustycznej, które są wynikiem zjawisk wyładowań niezupełnych we wtrącinach oraz pustkach powietrznych w zwijkach folii.
2. Opracowanie testu umożliwiającego ocenę jakości połączenia między metalizacją czoła a metalizacją zwijki folii.
3. Określenie warunków pomiarów parametrów elektrycznych kondensatorów pozwalających na ocenę czasu ich prawidłowej pracy.

Do realizacji szczegółowych celów pracy proponuje się zastosować pomiary sygnałów emisji akustycznej oraz pomiary wybranych parametrów elektrycznych, pozwalających charakteryzować jakość kondensatorów. Sygnały emisji akustycznej są generowane w wyniku zjawiska tarcia w obszarach nieciągłości materiału pod wpływem naprężeń mechanicznych lub podczas zachodzenia zjawisk wyładowań niezupełnych w obszarach o podwyższonym natężeniu pola elektrycznego (wtrąciny, pustki gazowe) [3, 5-10, 13-17, 21-25, 28, 35-39, 70-73, 76-78, 85, 88]. W przypadku kondensatorów foliowych, w których występują obszary szczególnie narażone na powstawanie wyładowań niezupełnych (np.: krawędzie zwijki przy warstwie metalizacji kontaktów), metody wykorzystujące pomiary sygnałów emisji akustycznej nie są stosowane powszechnie. Zwykle wykorzystuje się gotowe systemy do pomiarów wyładowań niezupełnych za pomocą obserwacji prądów płynących w układzie mostkowym [82, 84-86, 92]. Taka metoda ma niestety wady; pozwala mierzyć tylko prąd kompensujący powodowany wyładowaniami niezupełnymi w badanym kondensatorze. Ponadto, przy dużych pojemnościach kondensatora, rzędu  $\mu\text{F}$ , jest technicznie trudna do realizacji. Tych wad jest pozbawiona metoda wykorzystująca sygnały emisji akustycznej. Dodatkowo, w tej metodzie przy stosowaniu wielu sensorów można lokalizować miejsca występowania wyładowań niezupełnych [16, 17].

W pracy zaproponowano pomiary wybranych parametrów elektrycznych jako miary służące do oszacowania czasu poprawnej pracy kondensatorów. Część takich pomiarów jest



wymagana obowiązującymi normami przemysłowymi [49-51], jednak dotychczas nie próbowano ustalić ich związku z czasem poprawnej pracy. Stąd, postawiony w pracy jeden z celów jest bardzo interesujący w praktyce, gdyż na podstawie krótkotrwałych pomiarów elektrycznych można dokonać selekcji kondensatorów, które będą działać długo i poprawnie.

Dotychczas stosowane metody badawcze są uzależnione od typu i przeznaczenia kondensatorów foliowych [69]. W pracy ograniczono się do zaproponowania nowych metod oceny jakości dla dwóch typów kondensatorów przeciwzakłóceniovych (klasy X lub Y) oraz silnikowych, jako obecnie najczęściej produkowanych. Należy przypuszczać, że proponowane metody powinny być skuteczne także dla innych, nie tak szeroko stosowanych typów (np. dla kondensatorów do kompensacji mocy biernej lub do pracy impulsowej).

Zagadnienia oceny jakości kondensatorów na podstawie innych parametrów niż typowych dla kondensatorów, nie występują często w literaturze. Do wyjątków należy zaliczyć propozycję oceny jakości kondensatorów elektrolitycznych na podstawie pomiarów ich szumów w zakresie małych częstotliwości [31, 32].

W celu opracowania nowych metod oceny jakości kondensatorów foliowych zaproponowano przeprowadzenie badań w niżej wymienionych etapach:

1. Pomiary wstępne, które obejmują pomiary:
  - a) wytypowanych parametrów badanych kondensatorów (pojemność, rezystancja izolacji, współczynnik strat dielektrycznych) przy różnych warunkach ich polaryzacji,
  - b) sygnałów emisji akustycznej, zaproponowane do realizacji w ramach prezentowanej rozprawy.
2. Próby starzeniowe kondensatorów wykonane na ramie trwałości, w celu identyfikacji wad i uszkodzeń w kondensatorach.
3. Ponowne pomiary typowych parametrów kondensatorów (jak w punkcie 1a) po zakończeniu próby starzeniowej.
4. Analiza wyników w celu określenia skuteczności metod oceny jakości kondensatorów za pomocą sygnałów emisji akustycznej lub wybranych parametrów elektrycznych tych kondensatorów.

Skuteczność proponowanych metod zostanie oceniona na podstawie analizy korelacji występującej między wynikami wszystkich pomiarów wstępnych, po wytworzeniu kondensatorów, a wynikami pomiarów po przeprowadzeniu próby starzeniowej lub podczas jej trwania.

Nowe procedury powinny dostarczać dane, na podstawie których będzie można ocenić przyjęte rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne pod względem jakości produkowanych wyrobów. W przypadku kondensatorów foliowych ich jakość jest oceniana na podstawie czasu poprawnej pracy (tj. czasu, w którym pojemność kondensatora nie zmniejszy się poniżej progowej ustalonej wartości). Jest to parametr trwałości wyrobu. Innym sposobem oceny jakości kondensatorów jest pomiar spadku pojemności jaki występuje po poddaniu kondensatorów próbie trwałości o ustalonym czasie trwania.

Podstawowymi elementami, decydującymi o jakości kondensatorów foliowych, są: dielektryk i zjawiska w nim zachodzące, warstwa metalizacji folii oraz jej połączenie z metalicznym czołem kondensatora do wyprowadzeń kontaktów. Stąd, do oceny jakości dielektryka oraz całej zwijki po jej mechanicznym ukształtowaniu, proponuje się zastosować pomiary:

- sygnałów emisji akustycznej powodowanych wyładowaniami niezupełnymi lub naprężeniami mechanicznymi,
- charakterystyk rezystancji izolacji i współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  w funkcji napięcia polaryzującego kondensator.

Do oceny jakości połączenia warstwy metalizacji z napyłoną warstwą metalicznego czoła proponuje się natomiast pomiary:

- sygnałów emisji akustycznej powodowanej drganiami mechanicznymi,
- odporności połączenia na narażenia przepływem impulsu prądowego o zadanej intensywności i kształcie.

W wyniku prowadzonych studiów literaturowych, wiedzy doświadczalnej dotyczącej technologii wytwarzania kondensatorów oraz przeprowadzonych dodatkowych badań wstępnych sformułowano tezy pracy:

1. Analiza sygnałów emisji akustycznej zwijek folii ściskanych mechanicznie pozwala wykryć występowanie obszarów wtrącin gazowych, gdzie mogą zachodzić wyładowania niezupełne.
2. Prawidłowość wykonania kontaktu między metalizacją folii a metalizacją czoła zwijki można wykryć za pomocą narażenia impulsem prądowym o ustalonej intensywności.
3. Intensywność sygnałów emisji akustycznej powodowanych wyładowaniami niezupełnymi i obserwowanych w trakcie próby wytrzymałości elektrycznej pozwala przewidywać zmianę właściwości wybranych typów kondensatorów w wyniku ich starzenia.

4. Charakterystyki wybranych parametrów kondensatorów w funkcji napięcia polaryzacji decydują w znacznym stopniu o czasie ich poprawnej pracy.

Pracę, poza pierwszym rozdziałem stanowiącym wstęp, podzielono na kolejnych siedem rozdziałów. W rozdziale drugim **Budowa i właściwości kondensatorów foliowych** przedstawiono szczegółowo budowę kondensatorów foliowych, scharakteryzowano materiały używane do ich produkcji oraz opisano technologię ich wytwarzania. W rozdziale opisano również podstawowe właściwości kondensatorów foliowych i stosowane metody ich pomiarów.

W rozdziale trzecim **Produkcyjne metody testowania jakości kondensatorów foliowych** przedstawiono stosowane dotychczas sposoby pomiarów podstawowych właściwości materiałów, używanych do produkcji kondensatorów a decydujących o ich właściwościach oraz pomiary wykonywane podczas procesu wytwarzania kondensatorów foliowych.

W rozdziale czwartym **Charakterystyka badań według norm przemysłowych** opisano badania i pomiary stosowane dla dwóch wybranych ze względu na wolumen produkcji typów kondensatorów według obowiązujących norm przemysłowych. Szczególną uwagę zwrócono na ograniczenia możliwości oceny jakości kondensatorów na podstawie tych norm.

W rozdziale piątym **Zjawiska wyładowań niezupełnych w kondensatorach foliowych** opisano mechanizmy powstawania wyładowań niezupełnych w tych kondensatorach, metody ich pomiarów oraz ich wpływ na degradację parametrów kondensatorów.

Rozdział szósty **Wyniki badań eksperymentalnych** jest najobszerniejszym rozdziałem pracy. Zawiera propozycje i realizację celów rozprawy w odniesieniu do pomiarów i analizy sygnałów akustycznych. Przedstawia szczegółowy opis przeprowadzonych pomiarów i prób starzeniowych kondensatorów oraz typowych rodzajów uszkodzeń obserwowanych w kondensatorach. W rozdziale tym przeprowadzono analizę uzyskanych wyników pokazując związki między zmierzonymi parametrami a czasem prawidłowej pracy kondensatorów lub zmianami ich wybranych właściwości (pojemności, rezystancji izolacji) mierzonymi po próbie trwałości.

W rozdziale siódmym **Ocena jakości połączenia warstwy metalizacji z metalizacją zwijki kondensatora** opisano zagadnienia związane z wpływem jakości kontaktu między metalizacją folii a metalicznym czołem kondensatora na jego poprawne funkcjonowanie. Stwierdzono, że połączenie to jest szczególnie wrażliwe na przepływ szybkozmiennych impulsów prądowych. Zaproponowano metodę oceny jakości tego połączenia za pomocą badania odporności kondensatora na narażenie impulsami prądowymi.

---

Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych potwierdzających skuteczność proponowanej metody.

W rozdziale ósmym pracy **Wnioski końcowe** wymieniono ponownie najistotniejsze wyniki uzyskane w pracy. Przypomniano cele i tezy postawione w pracy oraz podano szczegółowo rozdziały w których zawarto potwierdzenie postawionych tez.

W pracy, poza spisem wybranej i aktualnie dostępnej literatury dotyczącej opisywanej tematyki, załączono trzy dodatki.

W Dodatku A **Aproksymacja czasu poprawnej pracy kondensatorów podczas próby trwałości** opisano metodę aproksymacji czasu poprawnej pracy kondensatorów na podstawie wyników zmian ich pojemności podczas próby trwałości. Aproksymację przeprowadzono za pomocą metody regresji liniowej [43].

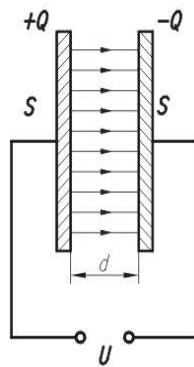
W Dodatku B **Instrukcja badania jakości kondensatorów foliowych** przedstawiono wykaz wszystkich metod badań zaproponowanych w pracy i stanowiących uzupełnienie metod już zalecanych w odpowiednich normach przemysłowych. Instrukcja umożliwia wykorzystanie uzyskanych w pracy wyników badań w produkcji kondensatorów, przy ocenie jakości na różnych etapach ich wytwarzania. Dzięki zaproponowanym metodom istnieją możliwości wybrania kondensatorów o bardzo wysokiej jakości, charakteryzujących się długim czasie bezawaryjnej eksploatacji.

W Dodatku C **Badania rozkładu natężenia pola elektrycznego w kondensatorach foliowych** zawarto opis rozkładu pola elektrycznego w obszarach występowania najbardziej typowych wad kondensatorów. Niezbędne obliczenia numeryczne przeprowadzono stosując metodę elementów skończonych za pomocą programu *FEMM 2D*.

## 2. Budowa i właściwości kondensatorów foliowych

### 2.1. Konstrukcja kondensatorów foliowych

Kondensator jest układem dwóch przewodników (okładzin) oddzielonych od siebie dielektrykiem posiadającym zdolność gromadzenia ładunków elektrycznych (rys. 2.1).



**Rys. 2.1.** Model kondensatora płaskiego;  $S$  – pole powierzchni okładzin,  $Q$  – ładunek zgromadzony na okładzinach,  $U$  – napięcie między okładzinami,  $d$  – grubość dielektryka

Podstawowym parametrem kondensatora jest jego pojemność. Pojemność kondensatora płaskiego wyraża się wzorem [34]:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{d} \text{ [F]}, \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} \approx 0,0886 \cdot 10^{-12} \text{ [F/cm]}, \quad (2.2)$$

gdzie:

$S$  – pole powierzchni okładziny [ $\text{cm}^2$ ],

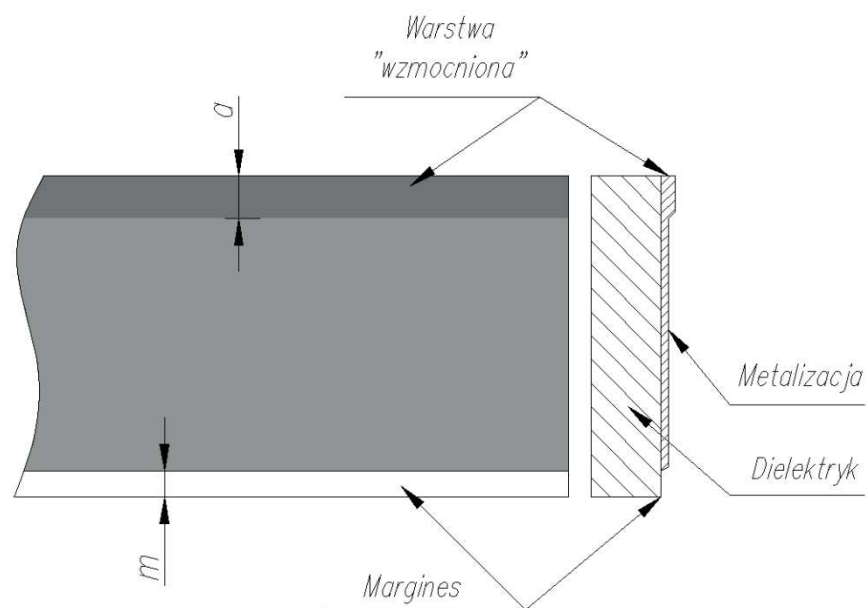
$d$  – grubość dielektryka [cm],

$\varepsilon_0$  – przenikalność dielektryczna próżni [F/cm],

$\varepsilon$  – względna przenikalność dielektryczna materiału.

Przestrzeń między okładzinami jest wypełniona dielektrykiem o odpowiednio dużej wartości względnej przenikalności dielektrycznej  $\epsilon$  pozwalającej uzyskać zadaną pojemność przy ograniczonych wymiarach i użytych materiałach [34, 38, 80].

W zależności od rodzaju zastosowanego dielektryka wytwarza się różne rodzaje kondensatorów [33, 62]. Kondensator z metalizowanej folii jest nawijany na korpusie izolacyjnym lub iglicy. Nawinięte zwoje folii tworzą naprzemiennie układ przewodników i izolatorów. Stosowana folia, to warstwa dielektryka o grubości od kilku do kilkunastu  $\mu\text{m}$ , z napyłoną na jej powierzchni warstwą metalu stanowiącą okładzinę kondensatora (rys. 2.2).



**Rys. 2.2.** Budowa folii metalizowanej stosowanej do produkcji kondensatorów;  $m$  – szerokość marginesu folii (część folii bez napyłonego metalu),  $a$  – szerokość warstwy wzmocnionej metalizacji

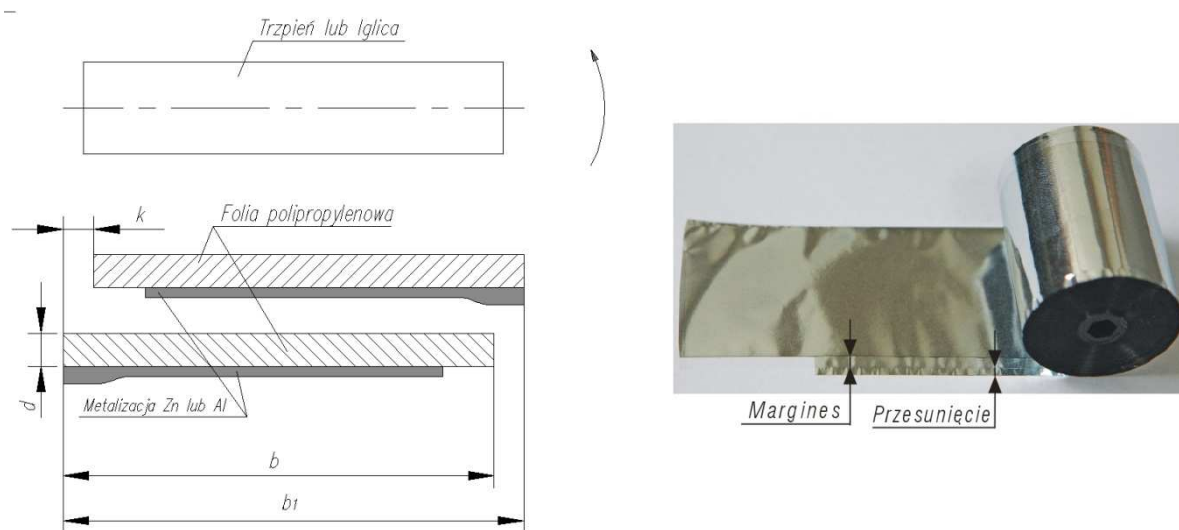
Warstwa metalu jest napyłona tak, aby pozostawić jedną krawędź (margines) dielektryka bez metalizacji (odizolowaną elektrycznie). Druga krawędź folii jest wykonywana tak, że na ustalonej szerokości (np. 5 mm) napyła się grubszą warstwą metalu. Grubość tej warstwy jest bardzo mała i wynosi ułamki  $\mu\text{m}$  (tab. 2.1). Producenci folii zamiast grubości warstwy metalizacji podają jej rezystancję na jednostkę powierzchni. Grubość warstwy metalizacji jest bardzo ważna ze względu na parametry kondensatora; im grubsza warstwa, tym mniejszy współczynnik strat szeregowych. Niestety, ze wzrostem grubości tej warstwy maleje zdolność samoregeneracji i wytrzymałość elektryczna folii [90]. Wybór grubości jest zatem kompromisem między tymi przeciwstawnymi warunkami i jest w znacznej mierze uzależniony od przeznaczenia kondensatora.

**Tab. 2.1.** Przykładowe parametry folii stosowanych przy wytwarzaniu kondensatorów

| Lp. | Rezystancja warstwy metalizowanej $R_f$ [ $\Omega/$ ] | Rodzaj metalizacji | Grubość metalizacji [ $\mu\text{m}$ ] |
|-----|---|--------------------|---------------------------------------|
| 1   | 4   | Zn                 | 0,0151                                |
| 2   | 4   | Al                 | 0,0057                                |
| 3   | 7,5   | Zn                 | 0,0080                                |
| 4   | 7,5   | Al                 | 0,0030                                |
| 5   | 150   | Zn                 | 0,0004                                |
| 6   | 150   | Al                 | 0,0002                                |

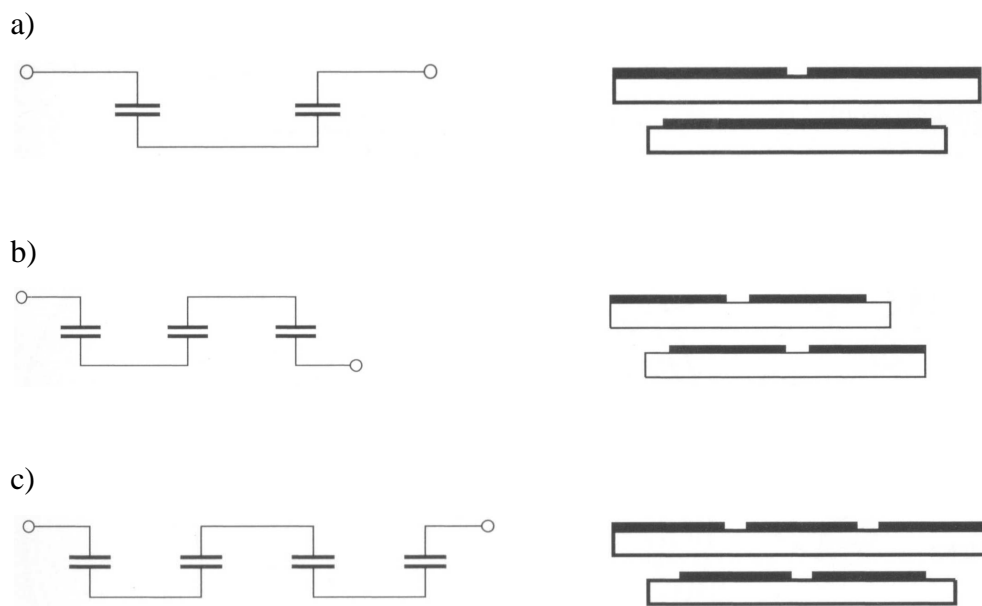
W produkcji stosowane są różne układy nawijania folii. Podstawowy układ to nawijanie z jednym marginesem. Folie nawijane są tak, aby ich marginesy były umieszczone po przeciwnych stronach, a warstwa metalizacji pierwszej folii przylegała do warstwy dielektrycznej drugiej folii (rys. 2.3; na rysunku grubości warstw metalizacji zostały przedstawione bez zachowania proporcji w celu ilustracji sposobu nawijania). W rzeczywistości grubość metalizacji jest pomijalna w stosunku do pozostałych wymiarów folii.

Po nawinięciu odpowiedniej długości folii otrzymuje się zwijkę o kształcie walca. Podstawy walca zakończone są krawędziami folii z warstwą metalizacji o większej grubości. Marginesy folii tworzą izolację między obu okładzinami w kondensatorze. Dodatkowo, ze względów technologicznych, obie folie są przesunięte względem siebie w celu ułatwienia wykonania czoł kondensatora.



**Rys. 2.3.** Sposób nawijania folii;  $k$  – przesunięcie między foliami w zwijce,  $d$  – grubość dielektryka,  $b$  – szerokość folii metalizowanej,  $b_1$  – szerokość zwijki kondensatorowej po nawinięciu

Wymiary przyjęte podczas nawijania mają istotne znaczenie dla przyszłych właściwości kondensatora, a dobór ich jest przeprowadzany na podstawie szeregu doświadczeń uzyskanych podczas przygotowania produkcji innych typów kondensatorów. Podczas produkcji stosowane są także inne układy nawijania, tworzące np. kondensatory szeregowe. Ten sposób polega na wykorzystaniu folii, w której margines jest umieszczony wewnątrz, a nie na jej krawędzi [64]. To pozwala uzyskać kondensator na napięcie dwukrotnie większe przy zachowaniu tej samej grubości dielektryka, ale kosztem dwukrotnego zmniejszenia jego pojemności. Stosuje się również układy szeregowe z trzech lub czterech kondensatorów wykonanych z tej samej warstwy dielektryka (rys. 2.4).

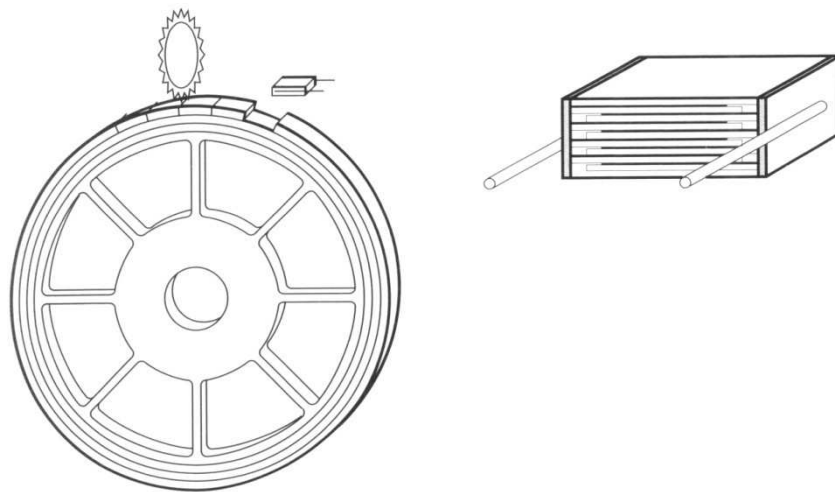


**Rys. 2.4.** Inne stosowane układy nawijania kondensatorów z folii metalizowanej; układ szeregowy: a) dwóch, b) trzech, c) czterech kondensatorów [91]

Konstrukcja kondensatorów z folii metalizowanej jest praktycznie bezindukcyjna, ze względu na ograniczenie pasożytniczych indukcyjności przez zwarcie wszystkich zwojów folii na czołach zwiłek po naniesieniu warstwy metalizacji. Taki sposób nawijania kondensatorów nie jest pozbawiony wad. Cienka folia oddzielająca okładziny kondensatora jest nawijana na małej średnicy trzpienia lub iglicy, co powoduje że następne zwoje folii mają większą średnicę. Ponadto, w niektórych wykonaniach zwoje są spłaszczane w celu uzyskania owalnego kształtu. W tych rozwiązaniach dielektryk jest narażony na występowanie nierównomiernych naprężeń mechanicznych i elektrycznych, co osłabia jego wytrzymałość elektryczną. Procesy te powodują powstawanie pustek powietrznych lub gazowych, które mogą być źródłem wyładowań niezupełnych. Z tego względu dla specjalnych aplikacji



wprowadzono kondensatory o konstrukcji warstwowej. Mają one takie same cechy jak dotychczas opisane kondensatory zwijane, ale ich konstrukcja zapewnia, że dielektryk



**Rys. 2.5.** Sposób wytwarzania kondensatorów foliowych warstwowych [91]

nie podlega różnicowanym naprężeniom mechanicznym oraz elektrycznym, ponieważ wszystkie jego elektrody stanowią układ identycznych prostokątów rozdzielonych dielektrykiem. Taki efekt uzyskuje się przez nawinięcie folii cylindrycznie o dużej średnicy i wycinanie małych wycinków w zależności od żądanej pojemności (rys. 2.5).

## 2.2. Właściwości stosowanych dielektryków

W kondensatorach z folii metalizowanej dielektrykiem jest cienka folia izolacyjna, która może być wykonana z różnych materiałów. Najpopularniejszymi stosowanymi materiałami dielektryka są polipropylen, poliester oraz rzadziej poliwęglan. Nowoczesnym materiałem dielektrycznym jest także siarczek polifenyłu (PPS). Dielektryk spełnia dwie role: zwiększa wytrzymałość elektryczną i jednocześnie pojemność kondensatora ze względu na duże wartości względnej przenikalności dielektrycznej  $\epsilon$  (tab. 2.2) [33, 44, 65, 88, 94].

Zastosowanie materiału o większej wartości  $\epsilon$  zapewnia, przy zadanych wymiarach, uzyskanie kondensatora o większej pojemności. Niestety, nie każdy materiał można zastosować w określonym typie kondensatorów. Wzrost współczynnika  $\epsilon$  zmniejsza zwykle rezystancję skrośną tego materiału i jego wytrzymałość napięciową. Poniżej

scharakteryzowano najistotniejsze właściwości dielektryków stosowanych przy wytwarzaniu kondensatorów foliowych.

**Polipropylen** – najbardziej popularny materiał stosowany w kondensatorach prądu zmiennego, trudny w obróbce mechanicznej oraz metalizacji. Posiada względnie mały współczynnik przenikalności dielektrycznej  $\epsilon = 2,2$ . Jego podstawowymi zaletami jest bardzo mała stratność ( $\text{tg}\delta$ ), duża rezystancja izolacji, wysoka stabilność parametrów w czasie i niska absorpcja dielektryczna.

**Poliester** – również bardzo popularny materiał dielektryczny, łatwy w obróbce mechanicznej i metalizacji. Można z niego uzyskać bardzo cienkie folie, o grubości rzędu  $1\ \mu\text{m}$ . Duża wartość  $\epsilon = 3,3$  pozwala na uzyskanie znacznych pojemności przy stosunkowo niewielkich wymiarach kondensatora. Niestety, poliester ma najgorsze właściwości wśród tworzyw sztucznych stosowanych do produkcji folii kondensatorowych ze względu na znaczną wartość  $\text{tg}\delta$ , małą rezystancję izolacji oraz mniejszą wytrzymałość elektryczną i występowanie znaczącej absorpcji dielektrycznej. Jego zaletą jest wysoka dopuszczalna temperatura pracy.

**Tab. 2.2.** Podstawowe parametry elektryczne wybranych materiałów dielektrycznych; wytłuszczonym drukiem wyróżniono materiały stosowane przy wytwarzaniu badanych w pracy kondensatorów

| Lp.      | Rodzaj dielektryka  | Względna przenikalność dielektryczna $\epsilon$ | Współczynnik stratności $\text{tg}\delta$ | Dopuszczalne natężenie pola elektrycznego E [kV/mm] |
|----------|---------------------|---|---|---|
| 1        | Powietrze           | 1,00058   | <0,0001                                   | 3,5÷5   |
| <b>2</b> | <b>Polipropylen</b> | <b>2,2</b>                                      | <b>&lt;0,0002</b>                         | <b>350</b>  |
| <b>3</b> | <b>Poliester</b>    | <b>3,3</b>                                      | <b>&lt;0,005</b>                          | <b>200</b>  |
| 4        | Poliwęglan          | 2,8   | <0,001                                    | 150   |
| 5        | Polistyren          | 2,6   | <0,0002                                   | 100   |
| 6        | Szkło               | 10  | <0,003                                    | 120÷140   |
| 7        | Mika                | 4÷8   | <0,0004                                   | 120÷130   |
| 8        | Ceramiki            | 5÷50000   | < 6÷12                                    | 4÷20  |
| 9        | Papier impregnowany | 3,5÷6   | <0,002                                    | 30÷50   |
| 10       | Polifenyl           | 3,3   | <0,0002                                   | 250   |

**Poliwęglan** – pozwala na wytwarzanie cienkich folii, jest łatwy w obróbce i metalizacji. Współczynnik strat dielektrycznych przyjmuje relatywnie duże wartości. Posiada niską wytrzymałość napięciową przy wysokiej temperaturze pracy.

**Polifenyl (PPS)** – cechuje się dużą odpornością na wysokie temperatury i bardzo niską stratnością, posiada dobrą stabilność parametrów w czasie. Jego podstawową wadą jest niska

wytrzymałość elektryczna, co powoduje, że folie kondensatorowe są grubsze, a kondensatory mają większe wymiary.

### **2.3. Proces technologiczny wytwarzania kondensatorów foliowych**

Wytwarzanie kondensatorów foliowych obejmuje szereg operacji i czynności, w których przestrzeganie parametrów technologicznych decyduje o jakości gotowego produktu. Poniżej opisano najbardziej istotne z nich, ze szczególnym podkreśleniem możliwości powstawania wad oraz uszkodzeń [24, 45, 94].

#### **Nawijanie zwijki**

Podstawowym elementem każdego kondensatora z folii metalizowanej jest zwijka decydująca o jego zasadniczych parametrach. Zwijki są nawijane z folii metalizowanych tworząc układ dielektryk-przewodnik. Folia jest dostarczana w nawiniętych szpulach (rys. 2.6a), które montuje się do nawijarki (rys. 2.6b). Podczas nawijania należy zachować szereg parametrów, w szczególności odpowiedni naciąg folii, docisk oraz prędkości obrotowe.

Nawijanie rozpoczyna się na izolacyjnym trzpieniu lub iglicy. Stosowane folie są bardzo cienkie i dlatego niezbędne jest wykonanie kilku zwojów początkowych oraz końcowych, które nie uczestniczą w gromadzeniu ładunku (nie posiadają metalizacji), a służą jako ochrona czynnej części zwijki. Metalizację z fragmentu folii (rys. 2.7) usuwa się przez przepływ odpowiednio dużego prądu elektrycznego. Po nawinięciu określonej liczby zwojów urządzenie dokonuje usunięcia metalizacji na końcowym fragmencie folii oraz sklejenie ochronnych, biernych zwojów folii zabezpieczając zwijkę przed jej rozwinięciem (rys. 2.8).

Podczas tego procesu mogą wystąpić nadmierne naprężenia mechaniczne dielektryka na skutek zmarszczenia się folii oraz powstania między zwojami pustek powietrznych, co skutkuje pogorszeniem parametrów kondensatora, wzrostem prawdopodobieństwa wystąpienia w trakcie eksploatacji wyładowań niezupełnych i zmniejszeniem się odporności na narażenia impulsowe [10, 28, 66].

W celu uzyskania odpowiedniego kształtu, dla niektórych typów kondensatorów, zwijki są spłaszczane (rys. 2.9). Ten proces odbywa się w podwyższonej temperaturze przy określonej sile nacisku  $F$ . Wartość siły nacisku oraz temperaturę podczas tego procesu

dobiera się eksperymentalnie, aby ograniczyć ilość gazów w zwijce i powstawanie obszarów, w których mogą występować wyładowania niezupełne. Szczegółowe parametry tego procesu nie są ujawniane przez producenta.

a)



b)



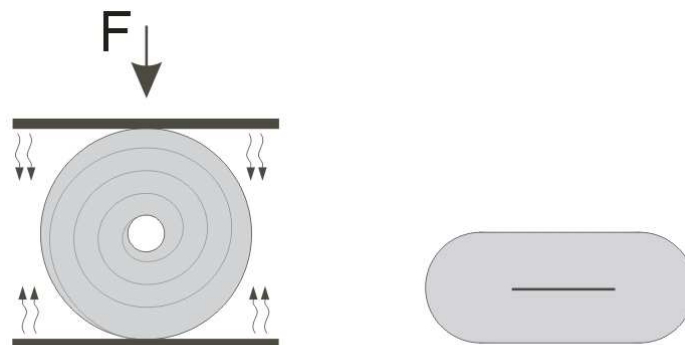
**Rys. 2.6.** Ilustracja procesu tworzenia zwijek: a) widok szpul metalizowanej folii, b) nawijarka



**Rys. 2.7.** Widok folii z usuniętą warstwą metalizacji końca zwijki



**Rys. 2.8.** Gotowe zwijki po nawinięciu: zwijka na trzpieniu izolacyjnym (po lewej), zwijka bez trzpienia przeznaczona do spłaszczania (po prawej)



**Rys. 2.9.** Spłaszczanie zwijek kondensatorów w podwyższonej temperaturze przy nacisku siłą  $F$  w celu uzyskania kondensatorów o prostopadłościennym kształcie po zamknięciu w obudowie

## Szoperowanie zwijki folii

Na czoła zwijki napyłany jest metal w określonej temperaturze i pod określonym ciśnieniem (rys. 2.10). Proces ten odbywa się w specjalnym urządzeniu i jest potocznie nazywany „szoperowaniem” od nazwiska wynalazcy tej metody Maxa Schoopera, którą opracował na przełomie XIX i XX wieku, patentując w 1915 roku pomysł na urządzenie do metalizacji natryskowej.

a)



b)



c)



d)



**Rys. 2.10.** Proces metalizacji czoł zwijek: a) przygotowanie pakietu zwijek, b) napyłanie metalu roztopionego w łuku elektrycznym na czoła zwijek, c) pakiet zwijek po metalizacji, d) gotowe zwijki

Roztopiony metal jest napyłany na czoła zwijek tworząc elektrody, do których zgrzewane są wyprowadzenia kondensatora. Ta operacja jest jedną z najważniejszych w produkcji kondensatorów foliowych. Jakość połączenia metalicznego czoła z warstwą metalizacji folii decyduje o rezystancji szeregowej kondensatora, jego wytrzymałości i odporności na przewodnictwo prądu, w szczególności na narażenia impulsowe. Wadliwe wykonanie tego połączenia prowadzi do lokalnego przegrzewania się miejsc o większej rezystancji kontaktu,

co może prowadzić do oddzielania poszczególnych zwojów okładziny i stopniowej utraty pojemności, a nawet do całkowitego oddzielenia się warstwy metalizacji folii od czoła.

### **Obróbka termiczna zwijki**

Po procesie metalizacji czoł, zwijki poddaje się obróbce termicznej w celu uzyskania odpowiednich właściwości dielektrycznych, co powoduje poprawę parametrów zwijki. Zmiany temperatury w czasie są ściśle określone dla danego rodzaju zwijki oraz folii i podobnie jak parametry podczas termicznego kształtowania zwijek nie są ujawniane przez producenta [90].

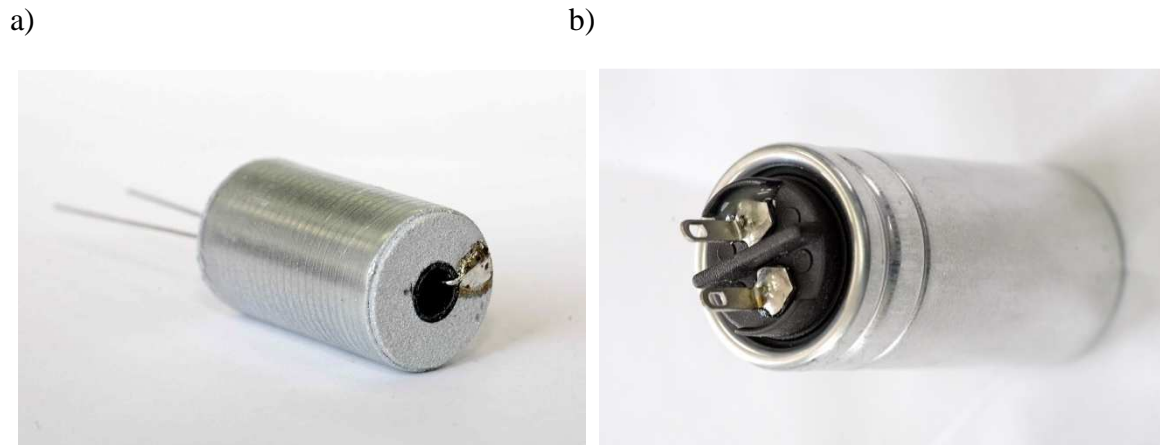
### **Czyszczenie mechaniczne i elektryczne (regeneracja) zwijek**

Po przeprowadzeniu ww. operacji konieczne jest usunięcie ewentualnego nadmiaru metalu – czyszczenie zwijek. Proces metalizacji może pozostawiać na powierzchni bocznej kondensatora warstwę metalu, a nawet spowodować jego wnikięcie w obszar marginesu zwijki, powodując spadek rezystancji izolacji i wytrzymałości elektrycznej między zaciskami kondensatora. Dodatkowo, cienka folia dielektryczna po nawinięciu, która nie była jeszcze polaryzowana elektrycznie, może okazać się lokalnie zwarta, stąd regeneracja elektryczna zwijki jest wykonywana przez jej polaryzację impulsami napięciowymi, prowadzącymi do przebieg w miejscach o słabej 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 tej fazie wytwarzania kondensatorów zbyt intensywna polaryzacja zwijki prowadzi do lawinowych przebieg, co skutkuje pogorszeniem parametrów elektrycznych dielektryka. Zbyt słaba polaryzacja nie spowoduje natomiast usunięcia przypadkowo występujących zwarców w strukturze kondensatora.

### **Wyprowadzenia kondensatora**

W celu wykonania wyprowadzeń kondensatora o odpowiedniej wytrzymałości prądowej i mechanicznej, do napylnych metalicznych czoł zwijek są zgrzewane lub lutowane druty o określonej średnicy (rys. 2.11). Napylna warstwa metalu pozwala na wytworzenie odpowiedniego połączenia. Przy nieprawidłowym wykonaniu tego procesu, może wystąpić przegrzanie czoł lub zbyt słaby kontakt elektryczny (tzw. zimny lut).



**Rys. 2.11.** Produkty końcowych etapów wytwarzania kondensatorów: a) zwijka z wyprowadzeniami, b) gotowy wyrób po hermetyzacji w obudowie

### **Hermetyzacja**

Wykonane zwijki są umieszczane w obudowie i w zależności od potrzeb hermetyzowane odpowiednimi materiałami izolacyjnymi (tzw. syciwami). Operacja ta ma na celu zabezpieczenie zwijki przed wpływami zewnętrznych czynników klimatycznych oraz poprawę właściwości dielektrycznych zwijek w obszarach marginesów. Po hermetyzacji proces wytwarzania kondensatorów kończy się operacją oznakowania oraz wykonaniem pomiarów końcowych w celu określenia ich parametrów.

## **2.4. Parametry elektryczne kondensatorów foliowych**

Parametry kondensatorów foliowych zależą od rodzaju zastosowanych materiałów, konstrukcji oraz technologii produkcji. Do najistotniejszych parametrów należy pojemność  $C$ , współczynnik strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ , rezystancja izolacji  $R_{\text{izol}}$ , rezystancja szeregową  $R_s$ , napięcie przebicia  $U_p$ . W bieżącym podrozdziale zostaną zdefiniowane ww. parametry charakteryzujące wybrane kondensatory foliowe oraz omówione metody ich pomiarów.

### **Pojemność**

Pojemność każdego kondensatora zależy od jego wymiarów geometrycznych i rodzaju dielektryka. Kondensator wykonany ze zwiniętej folii można uznać za odmianę kondensatora płaskiego. W celu wykonania kondensatora o zadanej pojemności  $C$  z folii metalizowanej

należy wyznaczyć powierzchnię folii  $S$  oraz wymaganą długość folii  $l$  o zadanej szerokości  $b$  korzystając z zależności (2.1):

$$S = \frac{C \cdot d}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \quad [\text{cm}^2] \quad (2.3)$$

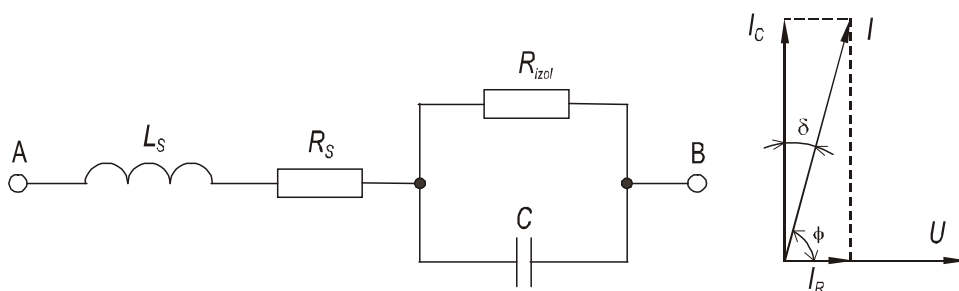
$$l = \frac{C \cdot d}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (b - 2m - k)} \quad [\text{cm}] \quad (2.4)$$

gdzie:

- $d$  – grubość dielektryka (folii) równa odległości między elektrodami [cm],
- $b$  – szerokość folii metalizowanej [cm],
- $m$  – szerokość marginesu folii metalizowanej [cm],
- $k$  – przesunięcie między foliami w zwijce [cm].

### Współczynnik strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ , zastępcza rezystancja szeregową

Do elementów pasożytniczych kondensatora należy zaliczyć: rezystancję izolacji  $R_{\text{izol}}$ , rezystancję szeregową  $R_S$  i indukcyjność  $L_S$  (rys. 2.12). W kondensatorach wskutek upływności następuje zmniejszanie się w czasie zgromadzonego ładunku, w wyniku przepływu niewielkiego prądu przez dielektryk o skończonej rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$ . W idealnym kondensatorze nie występują straty ładunku, a prąd wyprzedza napięcie w fazie o  $\varphi = 90^\circ$ . W rzeczywistym kondensatorze wartość tego kąta jest nieco mniejsza niż  $90^\circ$ . Kąt dopełniający do  $90^\circ$  jest oznaczany powszechnie literą  $\delta$ , a wartość  $\text{tg}\delta$ , proporcjonalna do strat mocy czynnej, jakie występują w rzeczywistym kondensatorze jest jedną z miar jakości kondensatora [15, 25, 34, 60].



**Rys. 2.12.** Schemat zastępczy kondensatora o pojemności  $C$ , rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$ , rezystancji szeregowej  $R_S$  i indukcyjności pasożytniczej  $L_S$ ;  $I_R$ ,  $I_C$  – składowa rezystancyjna i pojemnościowa prądu płynącego przez kondensator

Rezystancja szeregową  $R_S$ , jest sumą niezerowej rezystancji wyprowadzeń kontaktów kondensatora, rezystancji metalicznych czół, rezystancji między metalizacją czół

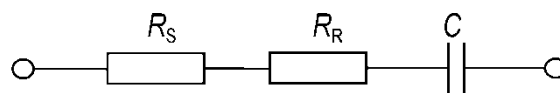


a metalizacją folii oraz rezystancji metalizacji folii. Ponieważ cały prąd płynący przez kondensator przepływa przez tę rezystancję, to jej istnienie jest powodem wydzielania się ciepła w tym obszarze i przyczyną powstawania uszkodzeń.

Indukcyjność  $L_s$  zależy od konstrukcji wyprowadzeń kontaktów oraz sposobu zwinięcia folii. Obecnie czoła folii metalizuje się tak, że wpływ zwojów folii na indukcyjność  $L_s$  można pominąć. Także indukcyjność wyprowadzeń kontaktów jest zwykle do pominięcia dla zakresu częstotliwości akustycznych, dla których dokonuje się pomiarów jakości kondensatorów foliowych.

Wartości rezystancji  $R_s$  i  $R_{izol}$  są istotne przy ocenie jakości kondensatorów, ponieważ określają straty energii wydzielanej w jego elementach metalowych oraz w zastosowanym dielektryku. Wartości tych parametrów zależą od wielu czynników, takich jak temperatura czy napięcie, przy którym pracuje kondensator. Ponadto, ulegają one zmianom w trakcie starzenia się kondensatora, głównie ze względu na degradację właściwości dielektryka pod wpływem wydzielania się ciepła w jego objętości podczas eksploatacji. Wartości tych rezystancji są powiązane z wartością  $tg\delta$ .

Pomiar  $tg\delta$  przeprowadza się mostkami pomiarowymi. Niestety, za pomocą prostych metod pomiarowych nie ma możliwości wyznaczenia wartości każdego z elementów wyróżnionych na schemacie zastępczym (rys. 2.12). Stosując szeregowy schemat zastępczy kondensatora (rys. 2.13) można wyznaczyć na podstawie odpowiednich pomiarów wartość  $tg\delta$  oraz wartość szeregowego połączenia rezystancji  $R_s + R_R$ .



**Rys. 2.13.** Szeregowy schemat zastępczy kondensatora

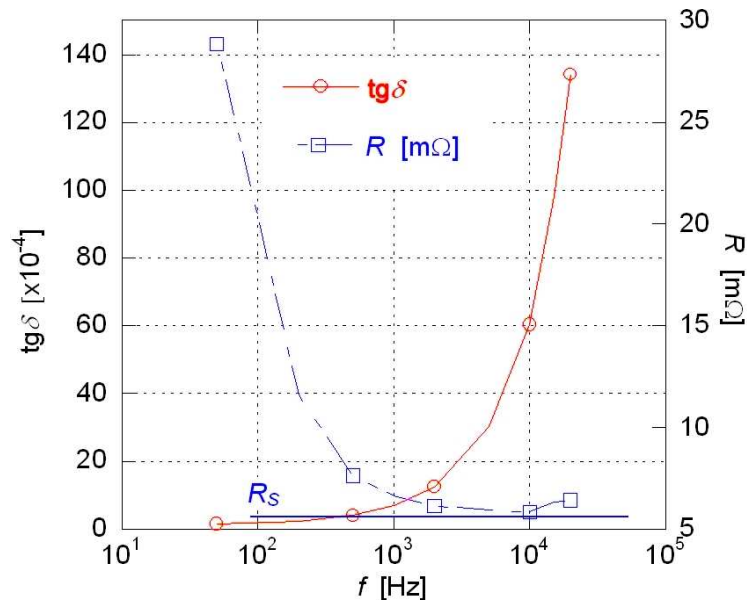
Rezystancja  $R_R$  jest częścią rzeczywistą impedancji powstałej z równoległego połączenia pojemności  $C$  i rezystancji izolacji  $R_{izol}$ . Wartość  $tg\delta$  rośnie w funkcji częstotliwości pomiarowej  $f$  zgodnie zależnością [33, 34]:

$$tg\delta = 2\pi f \cdot C \cdot R, \quad (2.5)$$

gdzie:

$$R = R_s + R_R = R_s + \frac{R_{izol}}{1 + 4\pi^2 f^2 \cdot (R_{izol} C)^2}. \quad (2.6)$$

Rezystancja  $R$  jest nazywana zastępczą rezystancją szeregową (ang. Equivalent Series Resistance – ESR). Wartości rezystancji  $R_s$  można wyznaczyć dla danego kondensatora przeprowadzając pomiary  $R$  w funkcji częstotliwości [15]. Wartość graniczna  $R$ , obserwowana dla względnie dużych częstotliwości jest równa w przybliżeniu wartości  $R_s$  kondensatora (rys. 2.14) [34, 35].



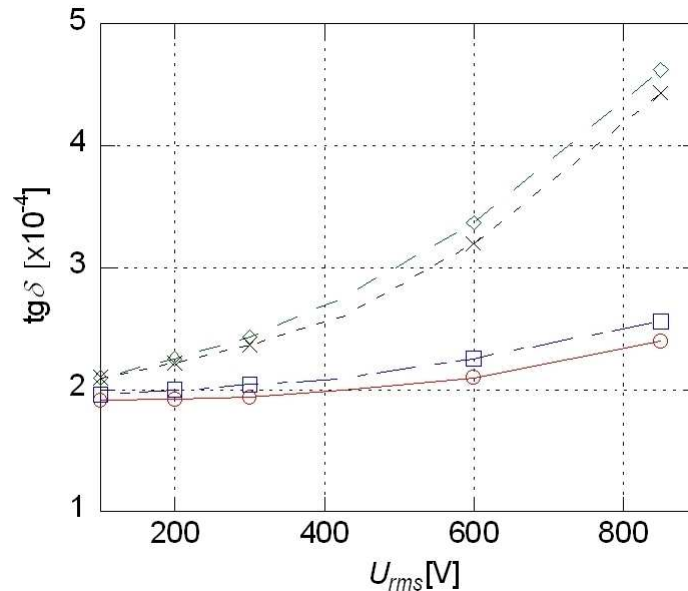
**Rys. 2.14.** Przebiegi wartości  $\text{tg } \delta$  i  $R$  w funkcji częstotliwości  $f$  dla kondensatora foliowego o pojemności  $7,5 \mu\text{F}$  mierzone przy napięciu polaryzacji  $1 \text{ V}_{\text{rms}}$  [25]

W trakcie wytwarzania kondensatorów zastosowany dielektryk może ulec lokalnym uszkodzeniom. Ponadto, folia posiada mikroskopijne nieciągłości struktury w postaci wtrącin gazowych lub materiałów stałych. W tych obszarach, po przyłożeniu napięcia, ze względu na lokalnie duży gradient pola elektrycznego mogą zachodzić zjawiska wyładowań niezupełnych, powodujące jego lokalne przegrzewanie się. Stąd, właściwości izolacyjne dielektryka ulegają z czasem w tych obszarach pogorszeniu, aż do ich całkowitej utraty i nawet zniszczenia kondensatora. Podany mechanizm występuje także w układach izolacyjnych innych urządzeń elektrycznych [38, 88].

Analiza przebiegu  $\text{tg } \delta$  w funkcji napięcia polaryzacji umożliwia wykrycie wad dielektryka. W przypadku dielektryków o niskiej jakości obserwuje się szybszy wzrost  $\text{tg } \delta$  w funkcji napięcia polaryzującego, niż dla materiałów o wysokiej jakości (rys. 2.15).

Gdy wzrost wartości  $\text{tg } \delta$  ze zwiększaniem napięcia polaryzacji jest nieznaczny, to w dielektryku nie występują wyładowania niezupełne lub są bardzo słabe. Po przekroczeniu pewnej wartości napięcia polaryzacji,  $\text{tg } \delta$  zaczyna rosnać, co może oznaczać, że

w dielektryku zaczyna wzrastać intensywność wyładowań niezupełnych. W praktyce trudno jest określić poziom napięcia polaryzacji, po przekroczeniu którego następuje istotny wzrost intensywności wyładowań niezupełnych. Pomiar  $\text{tg}\delta$  w funkcji napięcia wykonuje się w zakresie napięć stanowiących krotność wartości napięcia znamionowego kondensatora, np.  $(0,2 \div 2)U_N$ .



**Rys. 2.15.** Przebiegi wartości  $\text{tg}\delta$  w funkcji wartości skutecznej napięcia polaryzacji  $U_{\text{rms}}$  o częstotliwości 50 Hz dla kondensatorów foliowych o pojemności  $7,5 \mu\text{F}$

Pomiary wymienionych parametrów kondensatorów wykonuje się obecnie za pomocą cyfrowych mostków pomiarowych. Uniwersalne mostki do pomiaru impedancji dwójników pozwalają na pomiar szeregu parametrów (np.: pojemność  $C$ , indukcyjność  $L$ , wartości współczynnika strat  $\text{tg}\delta$ , dobroci  $Q$ ) przy różnych napięciach oraz częstotliwościach sygnału polaryzującego.

Istnieje wiele metod pomiarów pojemności:

- metoda bezpośrednia za pomocą mierników pojemności,
- metoda mostkowa,
- metoda rezonansowa,
- metoda techniczna przez pomiar napięcia, prądu i częstotliwości [12, 15, 33, 34, 85, 92].

W pomiarach produkcyjnych stosuje się najczęściej metodę mostkową realizowaną przez standardowy przyrząd (rys. 2.16). Zasadę pomiaru stosowaną w niektórych mostkach pomiarowych ilustruje rysunek 2.17. Impedancję  $Z$  wyznacza się na podstawie pomiarów dwóch napięć ( $U_1$ ,  $U_2$  – rys. 2.17) na szeregowym połączeniu  $Z$  z rezystancją wzorcową

mostka  $R_{sw}$ . Bardziej dokładne wyniki, eliminujące wpływ przewodów pomiarowych, uzyskuje się realizując pomiary za pomocą czterech przewodów pomiarowych (rys. 2.18). Taki układ eliminuje błąd powodowany spadkami napięć na tych przewodach.

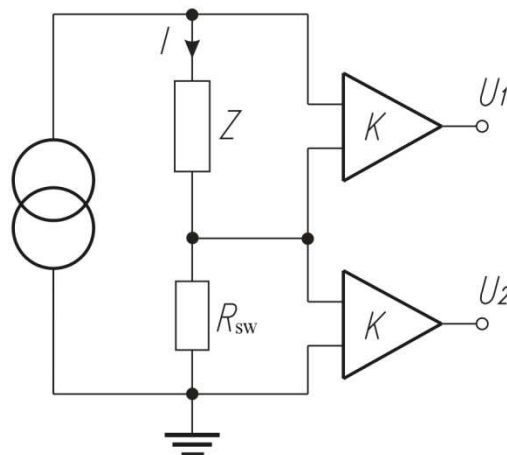
a)



b)



**Rys. 2.16.** Przyrządy do pomiarów pojemności  $C$  i wartości  $\text{tg}\delta$ : a) mostek transformatorowy firmy Tettex typ 2805 [92], b) mostek cyfrowy firmy Tettex typ 2816 [92]



$$Z = R_{sw} \cdot \frac{U_1}{U_2}$$

**Rys. 2.17.** Ilustracja zasady pomiarów mostkiem pomiarowym:  $K$  – wzmacniacz,  $U_1$ ,  $U_2$  – napięcia wyjściowe wzmacniaczy pomiarowych,  $Z$  – badana impedancja (kondensator),  $R_{sw}$  – szeregowy rezystor wzorcowy,  $I$  – prąd płynący w obwodzie pomiarowym

### Rezystancja izolacji $R_{izol}$

W dielektryku, w wyniku polaryzacji stałym napięciem  $U$ , obserwuje się przepływ niewielkiego prądu upływu  $I_u$  nazywanego prądem przewodnictwa skrośnego. Iloraz tych wielkości wyznacza wartość rezystancji izolacji  $R_{izol}$  dielektryka. Jej wartość jest bardzo duża i w kondensatorze foliowym wynosi nawet tysiące  $\text{G}\Omega$ . W kondensatorach o małych pojemnościach rezystancja izolacji zależy głównie od pola powierzchni okładzin, temperatury, napięcia i czasu jego polaryzacji. Wartości  $I_u$  w tych kondensatorach są małe

w porównaniu z prądami upływu płynącymi po powierzchni lub obrzeżach kondensatora. Dla tych kondensatorów rezystancja izolacji jest wyrażana zależnością [33, 34, 39]:

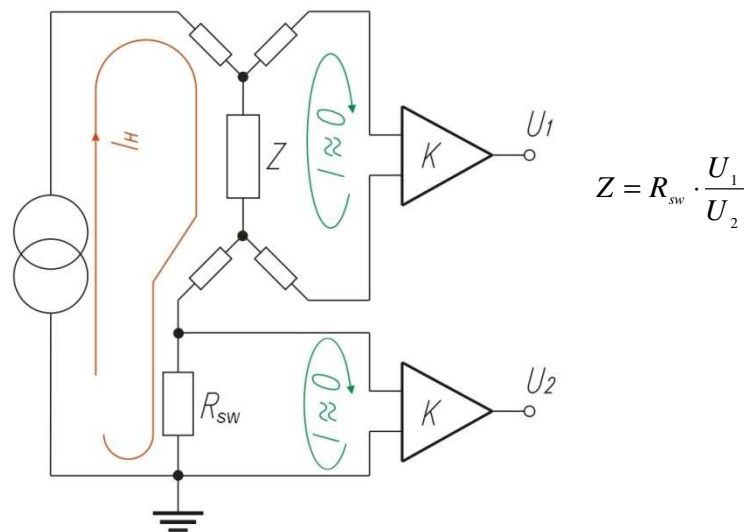
$$R_{izol} = \rho_v \cdot \frac{d}{S} \quad (2.7)$$

gdzie:

$\rho_v$  – rezystancja właściwa dielektryka [ $\Omega\text{cm}^2/\text{cm}$ ],

$d$  – grubość dielektryka [cm],

$S$  – pole powierzchni okładzin [ $\text{cm}^2$ ].



**Rys. 2.18.** Ilustracja zasady pomiarów w układzie czterech przewodów pomiarowych:  $K$  – wzmacniacz,  $U_1$ ,  $U_2$  – napięcia wyjściowe wzmacniaczy pomiarowych,  $Z$  – badana impedancja (kondensator),  $R_{sw}$  – szeregowy rezystor wzorcowy,  $I_H$  – prąd źródła,  $I$  – prąd w układzie wejściowym wzmacniacza

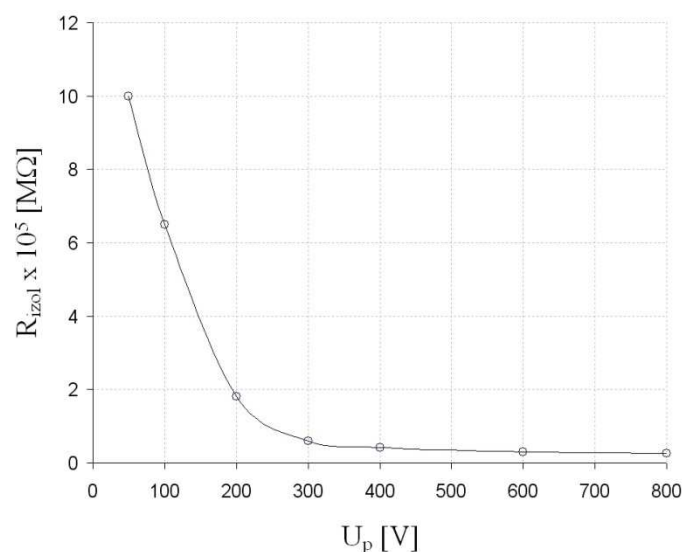
W kondensatorach o większych pojemnościach oprócz  $R_{izol}$  wyznacza się stałą czasową kondensatora  $\tau_c$ , której wartość nie zależy od jego wymiarów, a tylko od właściwości dielektryka [34, 39]:

$$\tau_c = R_{izol} \cdot C \quad (2.8)$$

Wartość stałej czasowej  $\tau_c$  jest równa przedziałowi czasu, podczas którego napięcie na kondensatorze, na skutek jego samorozładowania, zmniejszy się do około 36,8% wartości początkowej. Kondensator oprócz rezystancji izolacji  $R_{izol}$  między swoimi końcówkami jest charakteryzowany rezystancją izolacji między wyprowadzeniami a obudową. Jej wartość ma ogromne znaczenie ze względów bezpieczeństwa, ponieważ spadek tej wartości grozi porażeniem prądem.

Pomiary rezystancji izolacji  $R_{izol}$  wykonuje się megaomierzami, których zakres pomiarowy wynosi nawet  $10^9$  M $\Omega$ . Pomiaru dokonuje się przy napięciu stałym, a poziom napięcia zależy od potrzeb lub warunków narzuconych przez normy. Pomiar jest wykonywany przy napięciu stałym, a odczyt dokonuje się po pewnym czasie, po którym następuje ustalenie się wartości prądu [52, 53].

Zależność rezystancji izolacji  $R_{izol}$  od napięcia  $U_p$  (rys. 2.19) umożliwia określenie jakości dielektryka. Zależność ta nie jest liniowa. Dla małych napięć najistotniejszy wpływ na wartość  $R_{izol}$  ma rezystancja skrośna dielektryka. Przy większych napięciach na wartość  $R_{izol}$  wpływa prąd upływu na powierzchni dielektryka (w obrębie marginesów folii).



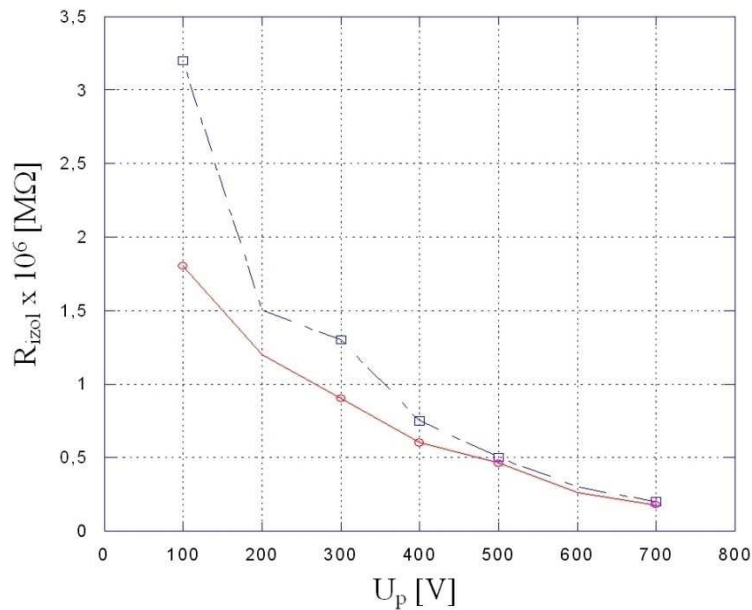
**Rys. 2.19.** Zależność rezystancji izolacji  $R_{izol}$  od napięcia pomiarowego dla kondensatora o pojemności 7,5  $\mu$ F

Zmiany nachyleń charakterystyki między poszczególnymi napięciami (punktami pomiarowymi) świadczą o zmianach zachodzących w dielektryku (występowaniu wyładowań niezupełnych i/lub samoregeneracji). W przypadku kondensatorów o względnie małej pojemności, przy odpowiednio dużych napięciach polaryzacji wartość  $R_{izol}$  jest zdominowana przez prąd upływu na powierzchni dielektryka i słabo zależy od jego rezystancji skrośnej (rys. 2.20).

### Wytrzymałość elektryczna, napięcie przebicia

Zdolność kondensatora do polaryzacji, bez przebicia, określonym napięciem doprowadzonym do jego końcówek lub między zwarte końcówki a obudowę, określana jest jako wytrzymałość elektryczna. Maksymalna wartość tego napięcia zależy od grubości, pola powierzchni i jakości dielektryka zastosowanego w kondensatorze, jak również od sposobu

nawinięcia folii, temperatury dielektryka, ciśnienia, wilgotności, a także od częstotliwości napięcia doprowadzonego do zacisków kondensatora.



**Rys. 2.20.** Zależność rezystancja izolacji  $R_{izol}$  w funkcji napięcia pomiarowego  $U_p$  dla dwóch egzemplarzy kondensatorów 470 nF/275 V~

W trakcie produkcji przeprowadza się próby wytrzymałości elektrycznej, zarówno na zwijkach, jak i na gotowych kondensatorach. W jednym z badań wyznacza się wartość napięcia przebicia kondensatorów. Inna próba dotyczy testu wytrzymałości elektrycznej podczas przyłożenia napięcia probierczego do kondensatora przez określony czas (typowo 60 s). Przykładowo, dla danego typu kondensatorów foliowych stosuje się podczas tej próby napięcie dwukrotnie większe od napięcia znamionowego. Próba narażenia na podwyższone napięcie jest wymagana przez normy, dotyczące produkowanych kondensatorów [50, 51], jak i całych urządzeń w których będą stosowane [49].

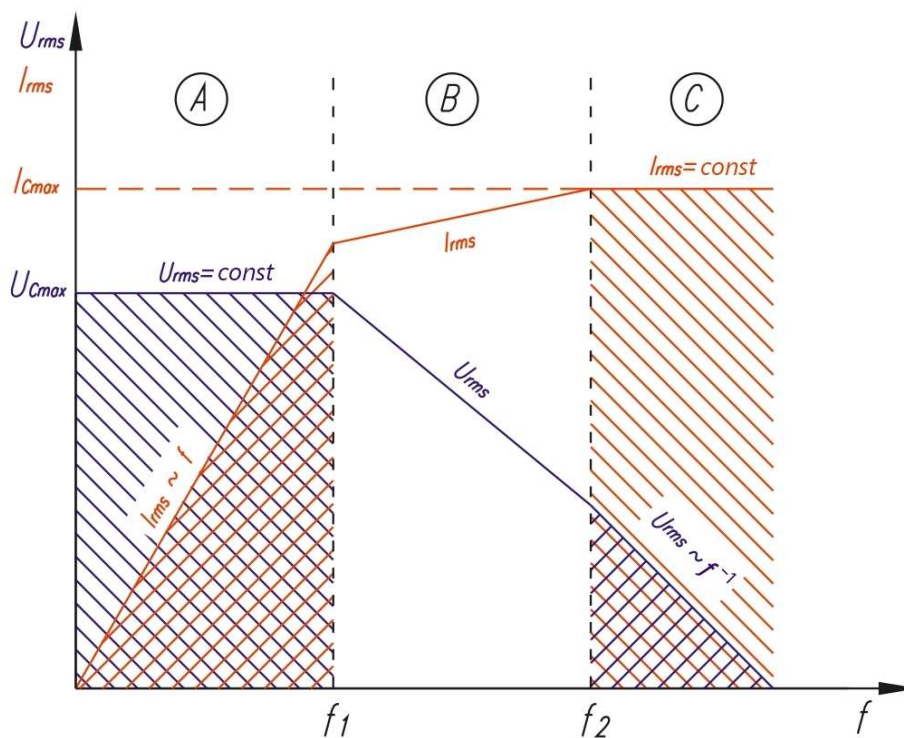
Ze względu na założenie niezawodnej pracy kondensatora, podczas opracowania jego konstrukcji zakłada się, że napięcie pracy kondensatora będzie około 10-krotnie mniejsze od napięcia przebicia  $U_p$ , a napięcie podczas próby wytrzymałości elektrycznej 2÷3 razy większe od napięcia znamionowego  $U_N$ . Należy pamiętać, że próby wytrzymałości elektrycznej nie należy powtarzać, ponieważ każda taka próba powoduje częściową degradację dielektryka. Po tej próbie kondensator należy rozładować przez odpowiednio dobraną rezystancję w celu uniknięcia przepływu dużych prądów rozładowujących.

Napięcie znamionowe kondensatora  $U_N$  jest ustalane na etapie konstrukcji przez wybór rodzaju oraz grubości dielektryka. Napięcie to nie powinno powodować wyładowań niezupełnych w dielektryku, a jego długotrwałe występowanie nie powinno powodować jego

degradacji. W celu potwierdzenia prawidłowego ustalenia wartości tego napięcia przeprowadzane są badania starzeniowe.

### Graniczne warunki pracy kondensatora i jego równowaga termiczna

Dla kondensatorów foliowych można wyznaczyć charakterystyki obciążeń granicznych ze względu na wydzielanie się ciepła, które zależą od wartości przepływającego prądu i częstotliwości sygnału polaryzującego kondensator (rys. 2.21).



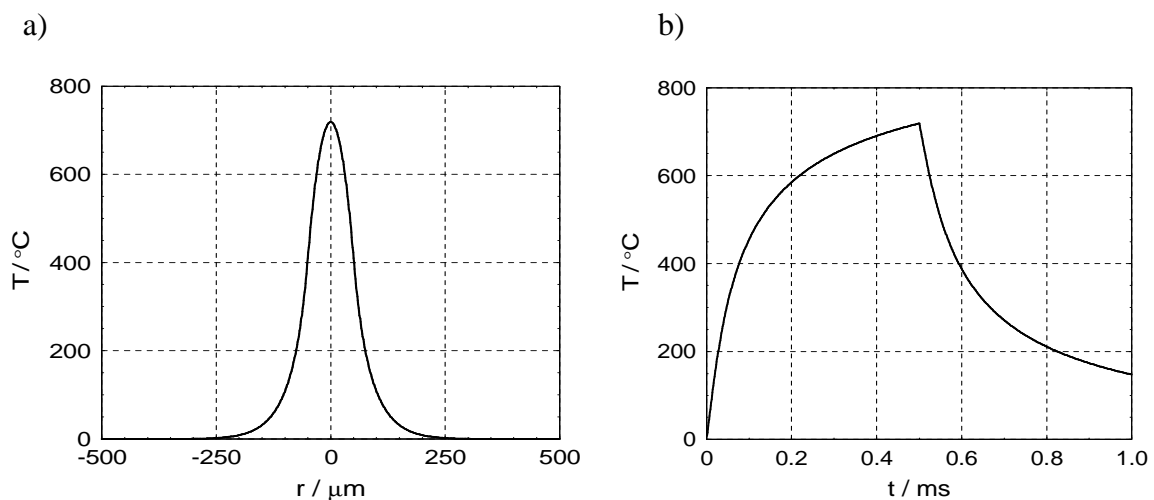
**Rys. 2.21.** Dopuszczalne obciążenia napięciowe i prądowe kondensatora w funkcji częstotliwości

Polaryzacja rzeczywistego kondensatora powoduje przepływ prądu elektrycznego, który skutkuje wydzielaniem się ciepła. Konstrukcja kondensatora powinna spełniać warunek równowagi cieplnej. Ilość ciepła wytwarzanego w kondensatorze powinna być mniejsza od ilości ciepła jaką kondensator może oddać do otoczenia w tym samym czasie. Bilans cieplny nie powinien powodować wzrostu temperatury kondensatora powyżej ustalonej wartości. W celu spełnienia tego warunku określa się graniczne dopuszczalne wartości napięcia i prądu dla danego typu kondensatora. Maksymalne napięcie, którym można polaryzować kondensator w sposób ciągły, jest określone jako napięcie znamionowe  $U_N = U_{Cmax}$  o dopuszczalnej częstotliwości  $f_1$  (obszar A na rys. 2.21). Prąd kondensatora jest w tym obszarze wprost proporcjonalny do napięcia polaryzacji i jego częstotliwości. Wartość prądu



nie może przekroczyć dopuszczalnej wartości granicznej, aby przy jego przepływie ilość ciepła wydzielana w kondensatorze była mniejsza od ilości ciepła jakie może być w nim rozproszone. Zwiększanie częstotliwości napięcia polaryzującego kondensator powyżej wartości  $f_1$  wymusza konieczność zmniejszania wartości tego napięcia w celu utrzymania równowagi cieplnej kondensatora (obszar B na rys. 2.21). Przy częstotliwościach napięcia polaryzującego kondensator większych od  $f_2$  (obszar C na rys. 2.21) płynie przez niego prąd  $I_{\text{rms}} = I_{C_{\text{max}}}$  odpowiadający granicznej wartości prądu nie powodując jeszcze uszkodzenia kontaktów między metalizacją folii a metalicznymi czołami zwijki. Wartość napięcia polaryzującego kondensator powinna być zmniejszona w stosunku do napięcia znamionowego  $U_N$  o współczynnik odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości. Spełnienie tego warunku oznacza utrzymanie równowagi termicznej w kondensatorze.

Wydzielanie się ciepła w kondensatorze jest spowodowane kilkoma zjawiskami. Jednym z nich jest przepływ prądu elektrycznego w przewodnikach elektrycznych o niezerowej rezystancji, którymi są głównie metalizacja folii oraz kontakty między metalizacją folii a metalizacją czoła [48]. Dodatkowo, w kondensatorze foliowym źródłem ciepła są straty dielektryczne, wyładowania niezupełne i zjawiska samoregeneracji powstające w objętości dielektryka oraz na krawędziach folii, które powodują występowanie lokalnych wzrostów temperatury (rys. 2.22) [67, 74, 79].



**Rys. 2.22.** Wyniki symulacji zjawiska samoregeneracji w kondensatorze tantalowym: a) rozkład temperatury podczas samoregeneracji, b) zmiany temperatury w czasie trwania samoregeneracji oraz bezpośrednio po jej zakończeniu;  $r$  – odległość od miejsca samoregeneracji [74]

Temperatura ta jest najwyższa w miejscu przebicia dielektryka i bardzo szybko maleje w miarę oddalania się od miejsca uszkodzenia. Zmiany temperatury w tym miejscu zachodzą bardzo szybko; wysoka temperatura, powyżej 600°C w obszarze samoregeneracji utrzymuje

się około 0,1 ms. Tak wysoka temperatura jest przyczyną degradacji dielektryka oraz powoduje lokalne wyparowanie metalizacji folii. Pole powierzchni obszaru, w którym wyparowuje metalizacja (obszar samoregeneracji) zależy od intensywności wcześniej występujących tam wyładowań niezupełnych (determinujących ilość wydzielanego ciepła) oraz przewodności cieplnej dielektryka i energii potrzebnej na wyparowanie metalu (grubości i materiału warstwy metalizacji).

Rozpraszanie ciepła w kondensatorze zależy od wielu czynników, głównie od rodzaju materiałów użytych do jego budowy oraz warunków pracy [47]. Rozpraszanie ciepła w kondensatorze następuje głównie wskutek przewodnictwa cieplnego. Do analizy rozkładu temperatur w obiekcie można stosować równanie przewodnictwa cieplnego [74]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \nabla^2 T + \frac{w}{\rho c}, \quad (2.9)$$

gdzie:

$\lambda$  – współczynnik przewodnictwa cieplnego [W/mK],

$\rho$  – gęstość [kg/m<sup>3</sup>],

$c$  – ciepło właściwe [J/kgK],

$T$  – temperatura [K],

$w$  – gęstość mocy wynikająca ze zgromadzonego ładunku oraz czasu trwania wyładowania [W/m<sup>3</sup>].

Rozwiązanie analityczne równania (2.9) jest złożone. Ponadto, w kondensatorze można wyróżnić warstwy materiałów o różnych współczynnikach przewodnictwa cieplnego  $\lambda$ , co znacznie komplikuje rozwiązania analityczne. W praktyce stosuje się numeryczne rozwiązania tego zagadnienia.

Materiały o małym współczynniku przewodnictwa cieplnego stosowane w kondensatorach powodują słabe rozpraszanie ciepła do otoczenia wokół obszaru wyładowania niezupełnego lub samoregeneracji (np. dla folii polipropylenowej, współczynnik przewodnictwa cieplnego wynosi  $\lambda = 0,35$  W/mK, a dla aluminium  $\lambda = 200$  W/mK). Dodatkowo, szczeliny powietrzne, jakie występują po jednej stronie metalizacji folii przy czole zwijki, utrudniają swobodny przepływ ciepła od miejsca jego wystąpienia do otoczenia (dla powietrza  $\lambda = 0,0308$  W/mK w temperaturze +20°C). Oznacza to, że wyładowania i samoregeneracje w tym obszarze będą powodowały rozległe ubytki metalizacji folii prowadząc do szybkiej utraty pojemności przez kondensator. Jednym ze sposobów poprawiania warunków wymiany ciepła zwijki folii z otoczeniem w obszarze czół zwijki jest zastosowanie impregnatów wypełniających pustki powietrzne, których wartość współczynnika przewodnictwa cieplnego jest większa od wartości współczynnika dla

powietrza. Popularny impregnat, jakim jest olej rycynowy, posiada współczynnik przewodnictwa cieplnego o wartości  $\lambda \approx 0,124 \text{ W/mK}$ , czyli zdecydowanie większej niż dla powietrza. Niestety, taka operacja technologiczna oznacza dodatkowe koszty.

### Parametry dynamiczne kondensatorów

Wartość chwilowa prądu  $i(t)$  płynącego przez kondensator o pojemności  $C$  jest proporcjonalna do pochodnej napięcia po czasie:

$$i(t) = C \cdot \frac{du}{dt} \quad (2.10)$$

Każdy kondensator charakteryzuje się odpornością na przepływ impulsów prądowych. Zgodnie z zależnością (2.10), większej wartości  $du/dt$  odpowiada wzrost prądu płynącego przez kondensator. Wartość graniczna  $du/dt$  jest wartością katalogową, której nie należy przekraczać ze względu na możliwość uszkodzenia kondensatora. Odporność kondensatora na impulsy prądowe jest funkcją energii cieplnej generowanej podczas impulsu. Szkodliwe oddziaływanie tej energii uwidacznia się głównie w obszarze kontaktów między metalizacją folii a warstwą metalizacji czoła zwijki. Energię cieplną wydzielaną w kondensatorze podczas impulsu o czasie trwania  $T$  określa zależność:

$$E_c = \int_0^T i(t)^2 R_s dt = \int_0^T C^2 \left( \frac{du}{dt} \right)^2 R_s dt . \quad (2.11)$$

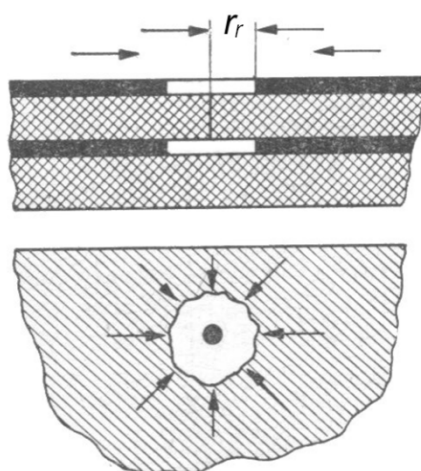
Stąd, przekroczenie wartości  $du/dt$  oznacza wydzielenie nadmiernej energii  $E_c$ , prowadzącej do uszkodzenia kondensatora.

### Zdolność samoregeneracji kondensatorów

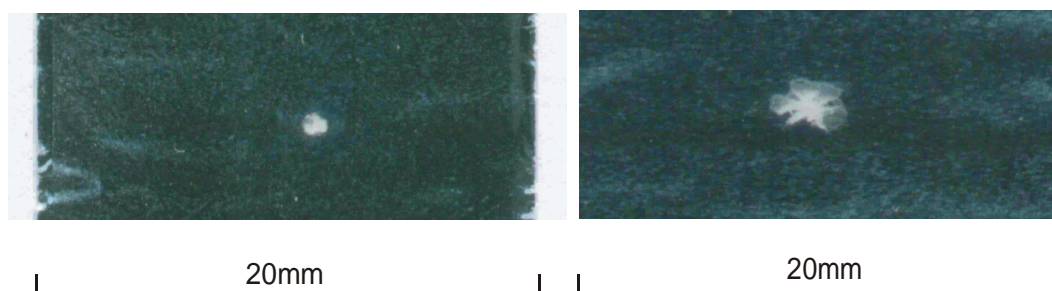
Kondensatory wykonane z folii metalizowanej charakteryzują się zdolnością samoregeneracji – zjawiskiem samoistnego eliminowania lokalnych zwarć między okładzinami metalizowanego dielektryka przez odparowanie metalu wokół miejsca zwarcia pod wpływem przepływu prądu.

Zjawisko to występuje, gdy warstwa metalizacji jest odpowiednio cienka. W trakcie przebicia dielektryka występuje lokalne zwarcie i rozpoczyna się gwałtowny przepływ prądu. Wydzielane ciepło powoduje odparowanie cienkiej warstwy metalu. Lokalnie tworzy się zanikający łuk elektryczny, który powoduje wyparowanie metalu na pewnym obszarze oraz lokalną degradację dielektryka tworząc wokół miejsca przebicia nieprzewodzącą warstwę.

Miejsce, gdzie wystąpiło lokalne zwarcie, zostaje odizolowane. Typowy obszar takiej samoregeneracji ma promień  $r_r$  około  $0,5 \div 1$  mm (rys. 2.23, rys. 2.24). Opisane zjawisko nie trwa dłużej niż  $10^{-5} \div 10^{-4}$  s. Napięcie na zaciskach kondensatora, w którym nastąpiło przebicie, nieznacznie spada. Czas trwania samoregeneracji zależy od grubości warstwy metalizacji, jej jednorodności i rodzaju metalu napyłonego na folię. Właściwość samoregeneracji jest bardzo użyteczna, ponieważ słabe miejsca dielektryka zostają odizolowane bez powodowania przerw pracy kondensatora. Zjawisko to powoduje jednak stały (choć powolny) spadek rezystancji izolacji ze względu na degradację struktury dielektryka oraz prowadzi do spadku pojemności w wyniku zmniejszania się powierzchni okładzin.



**Rys. 2.23.** Ilustracja zjawiska samoregeneracji na obszarze o promieniu  $r_r$



**Rys. 2.24.** Fragmenty folii z widocznymi miejscami przebiec samoregeneracyjnych

Wpływ zjawiska samoregeneracji na zmiany parametrów kondensatorów zależy w znacznym stopniu od grubości i rodzaju metalu użytego do metalizacji folii. Cieńsze warstwy metalizacji łatwiej się regenerują, ponieważ przebieg samoregeneracji jest bardziej stabilny. Oznacza to, że dla takiego samego obszaru zwarcia potrzeba mniejszej ilości energii powodującej odparowanie metalu, co powoduje mniejsze przegrzewanie się miejsca

regeneracji oraz krótszy czas całego procesu. Dla grubszych warstw regeneracja jest utrudniona ze względu na większą ilość metalu, który musi wyparować. Oznacza to wyższe temperatury w tym obszarze oraz dłuższe czasy tego zjawiska, co prowadzi do powstania znacznie większych uszkodzeń, a nawet całkowitego zniszczenia kondensatora.

Powszechnie stosuje się do metalizacji dwa metale: cynk i aluminium lub ich stopy. Cynk ma niższą temperaturę topnienia ( $419,5^{\circ}\text{C}$ ), co jest korzystne, ponieważ mniej nagrzewa się obszar samoregeneracji. Niestety, jest mniej odporny na oddziaływanie wilgoci, co jest istotną wadą. W porównaniu z aluminium ma również niższą przewodność właściwą ( $16,6 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ ), co powoduje występowanie większych strat cieplnych w kondensatorze. Natomiast aluminium ma znacznie wyższą temperaturę topnienia ( $660,3^{\circ}\text{C}$ ), co stwarza zagrożenie trwałego przebiccia i uszkodzenia kondensatora podczas zjawiska samoregeneracji. Aluminium charakteryzuje się dużo korzystniejszą odpornością na wilgoć i lepszą przewodnością właściwą ( $37,7 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ ), zmniejszającą straty ciepłe w kondensatorze. Wybór rodzaju metalu oraz grubości jego warstwy zależy od przeznaczenia kondensatorów oraz wyników badań eksperymentalnych podczas ich przyspieszonego starzenia w trakcie próby trwałości.

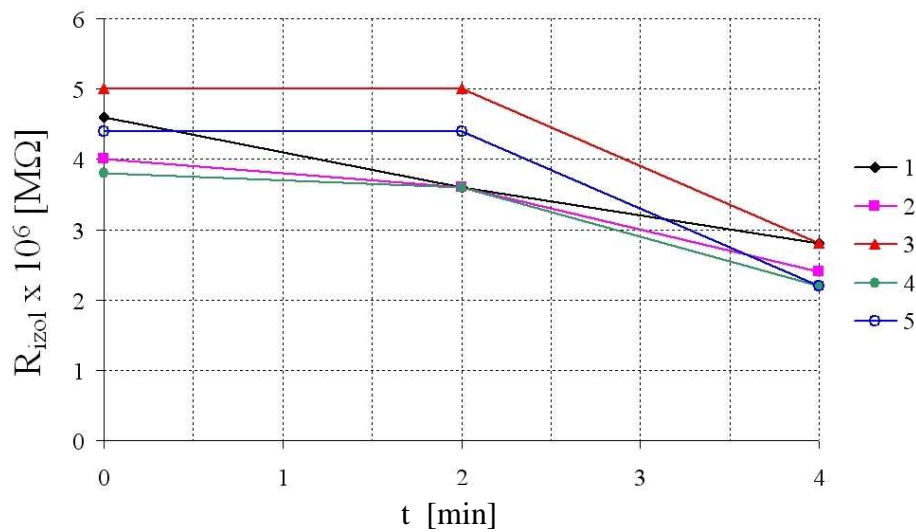
Zjawisko samoregeneracji wpływa istotnie na parametry kondensatorów foliowych. Na rys. 2.25 przedstawiono zmiany rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  oraz względne zmiany pojemności  $\Delta C/C$  w trakcie próby obciążenia pięciu przykładowych kondensatorów o pojemności 27 nF klasy Y2 napięciem  $1500 \text{ V}_{\text{rms}}$  przez 4 minuty. Podczas próby zliczano impulsy towarzyszące samoregeneracjom, mierzono pojemność kondensatorów oraz ich rezystancję izolacji.

Istnieje związek między utratą pojemności a liczbą samoregeneracji. Dla badanych próbek oszacowano po rozwinięciu folii liczbę samoregeneracji oraz łączne pole powierzchni folii pozbawionej metalizacji. Wartość tego pola jest proporcjonalna do względnej utraty pojemności badanych kondensatorów, gdy nie występują inne wady związane z jakością kontaktów na czołach zwijki (tab. 2.3).

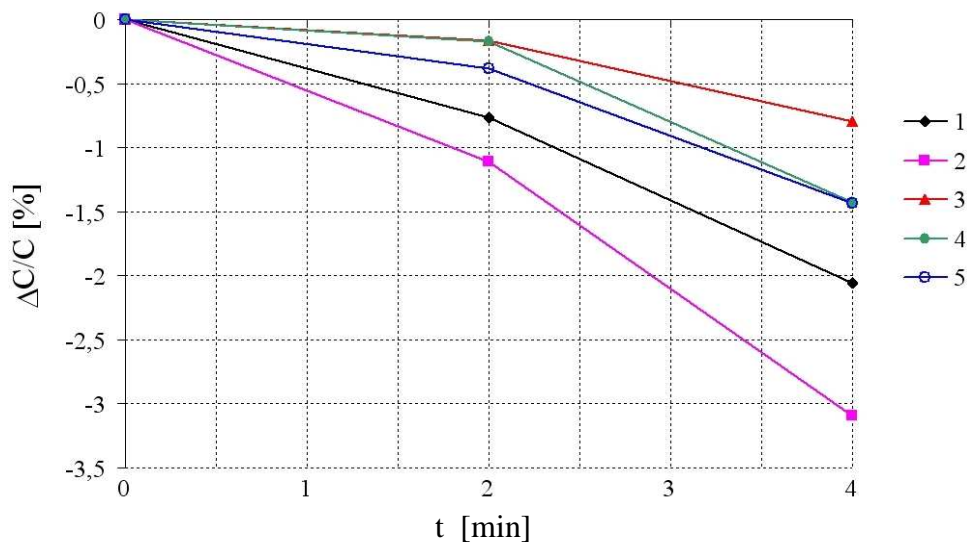
### **Wpływ warunków technoklimatycznych na parametry kondensatorów**

Parametry kondensatorów zależą od warunków technoklimatycznych, w których są składowane lub pracują. Zmiany parametrów przy zmianie warunków otoczenia nie powinny być zbyt duże, aby nie miały wpływu na funkcjonalność kondensatorów.

a)



b)



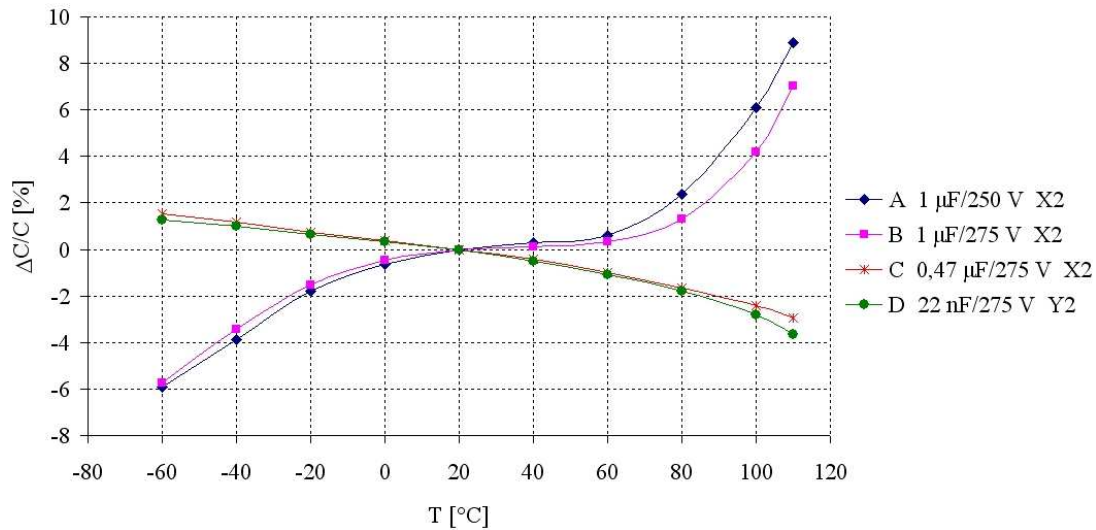
**Rys. 2.25.** Zmiany wybranych parametrów badanych pięciu kondensatorów 22 nF klasy Y2 w czasie  $t$  próby napięciowej: a) rezystancji izolacji  $R_{izol}$ , b) pojemności  $\Delta C/C$

**Tab. 2.3.** Związek między polem powierzchni  $\Delta S$  pozbawionej metalizacji podczas samoregeneracji, a zmianą pojemności  $\Delta C/C$  w badanych kondensatorach 22 nF klasy Y2;  $S$  – pole powierzchni okładziny kondensatora

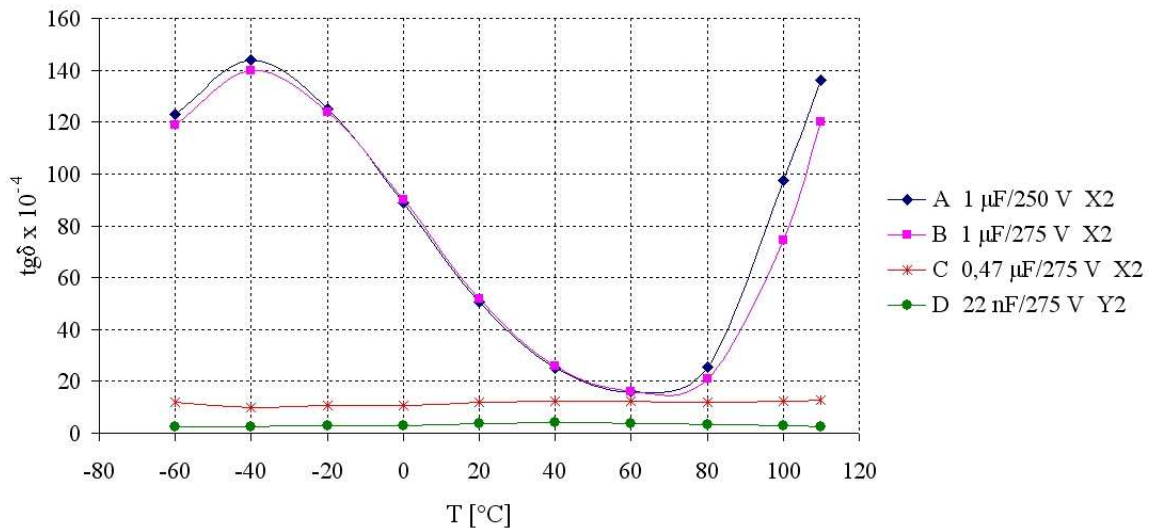
| Lp. | Liczba samoregeneracji | $\Delta S/S$ [%] | $\Delta C/C$ [%] |
|-----|------------------------|------------------|------------------|
| 1   | 57                     | -2,0             | -2,46            |
| 2   | 103                    | -3,2             | -3,80            |
| 3   | 15                     | -0,8             | -0,59            |
| 4   | 37                     | -1,4             | -1,12            |
| 5   | 46                     | -1,4             | -1,24            |

Najbardziej istotnymi czynnikami, wpływającymi na parametry kondensatorów, są temperatura i wilgotność. Zmiany temperatury otoczenia prowadzą do zmian właściwości fizycznych dielektryka. Wpływ wilgotności na kondensator jest ograniczony przez jego hermetyzację. Wpływ temperatury na podstawowe parametry kondensatorów przedstawiono na rys. 2.26.

a)



b)



**Rys. 2.26.** Zmiany wybranych parametrów kondensatorów w funkcji temperatury: a) względnej zmiany pojemności  $\Delta C/C$  w odniesieniu do wartości w temperaturze  $+20^{\circ}\text{C}$ , b) wartości  $\text{tg}\delta$ ; A, B – kondensatory z folii poliestrowej; C, D – kondensatory z folii polipropylenowej

Kondensatory z folii poliestrowej wykazują znacznie większe zmiany pojemności  $C$  i współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  w funkcji temperatury niż w przypadku kondensatorów wykonanych z folii polipropylenowej. Kondensatory wykonane z folii

polipropylenowej wykazują ujemny współczynnik zmian pojemności w funkcji temperatury. W tych kondensatorach ze wzrostem temperatury pojemność maleje. Kondensatory wykonane z folii poliestrowych mają dodatni współczynnik zmian pojemności w funkcji temperatury, co oznacza że ze wzrostem temperatury rośnie ich pojemność.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że polipropylen stosowany w badanych kondensatorach powoduje że parametry kondensatorów są bardziej stabilne przy zmianach temperatury niż w przypadku poliestru.

## **2.5. Podsumowanie**

W bieżącym rozdziale przedstawiono szczegóły dotyczące konstrukcji oraz metod wytwarzania kondensatorów foliowych, których ocena jakości jest tematem pracy. Opisano właściwości stosowanych dielektryków oraz poszczególne etapy wytwarzania kondensatorów, od procesu zwijania folii i jej kształtowania w wysokiej temperaturze przez napyłanie warstw metalizacji na czołach zwijki, a następnie dołączanie wyprowadzeń, umieszczanie w obudowie i hermetyzację. Przedstawiono schemat zastępczy kondensatora oraz opisano metody pomiarów najistotniejszych parametrów charakteryzujących wytwarzane elementy. Szczególną uwagę zwrócono na zagadnienia wydzielania się energii w kondensatorze podczas jego polaryzacji oraz skutki lokalnego wzrostu temperatury w trakcie zjawisk samoregeneracji, prowadzących do lokalnego odparowania metalizacji folii.



### 3. Produkcyjne metody testowania jakości kondensatorów foliowych

---

#### 3.1. Pomiary materiałów kwalifikowanych do produkcji

Wszystkie materiały do produkcji kondensatorów foliowych muszą spełniać określone wymagania jakościowe i powinny posiadać wymagane atesty i certyfikaty jakości producentów. Niestety, zdarzają się przypadki wadliwych partii materiałów i dlatego, w celu zapewnienia dobrej jakości kondensatorów, konieczna jest kontrola ich parametrów.

Podstawowym materiałem używanym do produkcji kondensatorów metalizowanych jest dielektryk wykonany w formie folii dielektrycznej metalizowanej. Każda partia takiej folii dostarczanej przez producenta podlega ocenie, zgodnie z wewnętrznymi procedurami wytwórcy kondensatorów. Sprawdzeniu podlegają:

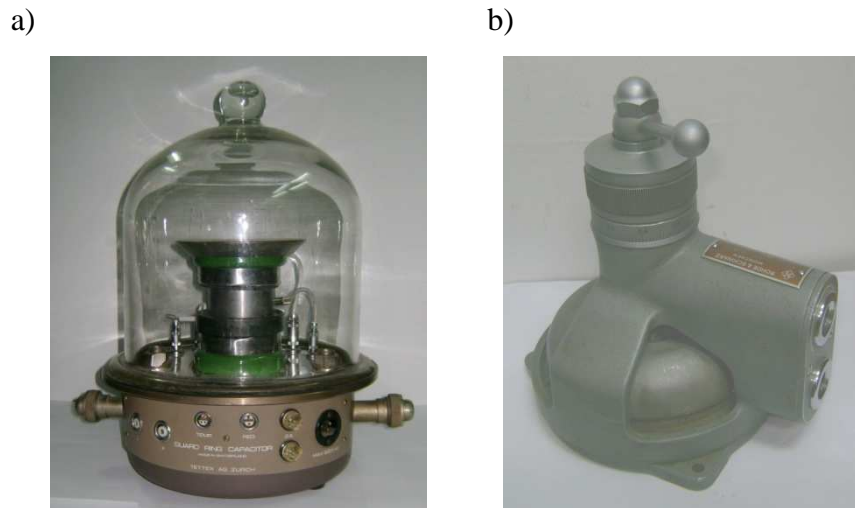
- rezystancja metalizacji i jej równomierność oraz przyczepność,
- wytrzymałość elektryczna,
- wymiary geometryczne,
- poprawność pakowania.

W przypadku wystąpienia wątpliwości co do jakości folii, wykonuje się bardziej szczegółowe badania, takie jak [25]:

- rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  w określonej temperaturze,
- liczby przebiegów regeneracyjnych na jednostkę powierzchni,
- współczynnika względnej przenikalności dielektrycznej  $\epsilon$ ,
- współczynnika rozszerzalności cieplnej,
- współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  w funkcji temperatury.

Wykonując pomiary w funkcji napięcia i temperatury można uzyskać informację, czy jakość danej partii folii ma odpowiednie parametry, deklarowane przez producenta. Niezbędne pomiary można przeprowadzić korzystając z urządzenia do badania dielektryków stałych, np. firmy Tettex lub Rohde & Schwarz (rys. 3.1). Pozostałe stosowane materiały,

---



**Rys. 3.1.** Urządzenia do badania właściwości dielektryków stałych firm: a) Tettex , b) Rohde & Schwarz

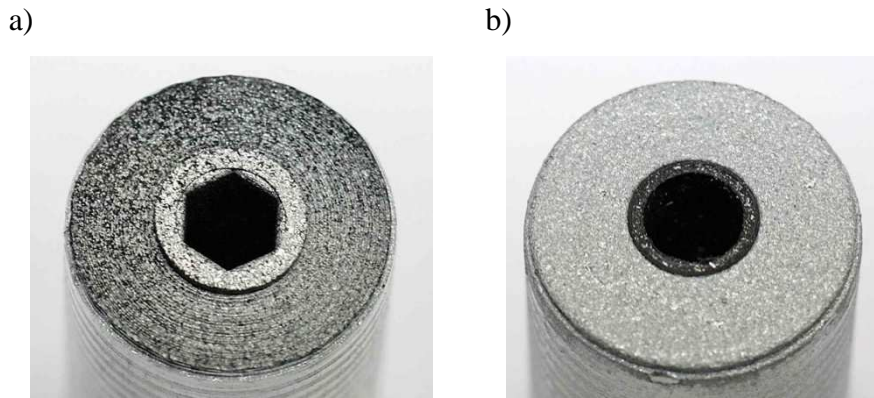
takie jak drut do napyłania metalizacji kontaktów, masy hermetyzujące, tworzywa sztuczne, cyna do lutowania, podlegają kontroli głównie przez sprawdzenie parametrów według wymagań i danych katalogowych producentów.

### 3.2. Pomiary w procesie produkcyjnym

Uzyskanie odpowiednich parametrów kondensatorów wymusza prowadzenie szeregu pomiarów i prób w trakcie ich produkcji. Podczas nawijania zwijek sprawdza się ustawienia automatycznej nawijarki oraz wymiary geometryczne zwijek. Kontroluje się pojemność nawiniętej zwijki celem potwierdzenia prawidłowości wszystkich ustawień.

Podczas metalizacji czoł, przed rozpoczęciem tego procesu, przeprowadza się próbną natrysk metalu na specjalnie przygotowane podłoże w celu określenia grubości uzyskiwanej warstwy, jej równomierności i ziarnistości oraz oceny oddziaływania tej operacji na powierzchnię podłoża (uniknięcia ewentualnego przegrzania). Ta operacja jest bardzo ważna i decyduje często o jakości kondensatora (rys. 3.2). Niestety, nawet dla poprawnie wyglądających czoł zwijek mogą zdarzyć się takie, których połączenie z warstwą metalizacji folii jest częściowo nieprawidłowe na skutek np. lokalnego przegrzania.

Podczas wytwarzania kondensatorów należy zapewnić uzyskanie właściwości izolacyjnych dielektryka przez regenerację miejsc o zbyt małej rezystancji izolacji (powstałych np. w wyniku metalicznych wtrąceń). Ten efekt uzyskuje się przez oddziaływanie na zwijkę napięciem o odpowiednio dużej wartości i określonym przebiegu czasowym.



**Rys. 3.2.** Widok warstwy metalizacji kontaktu na czole zwijki wykonanej: a) nieprawidłowo, b) poprawnie

Po operacji regeneracji przeprowadza się pomiary pojemności  $C$  i współczynnika strat  $\text{tg}\delta$ . Pomiar obejmuje wszystkie wyprodukowane zwijki. Przy założeniu wartości granicznych przeprowadza się wstępną selekcję i do dalszych operacji przechodzą tylko zwijki o parametrach spełniających ustalone warunki.

Wszystkie wykonane kondensatory są badane pod względem wytrzymałości elektrycznej przy podwyższonym napięciu, ustalonym w zależności od typu kondensatora (wg. norm EN 60252-1 [50], EN 60384-14 [51]). Próbę przeprowadza się w warunkach produkcyjnych najczęściej przez czas 2 s. W przypadku wad dielektryka, kondensator ulega zniszczeniu lub znacznemu obniżeniu właściwości izolacyjnych. Po wykonaniu tej próby ponownie przeprowadza się pomiary pojemności  $C$  i współczynnika strat  $\text{tg}\delta$  dokonując ostatecznej selekcji wyrobów.

Badanie wytrzymałości elektrycznej przeprowadza się między zwartymi wyprowadzeniami kondensatora a jego obudową. Ten pomiar odbywa się zwykle przy wyższym napięciu, niż stosowane między wyprowadzeniami kondensatora.

Następnie, zgodnie z określonymi przez normy przemysłowe procedurami, pobiera się z wykonanych kondensatorów statystycznie reprezentatywne próby do badań inspekcyjnych, wykonując jeszcze bardziej szczegółowe pomiary ( $C$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $R_s$ ,  $R_{\text{izol}}$ , wytrzymałości elektrycznej).

Wyprodukowane kondensatory, mimo wielokrotnej kontroli, ulegają często w trakcie eksploatacji uszkodzeniu. Uszkodzenia powstają w wyniku nadmiernego obciążenia podczas pracy, ze względu na: zawartość wyższych harmonicznych napięcia polaryzującego (prądu), zakłócenia impulsowe lub ujawnienie się wad produkcyjnych, których nie udało się zidentyfikować podczas przeprowadzanych kontroli. Stąd celowym jest proponowanie nowych, bardziej precyzyjnych metod oceny jakości kondensatorów. Ta uwaga jest

szczególnie istotna ze względu na stosowanie materiałów od producentów z różnych rejonów świata, przy konieczności zachowania wysokiej jakości wyrobu końcowego.

### **3.3. Podsumowanie**

W rozdziale, krytycznie oceniono stosowane obecnie metody testowania jakości kondensatorów podczas ich wytwarzania. Zwrócono uwagę na konieczność pomiarów parametrów charakteryzujących materiały stosowane do produkcji, które ze względów ekonomicznych pochodzą często od bardzo różnych producentów. Te materiały, mimo wymogu posiadania odpowiednich certyfikatów, świadczących o ich odpowiedniej jakości, mogą nie spełniać wymaganych parametrów. Ponadto, ocena jakości stosowanych materiałów, przed zastosowaniem w kondensatorze nie zawsze jest wystarczająca, ponieważ defekty materiałów (folii dielektryka) mogą się ujawniać dopiero w trakcie wytwarzania kondensatorów (np. podczas termicznego kształtowania zwijki). Istnieje więc potrzeba szybkiego testowania jakości wyprodukowanych kondensatorów w celu oceny ich czasu życia.

Wymieniono metody oceny jakości gotowych kondensatorów uwzględniają pomiary, którym podlegają wszystkie produkowane kondensatory oraz statystycznie reprezentatywna próba. Podkreślono, że mimo stosowanych procedur kontrolnych, ze względu na warunki pracy (polaryzacji), część kondensatorów ulega uszkodzeniu podczas eksploatacji.

## 4. Charakterystyka badań laboratoryjnych według norm przemysłowych

---

Kondensatory jako elementy urządzeń elektrycznych muszą posiadać odpowiednie parametry, stosowne do ich typu oraz zastosowania. Zgodność parametrów deklarowanych przez producenta sprawdza się według zasad obowiązujących w normach gwarantujących odpowiedni poziom jakości wyrobów końcowych [51, 52]. W tym rozdziale opisano badania przewidziane dla kondensatorów przeciwzakłóceńowych oraz stosowanych w silnikach, jako kondensatory rozruchowe lub do pracy ciągłej (wytworzenie przesunięcia fazowego w jednym z uzwojeń).

Dla kondensatorów przeciwzakłóceńowych podczas badań jakościowych stosuje się normę PN-EN 60384-14 pt: *Kondensatory stałe stosowane w urządzeniach elektronicznych. Część 14: Kondensatory stałe do tłumienia zakłóceń elektromagnetycznych podłączone do przewodów zasilających* [51].

Wymagania dla kondensatorów silnikowych są zawarte w normie PN-EN 60252-1 pt: *Kondensatory silnikowe prądu przemiennego. Część 1: Wymagania ogólne. Właściwości, badania i wartości znamionowe. Wymagania dotyczące bezpieczeństwa. Wytyczne dotyczące instalowania i użytkowania* [52].

### 4.1. Badania kondensatorów przeciwzakłóceńowych

#### 4.1.1. Ogólna charakterystyka badań

Kondensatory przeciwzakłóceńowe służą do tłumienia zakłóceń elektrycznych [23]. Jeżeli są stosowane w sprzęcie domowym, to podlegają badaniom zgodnym z normą PN-EN 60384-14 [51]. Badania te są podzielone na odrębne grupy (tab. 4.1). Są to badania kontrolne.

---

**Tab. 4.1.** Badania kondensatorów przeciwzakłóceńowych określone normą PN-EN 60384-14 [51]

| Nr grupy | Nazwa badania   |
|----------|---|
| 0        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- oględziny, wymiary (ogólne)</li> <li>- pojemność</li> <li>- rezystancja (jeżeli dotyczy)</li> <li>- tg<math>\delta</math></li> <li>- próba napięciowa</li> <li>- <math>R_{izol}</math></li> </ul>  |
| 1        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- wymiary (szczegółowe)</li> <li>- wytrzymałość końcówek</li> <li>- wytrzymałość na ciepło lutowania</li> <li>- wytrzymałość podzespołu na działanie rozpuszczalnika</li> <li>- lutowność</li> <li>- wytrzymałość oznakowania na działanie rozpuszczalnika</li> <li>- szybkie zmiany temperatury</li> <li>- normalny szereg klimatyczny</li> </ul> |
| 2        | - odporność na ustaloną wilgotność i temperaturę  |
| 3        | <ul style="list-style-type: none"> <li>- napięcie impulsowe</li> <li>- trwałość</li> </ul>  |
| 4        | - ładowanie-rozładowanie  |
| 5        | - właściwości w zakresie częstotliwości radiowych   |
| 6        | - badanie zapalności biernej  |
| 7        | - badanie zapalności czynnej  |

Kolejność wykonywania badań oraz liczba kondensatorów podlegających badaniom są podane w normie. Wszystkie te badania mają na celu sprawdzenie właściwości danego typu kondensatorów oraz ocenę czy gotowy wyrób można uznać za spełniający wymagania normy. Badania nakładają jedynie na producenta minimalne wymagania co do jakości kondensatorów, aby można było uznać produkowaną partię za spełniającą wymagania normy. W przypadku potrzeby wytworzenia kondensatorów o podwyższonej jakości nie ma jednoznacznych zaleceń dotyczących badań ich jakości.

Wymagania zawarte w normie odnoszą się do kondensatorów klasy X oraz Y. Kondensatory klasy X są elementami, których uszkodzenie nie spowoduje niebezpieczeństwa porażenia prądem elektrycznym. Są one włączane równolegle do przewodów zasilających urządzenie, nie bocznikując izolacji podstawowej czy dodatkowej. Natomiast kondensatory klasy Y są elementami, w których uszkodzenie może spowodować niebezpieczeństwo porażenia prądem elektrycznym. Te elementy bocznikują izolację podstawową i dodatkową.

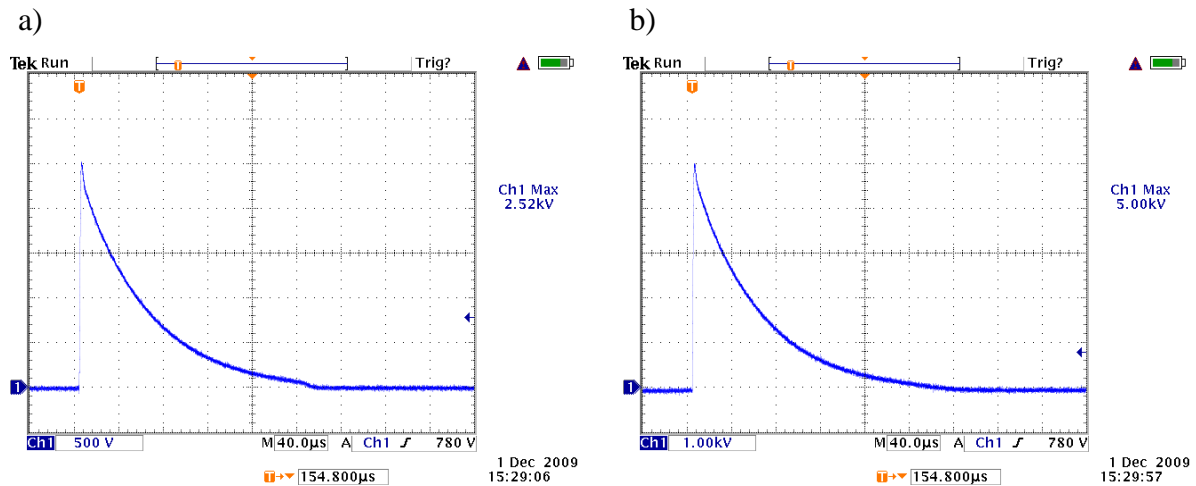
Jedną z najistotniejszych cech jakie musi spełniać dany typ kondensatora jest jego wysoka trwałość przy określonych narażeniach napięciowo-prądowych. Dlatego za najważniejsze badania dla tych kondensatorów można uznać badania z grupy 0, 3, 4, według tab. 4.1.

#### 4.1.2. Badania odporności na narażenie impulsem napięciowym

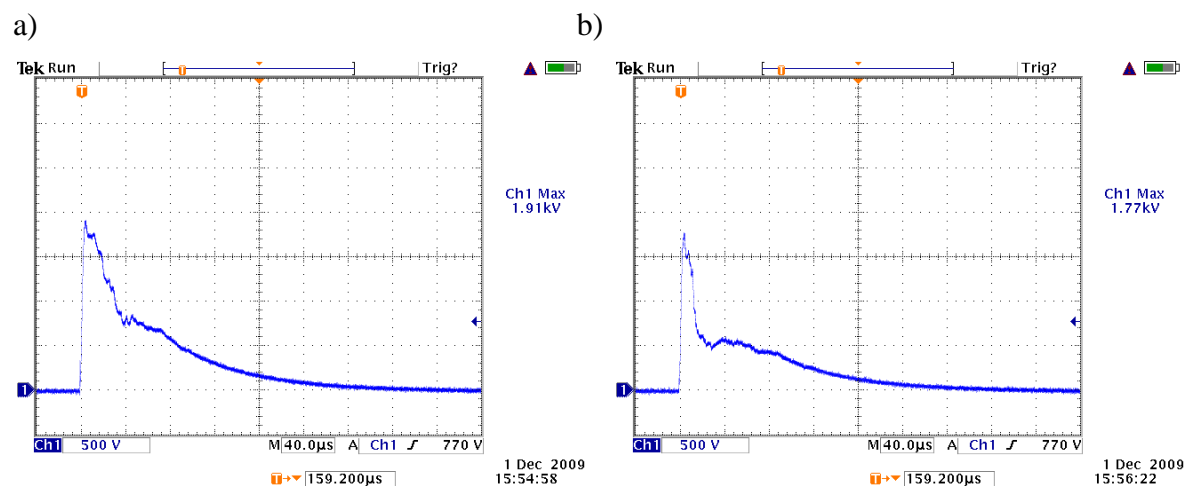
Badanie kondensatorów napięciem impulsowym symuluje występowanie impulsów zakłócających, które pojawiają się podczas normalnej pracy kondensatorów w wyniku np. wyładowań atmosferycznych lub w wyniku przełączeń urządzeń znajdujących się w otoczeniu kondensatora. Impuls napięciowy jest zdefiniowany przez czas narastania  $t_r = 1,2 \mu s$  i czas zanikania (czas do półszczytu)  $t_d = 50 \mu s$  oraz wartość szczytową napięcia  $U_i$  [51]. Wartość szczytowa napięcia zależy od klasy kondensatora (tab. 4.2) [51]. Opisane impulsy są wytwarzane w generatorze o parametrach według normy EN 60384-14 przytoczonych w załączniku do normy. Badanie impulsem napięciowym polega na poddaniu kondensatora działaniu 24 impulsów o tej samej polaryzacji, w odstępach czasu nie krótszych niż 10 s. Wymagane jest, aby w trakcie badania nie wystąpiło trwałe przebicie lub przeskok iskry. Jeżeli kształt trzech kolejnych impulsów jest zgodny z oczekiwanym (rys. 4.1), to uznaje się, że kondensator jest wykonany zgodnie z wymaganiami. Jeżeli mniej niż trzy impulsy podczas serii 24 impulsów mają kształt istotnie różny od wymaganego (rys. 4.2), to kondensator uznaje się za nie spełniający wymagań.

**Tab. 4.2.** Wartości szczytowe napięć udarowych podczas badań poszczególnych klas kondensatorów [51]

| Klasa kondensatora | Wartość szczytowa napięcia impulsowego $U_i$                      |
|--------------------|---|
| X1                 | 4 kV dla $C \leq 1 \mu F$   |
|                    | $\frac{4}{\sqrt{\frac{C [F]}{10^{-6} F}}} kV$ dla $C > 1 \mu F$   |
| X2                 | 2,5 kV dla $C \leq 1 \mu F$                                       |
|                    | $\frac{2,5}{\sqrt{\frac{C [F]}{10^{-6} F}}} kV$ dla $C > 1 \mu F$ |
| Y2                 | 5 kV  |



**Rys. 4.1.** Oscylogramy przebiegów impulsów napięciowych 1,2/50 μs o kształcie zgodnym z wymaganiami norm: a) dla kondensatora klasy X2 o amplitudzie 2,5 kV, b) dla kondensatora klasy Y2 o amplitudzie 5 kV



**Rys. 4.2.** Oscylogramy przebiegów impulsów napięciowych 1,2/50 μs o kształcie niezgodnym z wymaganiami norm, wskazującym na wady kondensatora: a) widoczny w początkowej fazie nieregularny charakter rozładowania powodowany przebicciem w dielektryku, b) przebieg rozładowania gdy nastąpiło pęknięcie obudowy kondensatora

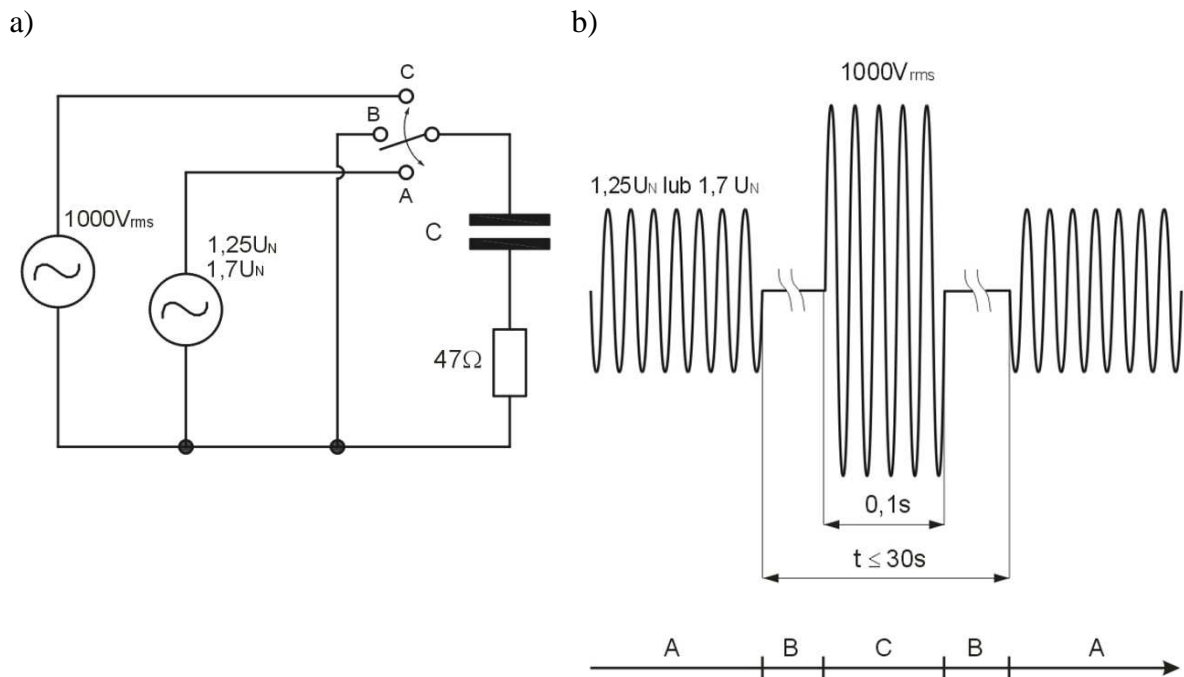
Zmiana kształtu impulsu jest spowodowana przebiciami dielektryka w kondensatorze na skutek wad jego struktury lub wad powodowanych lokalnymi naprężeniami mechanicznymi (obecność pęcherzy gazów lub obcych cząstek między zwojami folii).

#### 4.1.3. Opis próby trwałości

Bezpośrednio po badaniu napięciem impulsowym należy dla kondensatorów przeprowadzić próbę trwałości. Zgodnie z normą PN-EN 60384-14 próbę trwałości przeprowadza się umieszczając kondensatory w komorze termicznej, w górnej temperaturze kategorii klimatycznej, doprowadzając odpowiednie napięcie w czasie trwania próby przez



1000 h. Podczas próby do kondensatorów klasy X2 doprowadza się napięcie  $1,25U_N$ , a do kondensatorów klasy Y2  $1,7U_N$ . Ponadto, raz na godzinę przez okres 0,1 s napięcie polaryzujące jest zwiększane do wartości  $1000 V_{rms}$ . Każde z tych napięć doprowadza się do kondensatora przez rezystor  $47 \Omega$ . Układ polaryzujący (rys. 4.3a) powinien zapewniać brak przepięć i przetężeń wynikających z występowania stanów nieustalonych podczas przełączeń napięcia. Można to uzyskać rozładowując kondensator tuż przed i po wystąpieniu impulsu  $1000 V_{rms}$ . Czas trwania całego cyklu wraz z rozładowaniem nie powinien przekraczać 30 s (rys. 4.3b).



**Rys. 4.3.** Sposób polaryzacji kondensatorów podczas próby trwałości: a) schemat układu polaryzującego, b) przebieg napięcia polaryzującego;  $U_N$  – napięcie znamionowe kondensatora

Kryterium oceny wyniku próby trwałości dla kondensatorów metalizowanych klasy X2 i Y2 jest zmiana wartości ich parametrów po próbie w stosunku do wartości parametrów zmierzonych przed próbą. Kondensatory uważa się za sprawne, gdy nie są przekroczone graniczne wartości zmian:

- pojemności  $|\Delta C/C| \leq 10\%$ ,
- zmian współczynnika  $\Delta \text{tg} \delta < 80 \cdot 10^{-4}$ ,
- rezystancji izolacji  $|\Delta R_{i\text{zol}}/R_{i\text{zol}}| \leq 50\%$ .

## 4.2. Badania kondensatorów silnikowych

### 4.2.1. Ogólna charakterystyka badań

Kondensatory silnikowe podlegają badaniom zgodnym z normą PN-EN 60252-1 [50]. Wszystkie wyprodukowane egzemplarze są badane w zakresie:

- próby szczelności,
- próby napięciowej między zaciskami,
- próby napięciowej między zaciskami a obudową,
- oględzin,
- pomiaru pojemności  $C$ ,
- pomiaru współczynnika strat  $\text{tg}\delta$ .

Pozostałymi, najistotniejszymi badaniami dla tego typu kondensatorów są próby trwałości, badanie samoregeneracji i próba niszcząca. Badania te dotyczą tylko statystycznej próby pobranej z bieżącej produkcji.

### 4.2.2. Opis próby trwałości

Kondensatory silnikowe w zależności od przewidywanego czasu życia, posiadają określone klasy pracy, które odpowiadają minimalnej liczbie godzin poprawnej pracy przy obciążeniu znamionowym. Zgodnie z normą każdej z klas odpowiadają ustalone warunki próby trwałości (tab. 4.3) [50].

**Tab. 4.3.** Klasy pracy kondensatorów i ich wybrane parametry dotyczące próby trwałości [50]

| Lp. | Klasa pracy kondensatora | Minimalny czas życia kondensatora [h] | Czas próby [h] | Napięcie podczas próby | Dopuszczalne zmiany pojemności po próbie |
|-----|--------------------------|---------------------------------------|----------------|------------------------|--|
| 1   | klasa A                  | 30000                                 | 6000<br>3000   | $1,25U_N$<br>$1,35U_N$ | $\pm 3\%$                                |
| 2   | klasa B                  | 10000                                 | 2000<br>1000   | $1,25U_N$<br>$1,35U_N$ |  |
| 3   | klasa C                  | 3000                                  | 600            | $1,25U_N$              |  |
| 4   | klasa D                  | 1000                                  | 200            | $1,25U_N$              |  |

Kondensatory silnikowe produkowane są w szerokim zakresie pojemności, od  $0,5 \mu\text{F}$  do  $150 \mu\text{F}$  i napięcia znamionowego  $U_N$  w granicach od 250 V do 500 V. Tak duże zakresy pojemności oraz napięć znamionowych powodują istotne trudności w badaniach tych

kondensatorów, ze względu na duże moce pobierane podczas badań. W celu ograniczenia mocy zasilaczy stosuje się zasilacze rezonansowe, które przy odpowiednim doborze indukcyjności pozwalają skompensować prąd doprowadzany ze źródła do układu LC występującego w zasilaczu.

#### **4.2.3. Opis próby samoregeneracji**

Celem próby samoregeneracji jest sprawdzenie czy zastosowany dielektryk ma odpowiednio dużą zdolność samoregeneracji, czyli zdolność do usuwania ewentualnych zwarc. Do kondensatora dołącza się napięcie przemiennie i zwiększa do wartości wywołującej pięć kolejnych przebiegów samoregeneracyjnych lub do wartości  $3,5 U_N$ . Występowanie przebiega wykrywa się za pomocą oscyloskopu, metodą akustyczną lub przez pomiar składowej napięcia o wysokiej częstotliwości. Próbę uznaje się za zgodną z wymaganiami normy, jeżeli zmiana pojemności po narażeniu jest mniejsza niż 0,5%, a stała czasowa kondensatora  $R_{izol}C$  jest większa niż 100 s.

### **4.3. Podsumowanie**

Przedstawione w rozdziale metody badań kondensatorów przeciwzakłóceniovych i silnikowych po ich wytworzeniu są badaniami kontrolnymi, oceniającymi jakość bieżącej produkcji na podstawie wyników badań reprezentatywnej próby kondensatorów. Opisano sposoby pomiarów, zgodne z obowiązującymi dla poszczególnych klas wyszczególnionych typów kondensatorów. Następnie przybliżono sposób przeprowadzania próby odporności kondensatorów na narażenie impulsem napięciowym. Podano szczegółowe warunki przeprowadzania próby trwałości, stanowiącej długoczasowy test oceniający jakość wytworzonych egzemplarzy, przez pracę w warunkach podwyższonej temperatury oraz nadmiernej polaryzacji, w tym narażeniu impulsami napięcia, co zachodzi podczas rzeczywistych warunków pracy.

## 5. Zjawiska wyładowań niezupełnych w kondensatorach foliowych

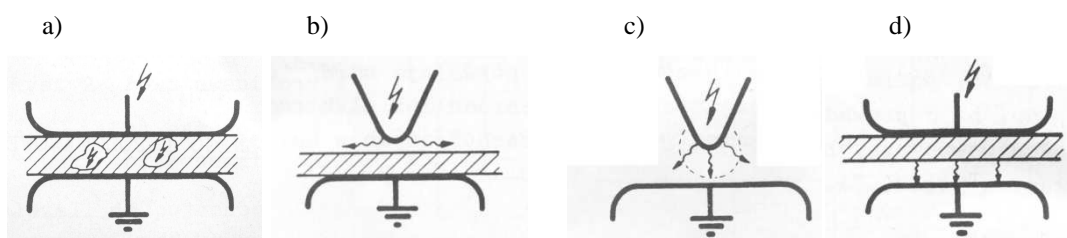
### 5.1. Mechanizmy powstawania wyładowań niezupełnych

Kondensatory foliowe stanowią układ dielektryka, który poddawany jest narażeniom napięciowym podczas eksploatacji. Polaryzacji tej towarzyszy szereg zjawisk zachodzących w dielektryku. Jedną z najistotniejszych grup zjawisk są wyładowania niezupełne, oznaczające lokalne, nieskończone przebicia w objętości dielektryka, w wyniku występowania obszarów o podwyższonym natężeniu pola elektrycznego [55-57, 76, 82, 87].

Wyładowania niezupełne są dużym zagrożeniem dla struktury dielektryka. Krótkotrwałe wyładowania we wnętrzu folii lub na jej powierzchni powodują ciągłą i nieodwracalną degradację dielektryka [88]. Powstają lokalne ogniska, w których występują złożone procesy fizykochemiczne prowadzące po dłuższym okresie nawet do skrośnego przebicia dielektryka.

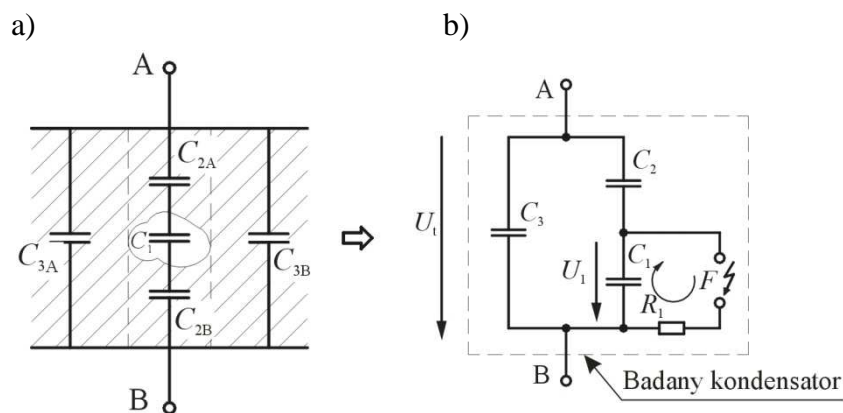
Głównymi rodzajami wyładowań niezupełnych (rys. 5.1) powstających w kondensatorach z folii metalizowanej są [55, 82, 92]:

- wyładowania we wtrącinach gazowych (kawernach),
- wyładowania powierzchniowe (ślizgowe),
- wyładowania świetlne (koronowe),
- wyładowania w materiale warstwowym.



**Rys. 5.1.** Rodzaje wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych: a) we wtrącinie gazowej, b) powierzchniowe, c) świetlne (koronowe), d) w materiale warstwowym [82]

Stosowany dielektryk nie jest pozbawiony wad. Występujące wady mogą mieć różny charakter i znaczenie dla trwałości dielektryka. Jednymi z najbardziej znaczących są wady w budowie wewnętrznej folii, w postaci wtrącin gazowych lub cząstek stałych zmieniających rozkład natężenia pola elektrycznego podczas polaryzacji dielektryka [14, 27, 39]. Procesy technologiczne na etapie wytwarzania zwijki mogą powodować powstawanie defektów (np. pęcherzy powietrza wewnątrz zwojów nawiniętej folii), które są miejscami występowania wyładowań niezupełnych [35]. Procesy samoregeneracji, które usuwają takie miejsca wypalając metalizację w ich otoczeniu, pozostawiają zdegradowane obszary dielektryka, gdzie mogą występować wyładowania powierzchniowe lub koronowe. Na krawędzi metalizacji folii i marginesu mogą powstawać także wyładowania powierzchniowe. Napyłona warstwa metalu wnika między zwoje zwijki może skracać przerwę izolacyjną w obszarze marginesu i może być także źródłem wyładowań koronowych. Oddziaływanie każdego z podanych rodzajów wyładowań niezupełnych może wywołać niekorzystne, identyczne skutki jak wyładowania we wtrącinach gazowych. Mechanizm powstawania wyładowań niezupełnych we wtrącinie gazowej można zobrazować na podstawie schematu zastępczego, przedstawionego na rys. 5.2 [55-58, 82, 88].



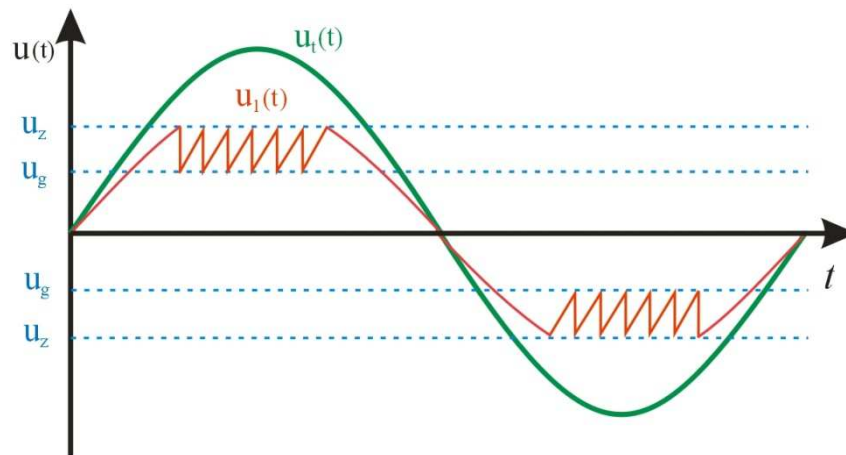
**Rys. 5.2.** Mechanizm powstawania wyładowań niezupełnych we wtrącinie gazowej: a) rzeczywisty układ fragmentu izolacyjnego, b) schemat zastępczy

Wtrącina gazowa ma pewną pojemność  $C_1$ . Symbolem  $C_2$  oznaczono szeregowe połączenie pojemności  $C_{2A}$  i  $C_{2B}$ , które występują między elektrodami kondensatora w obrębie wtrąciny gazowej  $C_1$ . Pojemność  $C_3$  równa sumie pojemności  $C_{3A}$  i  $C_{3B}$  reprezentuje pozostałą część pojemności kondensatora. Wtrąciny gazowe mają bardzo małą pojemność w stosunku do całkowitej pojemności kondensatora testowanego  $C_t$ . Natomiast

mają większą pojemność niż obszar w otoczeniu wtrąciny, ze względu na relatywnie małe wymiary. Stąd zachodzi związek:

$$C_t \approx C_3 \gg C_1 \gg C_2 \quad (5.1)$$

Po przyłożeniu napięcia  $U_t$  między punktami AB nastąpi polaryzacja wszystkich wyróżnionych pojemności. Jeżeli napięcie na pojemności  $C_1$  osiągnie wartość graniczną  $u_z$ , wystarczającą do zwarcia iskiernika  $F$ , to wystąpi wyładowanie niepełne. Napięcie na  $C_1$  zaczyna wówczas maleć i w momencie osiągnięcia wartości  $u_g$  iskiernik  $F$  odzyska zdolności izolacyjne. Wtedy napięcie na pojemności  $C_1$  ponownie wzrośnie i cykl się powtórzy (rys. 5.3). Wyładowanie na iskierniku  $F$  powoduje przepływ prądu  $i_1(t)$  w obwodzie  $C_1 R_1$ . Prąd ten jest miarą intensywności wyładowania niepełnego, ale ponieważ ma charakter lokalny nie ma możliwości pomiaru jego wartości.



**Rys. 5.3.** Przebiegi napięcia podczas wyładowań niepełnych we wtrącinie gazowej;  $u_z$  – napięcie zapłonu,  $u_g$  – napięcie gaśnięcia,  $u_t(t)$  – napięcie na badanym kondensatorze,  $u_1(t)$  – napięcie na wtrącinie gazowej

Rozładowanie kondensatora  $C_1$  z ładunku  $\Delta q_1 = \Delta U_1 \cdot C_1$  powoduje zmianę napięcia na jego zaciskach oraz wywołuje zmianę ładunków zgromadzonych na pojemnościach  $C_2$  i  $C_3$ . Zmiana ta spowoduje przyrost napięcia  $\Delta U_t$  na zaciskach AB badanego kondensatora:

$$\Delta U_t = \frac{C_2}{C_2 + C_3} \Delta U_1 = \frac{C_2}{(C_2 + C_3)C_1} \Delta q_1 \quad (5.2)$$

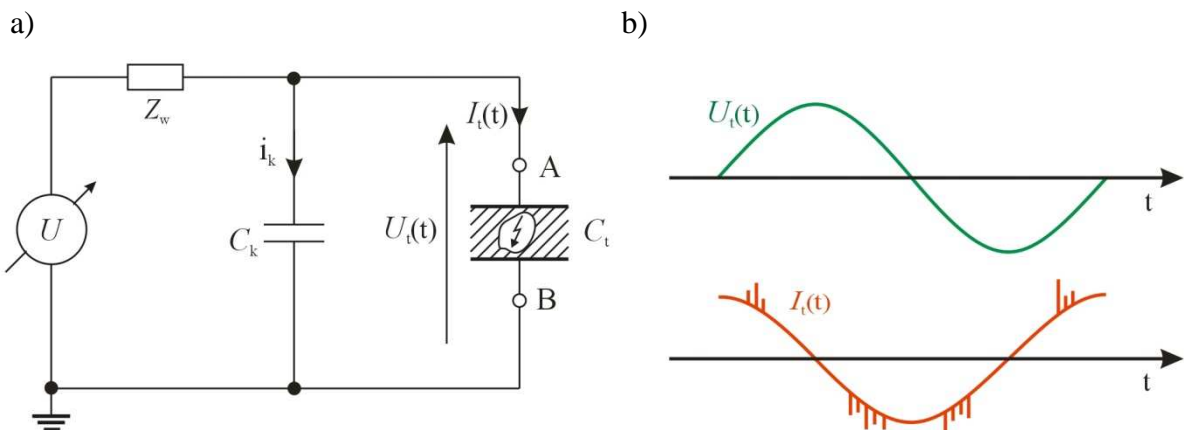
W praktyce wyznaczenie wartości pojemności  $C_1$ ,  $C_2$  i  $C_3$ , a zatem i wartości ładunku  $\Delta q_1$  przepływającego podczas tego procesu, jest nierealizowalne.

## 5.2. Metody charakteryzowania wyładowań niezupełnych

Wyładowania niezupełne 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.

Najbardziej rozpowszechnioną metodą charakteryzowania wyładowań niezupełnych jest pomiar impulsów prądowych w układzie z kondensatorem sprzęgającym (rys. 5.4). Badany kondensator  $C_t$  łączy się równolegle z kondensatorem sprzęgającym  $C_k$ . Taka pojemność jest dołączona do źródła napięcia  $E$  o impedancji wewnętrznej  $Z_w$ . Zmiana napięcia  $\Delta U_t$  spowodowana częściowym rozładowaniem kondensatora  $C_t$  (rys. 5.2) podczas wyładowania niezupełnego jest równoważona zmianą prądu  $\Delta I_t$ , który może być mierzony. Impulsy prądu powodowane wyładowaniami niezupełnymi sumują się z prądem płynącym pod wpływem napięcia polaryzującego kondensator podczas badania i mają charakter przypadkowy. Ich liczba, amplituda i moment wystąpienia zależą od rodzaju i wielkości wad w dielektryku oraz od napięcia polaryzującego dielektryk [36, 41, 56-58].



**Rys. 5.4.** Pomiary wyładowań niezupełnych: a) układu pomiarowy b) przebieg prądu  $I_t(t)$  z widocznymi impulsami podczas występowania wyładowań niezupełnych;  $U$  – źródło napięcia przemiennego,  $Z_w$  – impedancja wewnętrzna źródła napięciowego,  $C_k$  – kondensator sprzęgający,  $C_t$  – kondensator badany

Intensywność mierzonych impulsów prądowych  $I_t(t)$  zależy od stosunku pojemności  $C_k/C_t$ . Dużą czułość układ wykazuje dla  $C_k \gg C_t$ . Wówczas obserwowany przepływ ładunku  $\Delta q$  w kondensatorze  $C_t$  pod wpływem rozładowania  $C_t$  ładunkiem  $\Delta q_1$  (rys. 5.2) wynosi:

$$\Delta q = \left( C_3 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \Delta U_t \quad (5.3)$$

Jeżeli dodatkowo jest spełniony warunek  $C_1 \gg C_2$  to z (5.2) oraz (5.3) uzyskuje się:

$$\Delta q \approx \frac{C_2}{C_1} \Delta q_1 \quad (5.4)$$

Ładunek  $\Delta q$  nazywany jest ładunkiem pozornym wyładowania niezupełnego, ponieważ jest związany z ładunkiem  $\Delta q_1$  przez współczynnik  $C_2/C_1$ . Niestety, warunek  $C_k \gg C_t$  jest często trudny do zrealizowania w praktyce. Duża pojemność  $C_k$  znacząco obciąża źródło napięciowe. Dodatkowo nie mogą w niej występować wyładowanie niepełne dla stosowanych napięć pomiarowych, co wiąże się zwykle z jego wysoką ceną. W praktyce stosuje się często pojemności sprzęgające tylko nieznacznie większe od pojemności badanych kosztem mniejszej czułości układu podczas pomiarów. Ładunek płynący w trakcie wyładowań niezupełnych w badanym kondensatorze  $C_t$  jest kompensowany przepływem ładunku z kondensatora sprzęgającego  $C_k$ . Zmiana ładunku  $\Delta q_m$  kondensatora sprzęgającego  $C_k$  może być mierzona i można ją wyznaczyć z zależności:

$$\Delta q_m = C_k \Delta U_t \quad (5.5)$$

Stąd, w równoległym połączeniu kondensatorów  $C_k$  i  $C_t$  zmiany ładunku podczas wyładowania niezupełnego określa się ze wzoru:

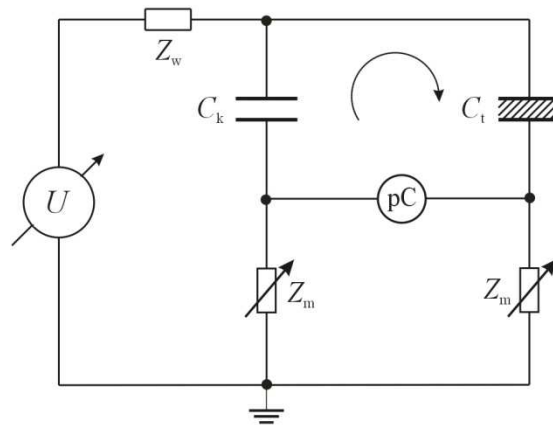
$$\frac{\Delta q_m}{\Delta q} = \frac{C_k}{C_t + C_k} \quad (5.6)$$

Innym sposobem określenia przepływu ładunku podczas wyładowania niezupełnego jest pomiar spadku napięcia na impedancji  $Z_m$ , która jest łączona szeregowo z kondensatorem badanym lub sprzęgającym w zależności od pojemności badanego kondensatora. Taki układ posiada względnie dużą czułość. Niestety, jest mało odporny na zakłócenia. W celu zmniejszenia wpływu zakłóceń stosuje się układy mostkowe (rys. 5.5), co odbywa się również kosztem zmniejszania czułości.

Charakteryzowanie wyładowań niezupełnych za pomocą analizy wyników pomiarów prądu wyrównawczego z kondensatora sprzęgającego pozwala wyznaczyć szereg parametrów statystycznych [1, 16, 17, 42]. Parametry wyładowań niezupełnych można podzielić na trzy podstawowe kategorie:



- parametry impulsów napięciowych, powodowanych wyładowaniami niezupełnymi, nakładających się na przebieg napięcia polaryzującego (napięcie zapłonu, napięcie gaśnięcia, częstość wyładowań niezupełnych),
- rozkład statystyczny wartości ładunków pozornych,
- parametry i funkcje statystyczne wyładowań niezupełnych w zależności od fazy i biegunowości napięcia polaryzującego.



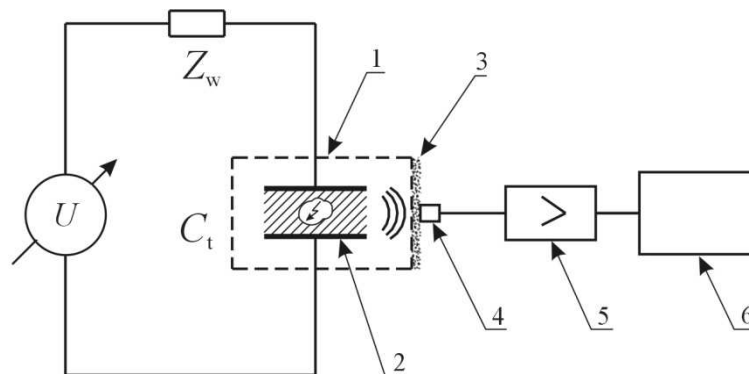
**Rys. 5.5.** Układ mostkowy do pomiarów wyładowań niezupełnych;  $C_k$  – kondensator sprzęgający,  $C_t$  – kondensator badany,  $Z_w$  – impedancja wewnętrzna źródła napięciowego  $U$ ,  $Z_m$  – szeregową impedancja pomiarowa,  $pC$  – miernik ładunku

Wyładowania niezupełne można charakteryzować także za pomocą pomiarów sygnałów emisji akustycznej, co proponuje się w rozprawie wykorzystać do oceny jakości badanych kondensatorów. Podczas zjawisk wyładowań niezupełnych są generowane ultradźwięki (sygnały emisji akustycznej) o częstotliwościach z zakresu od kilkudziesięciu do kilkuset kHz [6-10, 30, 70, 74, 75]. Ultradźwięki można mierzyć w systemie zawierającym przetwornik piezoelektryczny, wzmacniacz napięciowy oraz oscyloskop cyfrowy lub kartę akwizycji danych (rys. 5.6) [1, 21, 22]. Sygnał emisji akustycznej występuje z pewnym opóźnieniem w stosunku do obserwowanego impulsu prądowego wyładowania niezupełnego [30, 74].

Do zalet pomiarów wyładowań niezupełnych za pomocą sygnałów emisji akustycznej w porównaniu z metodami elektrycznymi należy zaliczyć [21, 22]:

- możliwość lokalizacji obszaru wyładowania przez zastosowanie dwóch lub więcej czujników,
- separacja galwaniczna obiektu badanego od systemu pomiarowego,
- mniejszy wpływ zewnętrznych zakłóceń elektromagnetycznych na odczyty z czujnika,

- możliwość pomiarów wyładowań niepełnych w kondensatorach o dużych pojemnościach, gdy pomiary elektryczne są trudniejsze do przeprowadzenia.



**Rys. 5.6** Układ do pomiarów wyładowań niepełnych za pomocą sygnałów emisji akustycznej;  $U$  – regulowane źródło napięcia przemiennego,  $Z_w$  – impedancja wewnętrzna źródła napięciowego,  $C_t$  – 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

Rejestrowane sygnały elektryczne lub emisji akustycznej podczas wyładowań niepełnych można charakteryzować za pomocą szeregu różnych parametrów i funkcji [13, 55, 59, 82-86, 92]. Jako parametry statystyczne najczęściej wyznacza się odchylenie standardowe  $\sigma_x$ , skośność  $\gamma_1$  lub spłaszczenie  $\gamma_2$ . Dla ciągu zmierzonych  $N$  wartości  $x_i$  ( $i = 1 \dots N$ ), gdzie  $x_i$  to rejestrowane próbki napięcia, prądu (np.  $I_t(t)$  w układzie z rys. 5.4) lub sygnału emisji akustycznej (np. na wyjściu przetwornika akustycznego w układzie z rys. 5.6) podczas wyładowań niepełnych, estymator odchylenia standardowego określa zależność:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (5.7)$$

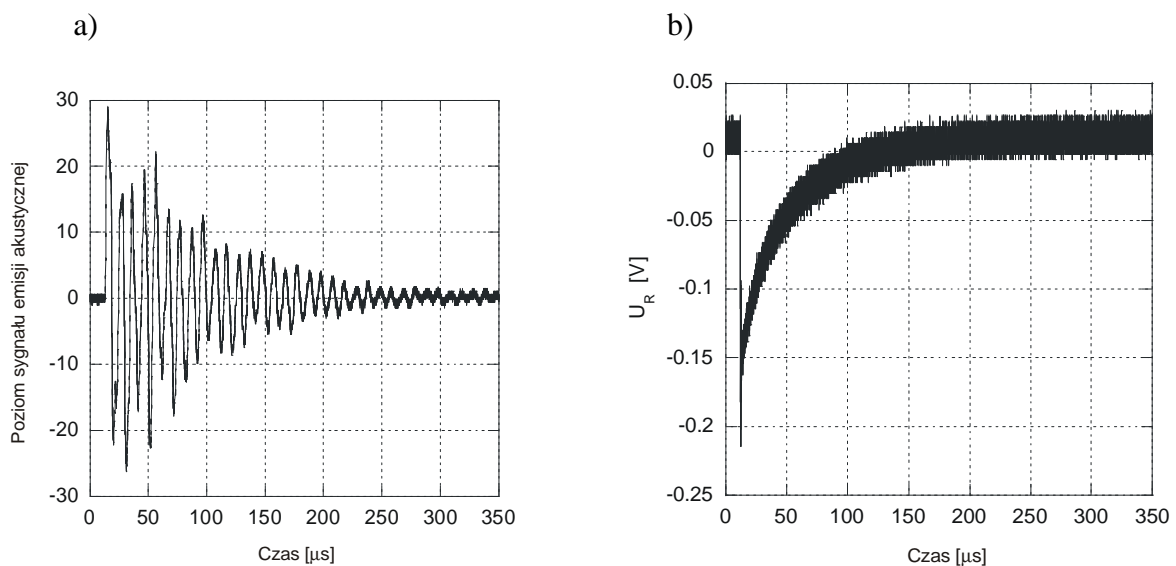
gdzie  $\bar{x}$  oznacza wartość średnią z ciągu  $x_i$ . Skośność określa wzór:

$$\gamma_1 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\sigma_x^3}, \quad (5.8)$$

zaś współczynnik spłaszczenia (kurtozę) definiuje wyrażenie:

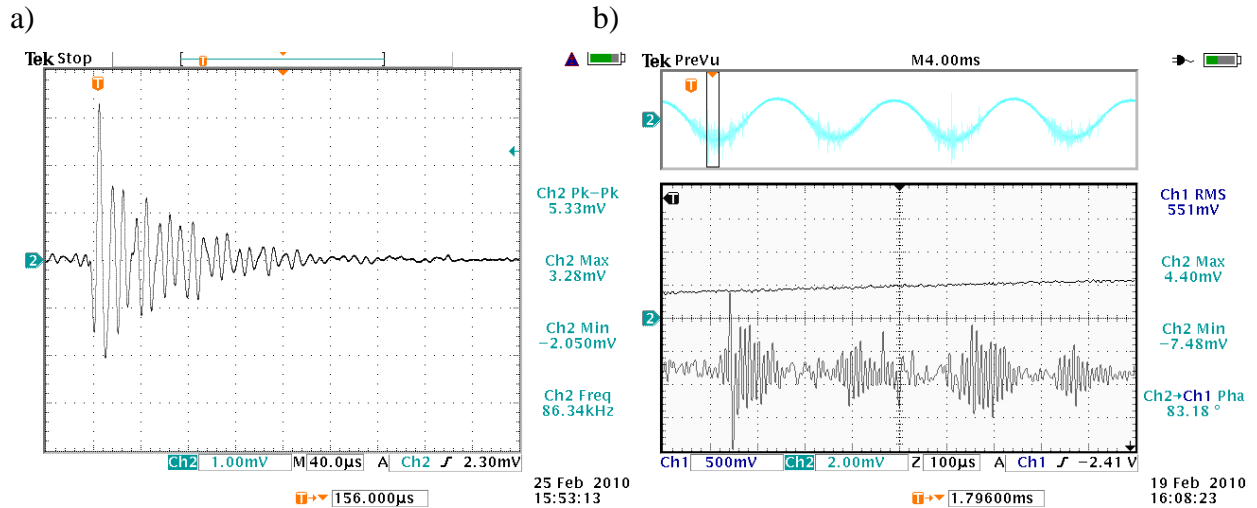
$$\gamma_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma_x^2} - 3 . \quad (5.9)$$

Odchylenie standardowe jest miarą intensywności zachodzących zjawisk o charakterze losowym. Skośność jest miarą asymetrii rozkładu prawdopodobieństwa wartości chwilowych. W przypadku rozkładu normalnego wartość  $\gamma_1$  wynosi zero. Kurtoza jest natomiast miarą spłaszczenia tego rozkładu i także wynosi zero dla rozkładu normalnego [61].

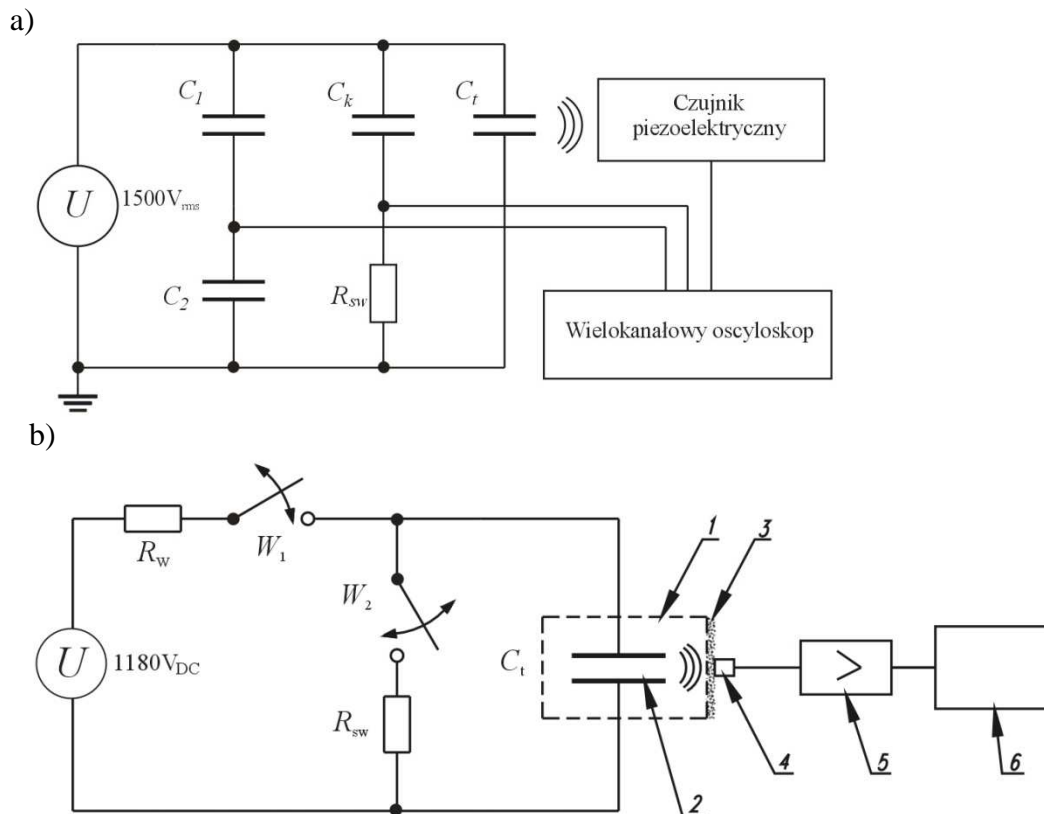


**Rys. 5.7.** Przebiegi rejestrowane podczas wyładowań niepełnych w kondensatorze o pojemności 27 nF/275 V~ klasy Y2: a) sygnału emisji akustycznej, b) napięcia na rezystorze  $R_{sw}$  połączonym szeregowo z kondensatorem sprzęgającym  $C_k$  (rys. 5.9a); częstotliwość próbkowania sygnałów wynosiła 10 MHz

Do innych, poza już wymienionymi parametrami, które mogą charakteryzować badany sygnał, należy zaliczyć energię rejestrowanego sygnału, szybkość jego narastania, wartości szczytowe oraz analizę czasowo-częstotliwościową lub widmową [16, 17]. Przykładowy, zarejestrowany przebieg sygnału emisji akustycznej pojedynczego wyładowania niepełnego pokazano na rys. 5.7a, a rejestrowany równolegle sygnał napięciowy na szeregowym rezystorze  $R_{sw}$  (w układzie pomiarowym z rys. 5.9) na rys. 5.7b [68]. Podczas polaryzacji kondensatora napięciem zmiennym obserwuje się ciąg wyładowań niepełnych, którym towarzyszy ciąg sygnałów emisji akustycznej o zbliżonym kształcie (rys. 5.8). Badanie występowania emisji akustycznej można przeprowadzić w trakcie przewidywanej normami próby wytrzymałości elektrycznej, podczas której kondensator jest polaryzowany wysokim napięciem o wartościach uzależnionych od jego typu (rys. 5.9).



**Rys. 5.8.** Przykładowe oscylogramy zarejestrowane podczas wyładowań niezupełnych w kondensatorze 470 nF/275 V~: a) sygnał emisji akustycznej, b) ciąg sygnałów emisji akustycznej (dolna część rysunku) wraz z przebiegiem sygnału indukowanego napięciem polaryzującym o częstotliwości 50 Hz



**Rys. 5.9.** Układy do pomiarów sygnałów emisji akustycznej powodowanych wyładowaniami niezupełnymi podczas próby wytrzymałości elektrycznej: a) dla kondensatorów 27 nF/275 V~ klasy Y2, b) dla kondensatorów 470 nF/275 V~ klasy X2; 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 – wielokanałowy oscyloskop TDS5034B,  $R_w$  – rezystancja wewnętrzna źródła,  $U$  – źródło napięcia stałego,  $R_{sw}$  – szeregowy rezystor wzorcowy,  $C_1$ ,  $C_2$ , – pojemnościowy dzielnik napięcia,  $C_k$  – kondensator sprzęgający,  $C_t$  – kondensator badany

Warto podkreślić, że układy do pomiarów sygnałów emisji akustycznej są zwykle tańsze niż urządzenia rejestrujące wyładowania niezupełne w układach mostkowych. Ponadto, pomiary wielokanałowe sygnałów emisji akustycznej pozwalają lokalizować miejsca występowania wyładowań niezupełnych w przypadku obiektów o odpowiednio dużych wymiarach.

### 5.3. Wpływ wyładowań niezupełnych na parametry kondensatorów foliowych

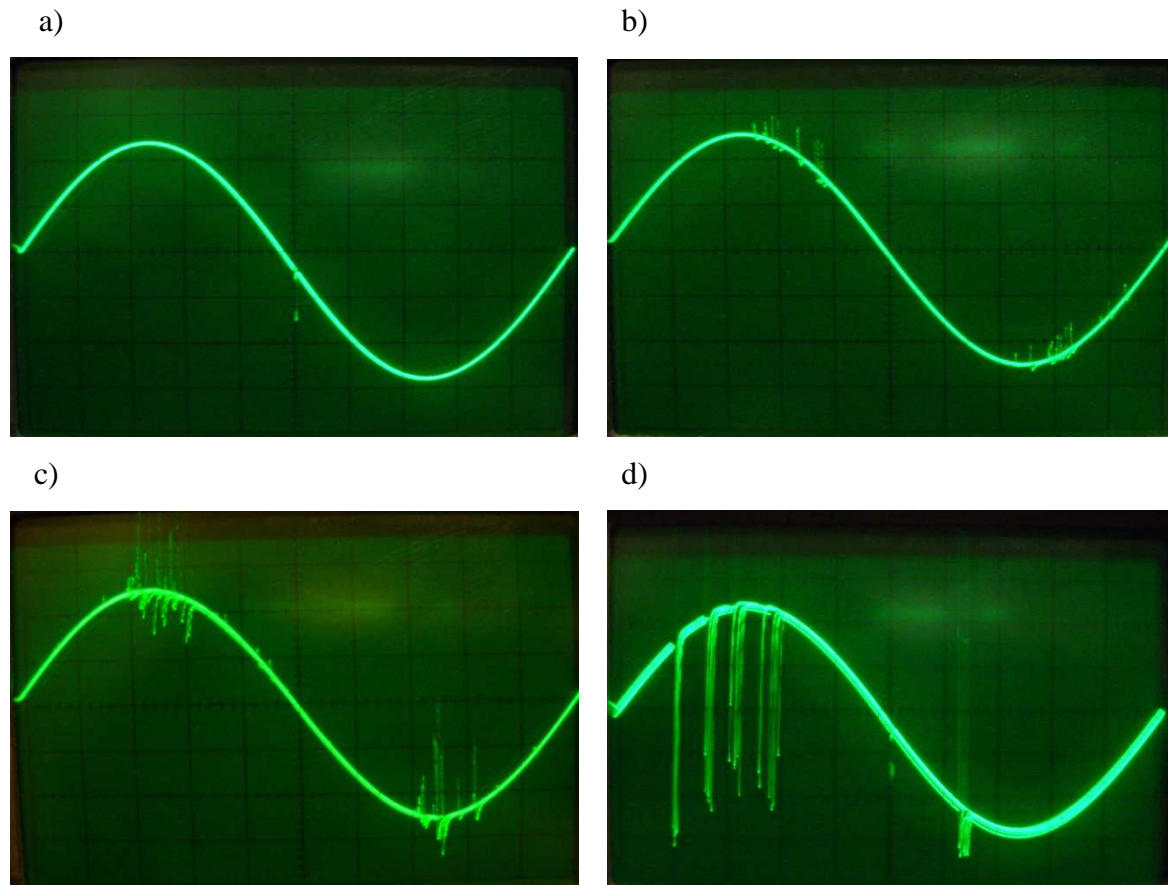
Podczas eksploatacji kondensatorów na ich zaciskach mogą pojawiać się znaczne przepięcia, które inicjują wyładowania niezupełne w obszarach nieciągłości lub na krawędziach folii zwijki [15, 82-86]. Po zaniku zakłócenia, wyładowania mogą utrzymywać się także przy polaryzacji kondensatora tylko napięciem znamionowym. Stąd, istotnym jest, aby napięcie zapłonu i gaśnięcia wyładowań niezupełnych przewyższało napięcie znamionowe pracy danego kondensatora. Jeżeli kondensator będzie pracował w warunkach podwyższonej temperatury lub wilgotności, to napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych może obniżyć się nawet do poziomu napięcia pracy. Ten efekt jest bardzo niebezpieczny, ponieważ znacznie skraca czas bezawaryjnej pracy kondensatora. Duża liczba wyładowań niezupełnych oraz samoregeneracji może doprowadzić do przedwczesnej degradacji folii powodując zmniejszenie się rezystancji izolacji  $R_{izol}$ , wzrost współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$ , utratę pojemności wskutek licznych samoregeneracji, a nawet całkowite uszkodzenie kondensatora (tab. 5.1). Często obserwuje się w trakcie prób wzrost intensywności wyładowań niezupełnych, co oznacza postępującą degradację kondensatora (rys. 5.10).

**Tab. 5.1.** Obserwowana zmiana parametrów kondensatora 470 nF klasy X2 podczas próby trwałości

| Lp. | Czas próby [h] | 1 kHz/1 V |                           | 100 V/60 s                       |
|-----|----------------|-----------|---------------------------|----------------------------------|
|     |                | C [nF]    | $tg\delta \times 10^{-4}$ | $R_{izol} \times 10^6 [M\Omega]$ |
| 1   | 0              | 465,03    | 3,18                      | 1,2                              |
| 2   | 500            | 460,84    | 3,62                      | 1,0                              |
| 3   | 1000           | 455,87    | 4,52                      | 0,45                             |
| 4   | 2000           | 430,15    | 9,26                      | 0,01                             |

Zjawiska wyładowań niezupełnych w kondensatorach foliowych wpływają na skrócenie ich czasu bezawaryjnej pracy. Analiza pomiarów sygnałów elektrycznych i akustycznych

podczas wyładowań niezupełnych oraz ich związków z innymi parametrami kondensatorów i czasem ich poprawnej pracy może pozwolić na wprowadzenie skutecznych metod oceny ich jakości. Te związki będą miały charakter statystyczny. Stąd, do ich oceny należy zastosować odpowiednie metody, jak np. współczynnik korelacji liniowej [4].



**Rys. 5.10.** Przykładowe oscylogramy wyładowań niezupełnych dla kondensatora 470 nF klasy X2 w trakcie próby trwałości: a) pomiar wstępny, b) pomiar po 500 h – widoczne nieliczne impulsy wyładowań niezupełnych, c) pomiar po 1000 h – liczne wyładowania niezupełne, d) pomiar po 2000 h – intensywne wyładowania niezupełne; pomiary wykonano przy napięciu polaryzującym kondensator równym napięciu próby trwałości (344 V<sub>rms</sub>)

Wyładowania niezupełne występują w obszarach o dużym natężeniu pola elektrycznego. W pracy wyznaczono rozkład wartości pola elektrycznego dla kilku przykładowych kształtów wtrąceń w dielektryku oraz przerwy między metalizacją folii a napyłanym metalicznym czołem (Dodatek C). Obliczenia przeprowadzono za pomocą programu *FEMM* stosując metodę elementów skończonych. Na podstawie obliczeń stwierdzono, że najbardziej niebezpieczne są wady w postaci szczelin powietrznych między metalizacją folii a metalizacją czoła. Mniejsze znaczenie mają wtrącenia o kształcie kuli lub półcyindra. Wszystkie rodzaje

tych wad są niebezpieczne ze względu na możliwość inicjowania w nich wyładowań niezupełnych, które mogą doprowadzić do uszkodzenia dielektryka kondensatora.

#### **5.4. Podsumowanie**

W bieżącym rozdziale podano klasyfikację zjawisk wyładowań niezupełnych, jakie mogą występować w kondensatorach foliowych. Zwrócono uwagę na metrologiczne problemy ich charakteryzowania, ze względu na brak możliwości obserwacji przyływu całkowitego prądu powodowanego wyładowaniem niezupełnym. Podkreślono, że te problemy są szczególnie istotne w przypadku kondensatorów o względnie dużej pojemności, rzędu  $\mu\text{F}$ . Zwrócono uwagę na możliwość wykorzystania pomiarów sygnałów emisji akustycznej, które mogą być stosowane w przypadku kondensatorów o dużych pojemnościach. Ponadto, w przypadku rejestracji sygnałów emisji akustycznej za pomocą np. dwóch sensorów można próbować identyfikować obszar, w którym występują zjawiska wyładowań niezupełnych (określać, który proces technologiczny jest odpowiedzialny za powstałą wadę).

W pracy podano parametry i funkcje jakie są stosowane do określania właściwości sygnałów emisji akustycznej, w tym zaproponowano taki jak kurtoza, którego intensywność nie zależy od tłumienia sygnału akustycznego w wyniku właściwości obudowy oraz substancji uszczelniającej kondensator (tzw. syciwa).

Zjawiska wyładowań niezupełnych prowadzą do stopniowej degradacji struktury kondensatora foliowego. W bieżącym rozdziale oryginalnym osiągnięciem autora jest wskazanie mechanizmów uszkodzeń kondensatorów foliowych oraz określenie jakie wady są odpowiedzialne za obserwowane uszkodzenia, prowadzące do stopniowej utraty pojemności kondensatorów. W Dodatku C, przedstawiono szczegółowe wyniki obliczeń numerycznych, określających wartości pól elektrycznych występujących w obszarach wtrącin o ustalonych kształtach (sfera, półwalec, szczelina), gdzie mogą potencjalnie zachodzić wyładowania niezupełne.

---

## 6. Wyniki badań eksperymentalnych

---

### 6.1. Badania trwałości kondensatorów przeciwzakłóceńowych

Stosowane w sprzęcie powszechnego użytku kondensatory przeciwzakłóceńowe są jednymi z najbardziej popularnych kondensatorów foliowych. Powinny się charakteryzować bardzo długim czasem poprawnej eksploatacji. Stąd, ten rodzaj kondensatorów stał się w pracy obszarem szczegółowych badań ich jakości.

Do badań kondensatorów przeciwzakłóceńowych wybrano próby o liczności 60 egzemplarzy dla każdego z dwóch najbardziej popularnych w produkcji typów: dla klasy X2 470 nF 275 V a dla klasy Y2 27 nF 275 V. Badane typy kondensatorów charakteryzują się bardzo dużą niezawodnością, co oznacza konieczność przeprowadzania próby trwałości przez względnie długi okres czasu. Próbę tą dla kondensatorów przeciwzakłóceńowych przeprowadzono dwukrotnie. Wyniki pomiarów uzyskane podczas pierwszej próby trwałości o czasie 2000 h, pozwoliły na sformułowanie wstępnych wniosków dotyczących sposobu pomiarów parametrów kondensatorów przed rozpoczęciem próby oraz pomiarów międzyokresowych w trakcie jej trwania. Wnioski te zastosowano przy drugiej próbie trwałości o znacznie dłuższym czasie (4500 h), przeprowadzonej dla nowej grupy kondensatorów wybranych typów.

Przed rozpoczęciem pierwszej próby trwałości wszystkie badane egzemplarze zostały scharakteryzowane przez pomiary wykonane w ramach badań wstępnych:

- pojemności  $C$  i współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  przy polaryzacji napięciem 1 V i częstotliwości 1kHz,
- rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  przy polaryzacji napięciem stałym  $U = 100$  V po czasie 60 s, napięcia zapłonu  $u_z$  i napięcia gaśnięcia  $u_g$  wyładowań niezupełnych,
- napięcia udarowego 1,2/50  $\mu\text{s}$  o amplitudzie 2,5 kV dla kondensatorów 470 nF klasy X2 i 5 kV dla kondensatorów 27 nF klasy Y2.



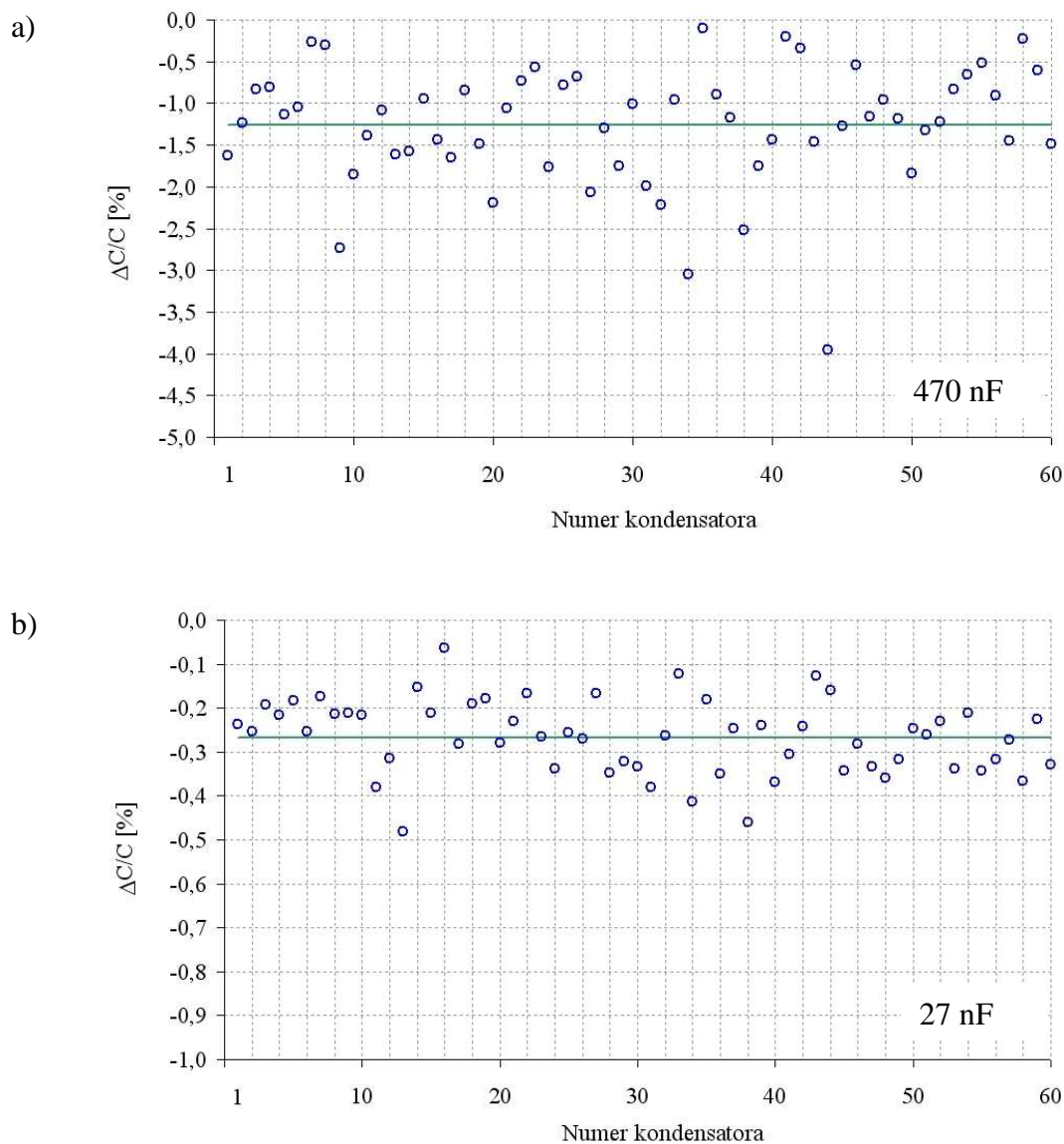
Sygnaly emisji akustycznej rejestrowano czujnikiem piezoelektrycznym umieszczonym na obudowie kondensatora podczas polaryzacji przez 60 s: kondensatory 27 nF napięciem zmiennym  $U_{\text{rms}} = 1500 \text{ V}$  oraz kondensatory 470 nF napięciem stałym  $U_{\text{DC}} = 1180 \text{ V}$  (rys. 5.9). Sygnaly emisji akustycznej mierzono także w kondensatorach 470 nF podczas rozładowania przez ustaloną rezystancję. Obserwowano zmienną liczbę wyładowań niezupełnymi w poszczególnych egzemplarzach badanych kondensatorów. W przypadku niektórych egzemplarzy obserwowano także sygnaly emisji akustycznej w wyniku występowania szczątkowego ładunku (tzw. ładunku powrotnego) w dielektryku już po rozładowaniu kondensatora przez zwarcie jego wyprowadzeń, co można wykorzystać do oceny jakości kondensatorów [P2]. Obserwowane sygnaly rejestrowano przy częstotliwości próbkowania 10 MHz zapisując dane do plików. Rejestrowano dla każdego wyładowania niezupełnego przebieg czasowy o długości 10000 próbek. W badanych kondensatorach obserwowano do kilkunastu takich przebiegów podczas polaryzacji kondensatora przez 60 s. Poszczególne rejestrowane przebiegi były wyzwalane, gdy sygnał przekraczał nieznacznie poziom szumów własnych zastosowanego systemu pomiarowego.

### 6.1.1. Wyniki próby trwałości 2000 h

Po przeprowadzeniu badań wstępnych kondensatory poddano próbie trwałości. W trakcie próby do kondensatorów 470 nF klasy X2 doprowadzono napięcie  $U = 1,25U_N = 343,75 \text{ V}_{\text{rms}}$ , natomiast do kondensatorów 27 nF klasy Y2 doprowadzono napięcie  $U = 1,7U_N = 467,5 \text{ V}_{\text{rms}}$  w układzie z rysunku 4.3. W trakcie próby, po 1000 h jej trwania, pomierzono pojemność  $C$  oraz współczynnik strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  badanych kondensatorów (tab. 6.1, rys. 6.1).

**Tab. 6.1.** Zestawienie zmian wybranych parametrów kondensatorów po 1000 h próby trwałości

| Parametr                              | Typ kondensatorów     |                        |
|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|
|                                       | 470 nF, 275 V, X2     | 27 nF, 275 V, Y2       |
| $(\Delta C/C)_{\text{min}}$           | -0,10%                | -0,06%                 |
| $(\Delta C/C)_{\text{śr}}$            | -1,27%                | -0,27%                 |
| $(\Delta C/C)_{\text{max}}$           | -3,95%                | -0,48%                 |
| $\Delta \text{tg}\delta_{\text{min}}$ | $1,22 \times 10^{-4}$ | $0,76 \times 10^{-4}$  |
| $\Delta \text{tg}\delta_{\text{śr}}$  | $0,97 \times 10^{-4}$ | $1,267 \times 10^{-4}$ |
| $\Delta \text{tg}\delta_{\text{max}}$ | $2,23 \times 10^{-4}$ | $1,91 \times 10^{-4}$  |



**Rys. 6.1.** Zmiany pojemności kondensatorów po 1000 h próby trwałości: a) kondensatory 470 nF klasy X2, b) kondensatory 27 nF klasy Y2; linią ciągłą oznaczono wartość średnią w badanej grupie

Przytoczone dane pokazują istotne różnice między typami badanych kondensatorów. Kondensatory 27 nF klasy Y2 charakteryzują się mniejszymi zmianami pojemności i mniejszym wzrostem współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  w stosunku do kondensatorów 470 nF klasy X2 po 1000 h próby trwałości. Takie zachowanie jest zgodne z ich konstrukcją, mimo istotnie różnych obciążeń podczas tych prób (tab. 6.2). Kondensatory o pojemności 27 nF stosowane są w układach bocznikujących izolację ochronną (klasa Y2) i charakteryzują się lepszą izolacją, niż kondensatory o pojemności 470 nF (klasa X2), które nie bocznikują izolacji ochronnej.

**Tab. 6.2.** Parametry charakteryzujące przeprowadzone próby trwałości

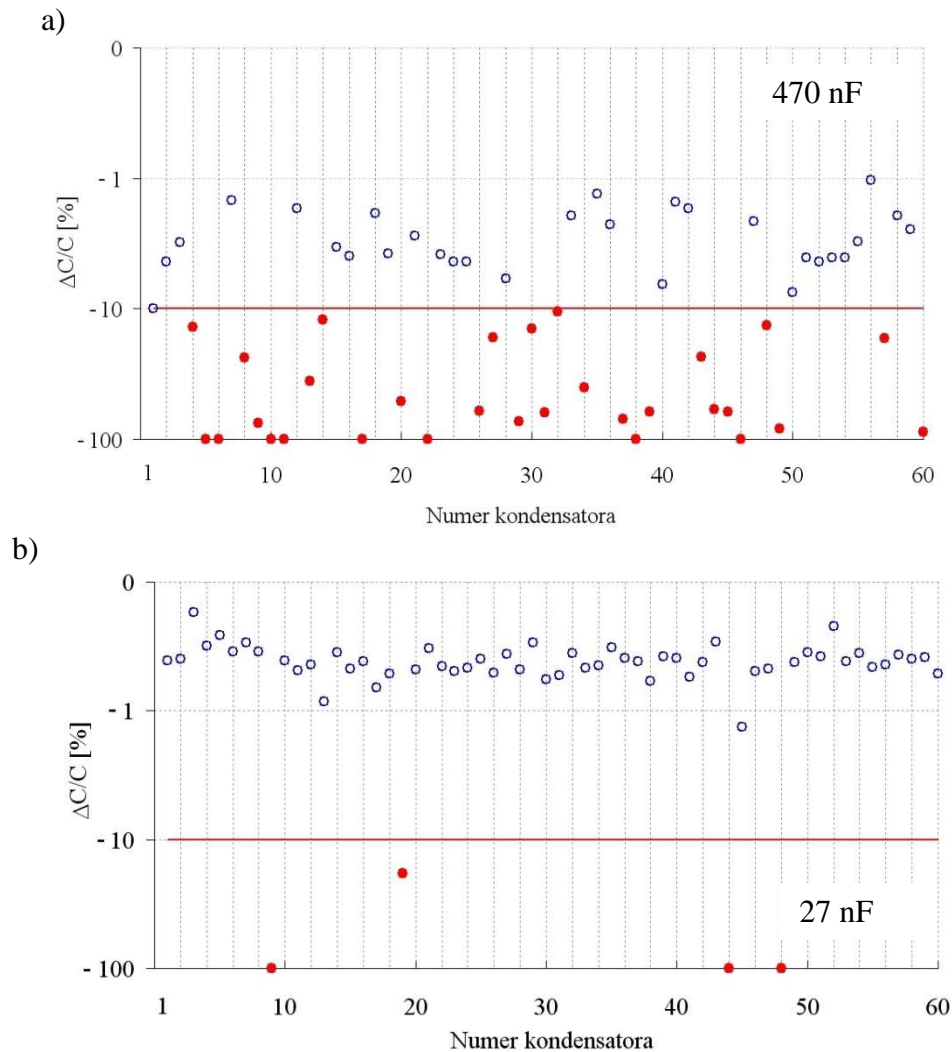
| Parametr   |                             | Typ kondensatora |                 |
|--|-----------------------------|------------------|-----------------|
|  |                             | 470 nF/275 V, X2 | 27 nF/275 V, Y2 |
| Napięcie próby *   | $U_p$ [V]                   | 343,75           | 467,5           |
| Wartość skuteczna impulsu napięcia *                               | $U_{imp}$ [V]               | 1000             | 1000            |
| Natężenia pola elektrycznego w dielektryku przy napięciu $U_p$     | $E$ [V/ $\mu$ m]            | 45,83            | 31,17           |
| Natężenia pola elektrycznego w dielektryku przy napięciu $U_{imp}$ | $E_{imp}$ [V/ $\mu$ m]      | 133,33           | 66,67           |
| Prąd przy napięciu próby $U_p$                                     | $I_p$ [mA]                  | 50,76            | 3,96            |
| Prąd podczas impulsu napięcia 1000 Vrms                            | $I_{imp}$ [mA]              | 147,65           | 8,48            |
| Gęstość prądu na powierzchni czoła przy napięciu $U_p$             | $J_p$ [mA/mm <sup>2</sup> ] | 0,49             | 0,072           |
| Gęstość prądu na powierzchni czoła przy napięciu $U_{imp}$         | $J$ [mA/mm <sup>2</sup> ]   | 1,44             | 0,154           |

\* nie uwzględniano spadku napięcia na rezystorze 47  $\Omega$  (schemat wg rys. 4.3a)

Mimo, że kondensatory 27 nF klasy Y2 są polaryzowane wyższym napięciem niż kondensatory 470 nF klasy X2, to natężenie pola elektrycznego w dielektryku i gęstość prądu na powierzchni czoł są znacząco mniejsze niż w kondensatorach 470 nF klasy X2 (tab. 6.2), a wartości wymienionych parametrów wpływają znacząco na możliwość wystąpienia uszkodzeń w kondensatorach.

Wszystkie badane kondensatory, zgodnie z obowiązującą normą przemysłową [51], uznano za sprawne po przejściu próby trwałości 1000 h. Próbę trwałości przedłużono do 2000 h w celu bardziej szczegółowego przebadania kondensatorów. Na rys. 6.2 przedstawiono obserwowane zmiany pojemności dla obu typów kondensatorów w wyniku tej przedłużonej próby.

W wielu badanych egzemplarzach zaobserwowano utratę pojemności powyżej 10% początkowej wartości, co oznacza, że takie egzemplarze są traktowane jako uszkodzone. W niektórych egzemplarzach stwierdzono praktycznie utratę całkowitej pojemności, co jest najprawdopodobniej powodowane utratą kontaktu między warstwą metalizacji czoła a metalizacją folii zwijki.



**Rys. 6.2.** Zmiany pojemności badanych kondensatorów obserwowane po przedłużonej próbie trwałości 2000 h: a) kondensatory 470 nF klasy X2, b) kondensatory 27 nF klasy Y2; czerwoną linią oznaczono graniczną wartość dopuszczalnych zmian pojemności po próbie

Podsumowując wyniki próby po 2000 h stwierdzono, że w grupie 60 sztuk kondensatorów 27 nF były 4 egzemplarze, w których pojemność zmniejszyła się o więcej niż 10%. W tak samo licznej grupie kondensatorów 470 nF egzemplarze, które utraciły więcej niż 10% pojemności, było 30. Należy jednak podkreślić, że czas trwania próby trwałości przekraczał dwukrotnie czas wymagany odpowiednią normą.

### 6.1.2. Analiza uszkodzeń w kondensatorach po próbie trwałości 2000 h

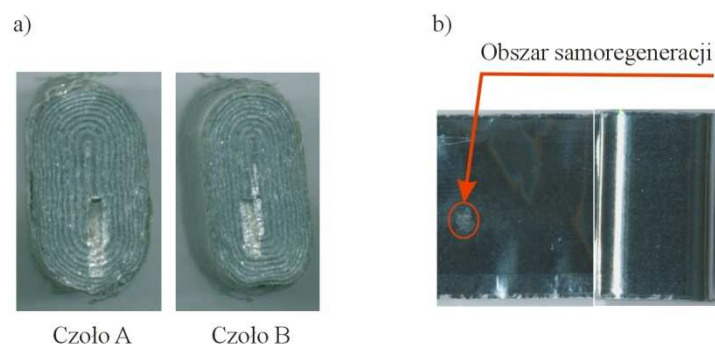
W celu szczegółowego poznania przyczyn powstawania uszkodzeń w kondensatorach podczas próby trwałości o czasie 2000 h przeanalizowano zmiany jakie wystąpiły w badanych egzemplarzach, które zgodnie z normą uznawane są za wadliwe gdy po próbie  $|\Delta C/C| \geq 10\%$

lub  $|\Delta \text{tg} \delta| \geq 80 \cdot 10^{-4}$  lub  $|\Delta R_{\text{izol}}/R_{\text{izol}}| \geq 50\%$  (rozdz. 4.1.3). Zaobserwowano, że z podanych warunków pierwszym który po próbie trwałości jest spełniony przez część egzemplarzy to  $|\Delta C/C| \geq 10\%$ . Stąd, w dalszych badaniach ograniczono się do analizy zmian pojemności jako warunku prawidłowego funkcjonowania kondensatorów.

Poniżej opisano występujące w strukturach niektórych egzemplarzy zmiany powstałe podczas próby trwałości. Zaobserwowane uszkodzenia udokumentowano zdjęciami wybranych obszarów. Dla porównania przeanalizowano strukturę kondensatora (470 nF, nr 7) reprezentującego te egzemplarze, które nie uległy uszkodzeniu.

### Kondensator 470 nF, nr 7

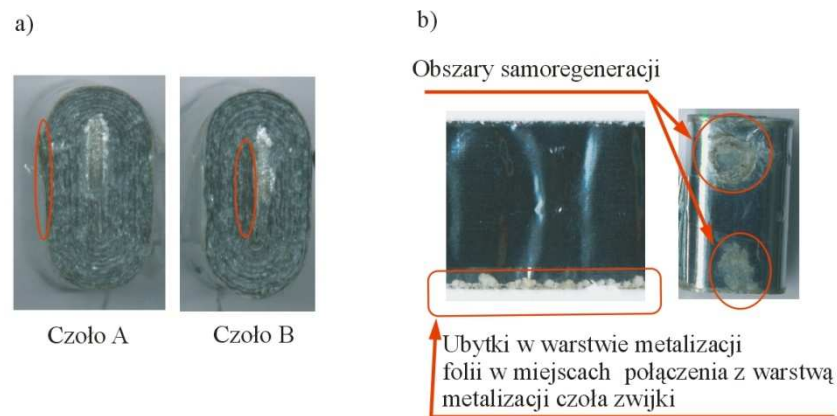
Zmiana pojemności kondensatora nr 7 wyniosła jedynie -1,5%. Kondensator nie wykazał żadnych negatywnych cech funkcjonalnych. Wewnętrzne zmiany w zwijce są nieznaczne. Powierzchnie czoł mają metaliczny kolor, a brzegi folii nie wykazują ubytków metalizacji (rys. 6.3a), co świadczy o poprawnym połączeniu metalizacji folii i metalizacji czoła zwijki. Na powierzchni folii są widoczne jedynie efekty sporadycznych procesów samoregeneracji (rys. 6.3b).



Rys. 6.3. Kondensator nr 7 po próbie trwałości o czasie 2000 h: a) czoła kondensatora, b) fragment folii

### Kondensator 470 nF, nr 4

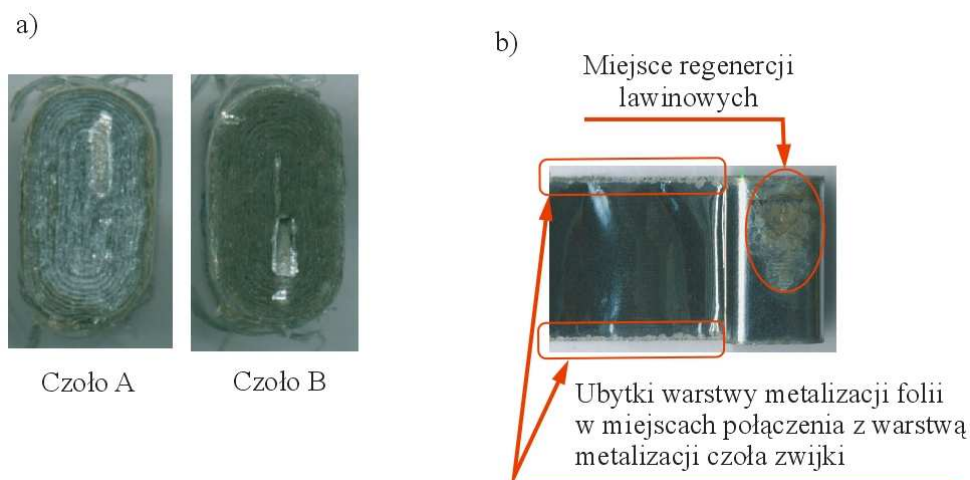
Zmiana pojemności kondensatora nr 4 wyniosła -13,9%. Utrata pojemności przekłada się na widoczne zmiany we wnętrzu kondensatora. Na czołach kondensatora występują miejscowe brązowe przebarwienia (rys. 6.4a). Na pewnych odcinkach folii jest widoczny ubytek warstwy metalizacji przy jej krawędzi łączonej z metalizacją czoła. Ponadto, na powierzchni zwijki oraz po jej rozwinięciu wewnątrz są widoczne ogniska występowania wyładowań niezupełnych i samoregeneracji, które powodowały uszkodzenia dużej liczby warstw folii (rys. 6.4b).



**Rys. 6.4.** Kondensator nr 4 po próbie trwałości o czasie 2000 h: a) czoła kondensatora, b) fragment folii

### Kondensator 470 nF, nr 5

Nastąpiła całkowita utrata pojemności kondensatora nr 5 spowodowana wypaleniem się połączenia między metalizacją czoła a metalizacją folii od strony jednego z czoł, które całkowicie zmieniło kolor na brązowy (rys. 6.5a). To świadczy o wystąpieniu tam podwyższonej temperatury podczas iskrzenia. Na krawędziach obu folii jest widoczny ubytek w jej metalizacji praktycznie na całej długości (rys. 6.5b).



**Rys. 6.5.** Kondensator nr 5 po próbie trwałości o czasie 2000 h: a) czoła kondensatora, b) fragment folii

Uszkodzone kondensatory 27 nF klasy Y2 wykazywały identyczne defekty jak obserwowane w kondensatorach 470 nF, chociaż występowały znacznie rzadziej po takim samym czasie próby trwałości. Ze względu na różny stosunek powierzchni czoł do długości zwiniętej folii w obu typach badanych kondensatorów można spodziewać się różnej częstości uszkodzeń występujących na krawędziach folii lub we wnętrzu zwijki.

Obserwowana w kondensatorach utrata pojemności jest wynikiem oddzielania się kolejnych fragmentów metalizacji folii od metalizacji czoła kondensatora lub zjawiska samoregeneracji, powodującego lokalne ubytki metalizacji folii jako następstwo wyładowań niezupełnych. Procesy samoregeneracji mogą spowodować utratę pojemności o co najwyżej kilkanaście procent. Natomiast za duże obserwowane zmiany pojemności w kondensatorach odpowiedzialne jest zjawisko oddzielania się zwojów folii od warstwy metalicznego czoła. W skrajnym przypadku całe czoło kondensatora może ulec oddzieleniu od metalizacji folii (rys. 6.5), wówczas obserwuje się praktycznie całkowitą utratę pojemności kondensatora.

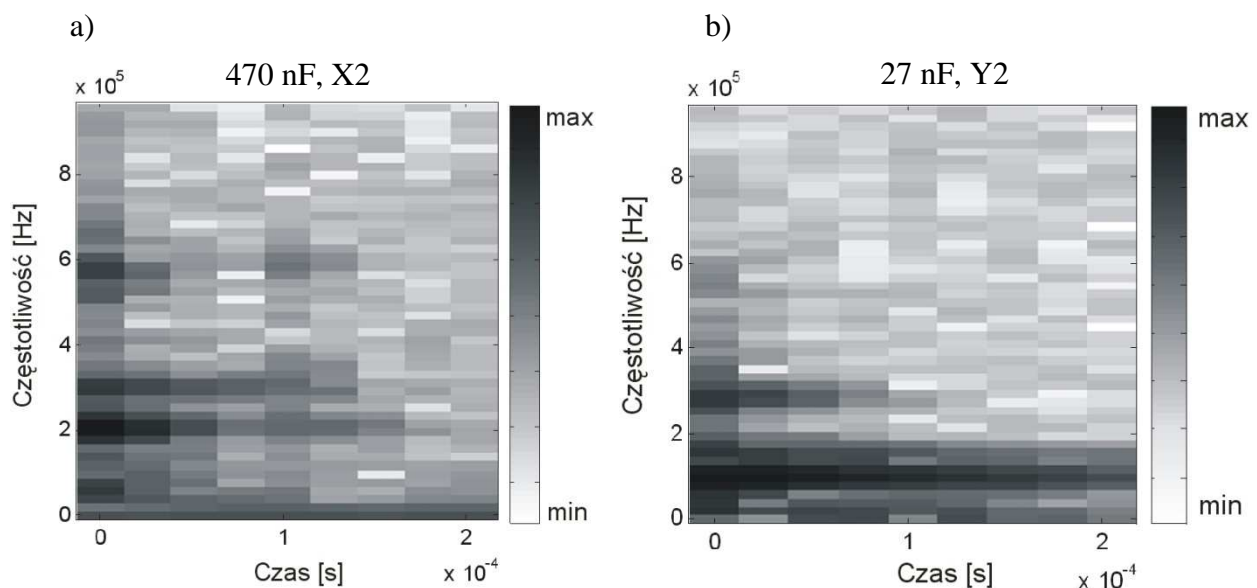
Oddzielanie się zwojów folii od warstwy metalicznego czoła może następować nawet podczas przepływu prądu znamionowego przez kondensator, gdy kontakt warstwy metalizacji folii z metalizacją czoła został wykonany nieprawidłowo. Zły kontakt może powstać ze względu na wady folii lub błędy podczas procesu metalizacji czoł zwijek. Innym powodem zniszczenia tego połączenia jest przepływ prądów impulsowych o nadmiernych wartościach.

W obu typach kondensatorów wystąpiło pogorszenie ich cech funkcjonalnych, takich jak utrata pojemności, czy wzrost wartości  $\text{tg}\delta$ . W żadnym z kondensatorów nie nastąpiło pogorszenie parametrów mających wpływ na bezpieczeństwo użytkowania (wystąpienie zwarcia), co jest szczególnie istotne dla kondensatorów klasy Y2. Po tak intensywnym starzeniu szereg kondensatorów zmniejszyło swoją pojemność o więcej niż 10%, co oznacza że należy je traktować jako wadliwe. Kondensatory 470 nF klasy X2 mają zdecydowanie wyższą wadliwość w stosunku do kondensatorów 27 nF klasy Y2, co wynika z różnej budowy powodowanej zakresem ich zastosowań.

Po wykonaniu pomiarów parametrów kondensatorów, po zakończeniu próby trwałości, przeprowadzono analizę oceny powiązań wartości parametrów kondensatorów pomierzonych po ich wytworzeniu z wartościami parametrów po zakończeniu próby trwałości.

Aby scharakteryzować sygnały emisji akustycznej, których składowe częstotliwościowe zmieniają się w czasie ich rejestracji, zastosowano metody analizy czasowo-częstotliwościowej. W pracy ograniczono się do krótkoczasowej transformaty Fouriera, dostępnej w programie *Matlab*, jako funkcja *specgram* [29, 54, 63]. Podana funkcja wyznacza moduł krótkoczasowej transformaty Fouriera proporcjonalny do energii rejestrowanego sygnału w ustalonym przedziale czasu. Inne, znane z literatury metody analizy czasowo-częstotliwościowej, charakteryzują się lepszą rozdzielczością w dziedzinie czasu i częstotliwości kosztem wystąpienia dodatkowych składowych intermodulacyjnych [63, 76, 81]. W wykonanej analizie, której celem było określenie głównych składowych częstotliwościowych analizowanego sygnału emisji akustycznej, przyjęta metoda dawała

zadawalające wyniki. Porównując przykładowe spektrogramy sygnałów emisji akustycznej dla obu badanych typów kondensatorów (rys. 6.6) można stwierdzić, że zastosowanie grubszego dielektryka w kondensatorach 27 nF (15  $\mu\text{m}$ ), w stosunku do kondensatorów 470 nF (7,5  $\mu\text{m}$ ), powoduje przesunięcie dominującej składowej częstotliwościowej sygnałów emisji akustycznej do zakresu niższych częstotliwości, niż w kondensatorach 470 nF, dla których dominująca składowa występuje przy dwukrotnie wyższej częstotliwości, około 200 kHz. Uzyskane wyniki wskazują, że w dwukrotnie grubszym dielektryku fala dźwiękowa powstająca podczas wyładowań niezupełnych ma średnio dwukrotnie dłuższą drogę do przebycia.



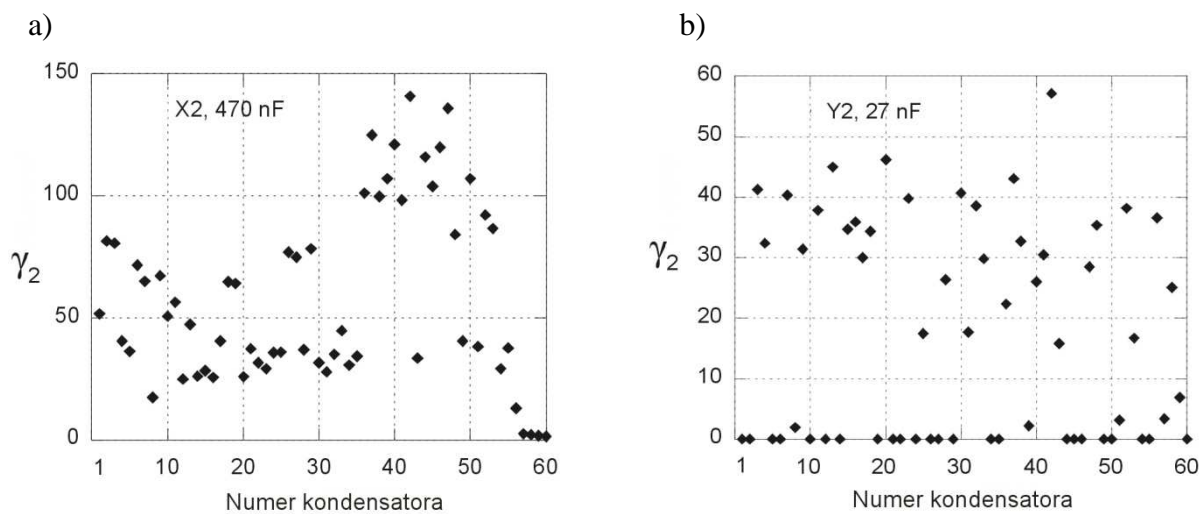
**Rys. 6.6.** Spektrogramy sygnałów emisji akustycznej dla przykładowych kondensatorów: a) 470 nF klasy X2, b) 27 nF klasy Y2

Intensywność zarejestrowanych podczas badań sygnałów emisji akustycznej była bardzo różna. W badanych kondensatorach część egzemplarzy nie wykazywała występowania wyładowań niezupełnych podczas polaryzacji podwyższonym napięciem w czasie 60 s oraz sygnałów emisji akustycznej w ciągu kilkadziesiąt sekund po zwarcu i rozładowaniu kondensatora. Stąd, można przypuszczać, że pomiary sygnałów emisji akustycznej według podanych warunków pozwalają oceniać jakość poszczególnych egzemplarzy kondensatorów.

Sygnał emisji akustycznej, rejestrowany podczas nawet kilkunastu kolejnych wyładowań niezupełnych, może być charakteryzowany za pomocą gęstości widmowej mocy  $S(f)$ , która pokazuje jakie składowe częstotliwościowe dominują w rejestrowanym sygnale [4]. Wadą takiej analizy jest trudny do określenia wpływ sprzężenia akustycznego między sensorem, a badanym kondensatorem, na intensywność  $S(f)$ . Warto podkreślić, że kurtoza  $\gamma_2$  sygnału



emisji akustycznej jest pozbawiona tej wady [45]. Wartość  $\gamma_2$  jest miarą różnicy rozkładu prawdopodobieństwa wartości chwilowych rejestrowanego sygnału od rozkładu normalnego. Można oczekiwać wzrostu wartości kurtozy, kiedy tylko dwie lub trzy harmoniczne dominują w zarejestrowanym sygnale, co odpowiada postaci rejestrowanych sygnałów emisji akustycznej [16, 18]. Na rys. 6.7 zamieszczono wartości kurtozy uzyskane w obu grupach badanych kondensatorów, dla sygnałów emisji akustycznej rejestrowanych w czasie 60 s podczas polaryzacji podwyższonym napięciem. W obu grupach obserwowano duże zróżnicowanie wartości kurtozy oraz gęstości widmowej mocy między poszczególnymi badanymi egzemplarzami (rys. 6.8).



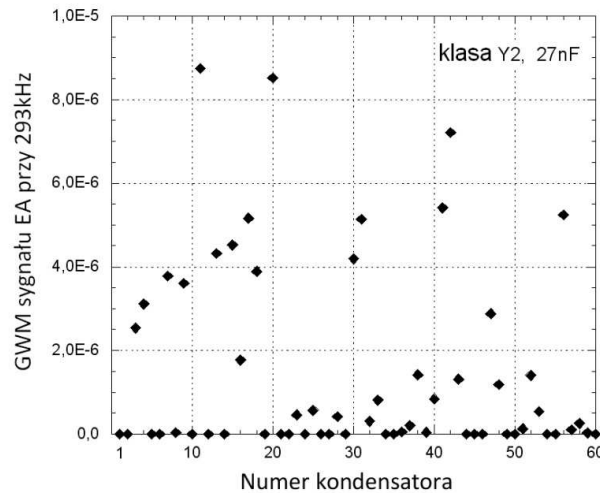
**Rys. 6.7.** Wartość kurtozy  $\gamma_2$  sygnałów emisji akustycznej rejestrowanej dla badanych grup kondensatorów o pojemności: a) 470 nF klasy X2, b) 27 nF klasy Y2

Przeprowadzone badania miały na celu stwierdzenie, czy za pomocą pomiarów sygnałów emisji akustycznej można przewidzieć degradację właściwości kondensatorów jaka następuje podczas próby trwałości. Do analizy wykorzystano współczynnik korelacji liniowej  $r_{xy}$ , który dla  $M$  par dwóch zmiennych wielkości  $x$ ,  $y$  wyznacza się z zależności [4]:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{m=1}^M (x_m - \bar{x})(y_m - \bar{y})}{\left[ \sum_{m=1}^M (x_m - \bar{x})^2 \cdot \sum_{m=1}^M (y_m - \bar{y})^2 \right]^{1/2}} \quad (6.1)$$

W przeprowadzonych analizach, jako zmienne losowe  $x$  i  $y$  przyjmowano wartości wyznaczanych parametrów badanych kondensatorów (np.  $R_{izol}$ ,  $\text{tg}\delta$  jako  $x$ , a  $\Delta C/C$ ,  $\tau_0$  jako  $y$  lub logarytmy z modułów tych parametrów).

Współczynnik korelacji  $r_{xy}$  może przyjmować wartości  $\langle -1 \div 1 \rangle$ . Skrajne wartości mogą wystąpić tylko w przypadku pełnej korelacji, czyli liniowej zależności między dwiema wielkościami. Gdy jest zachowany warunek  $0,1 < |r_{xy}| < 0,3$  to możemy uznać że zmienne  $x$  i  $y$  są skorelowane liniowo słabo. Natomiast dla  $0,3 < |r_{xy}| < 0,5$  mówimy o korelacji przeciętnej, a dla jeszcze wyższych wartości  $|r_{xy}|$  o korelacji wysokiej.



**Rys. 6.8.** Gęstość widmowa mocy (GWM) sygnałów emisji akustycznej (EA) przy częstotliwości 293 kHz rejestrowanej dla badanej grupy kondensatorów o pojemności 27 nF

W celu określenia czy niezerowa wartość współczynnika korelacji między dwiema zmiennymi  $x$  i  $y$  jest istotna statystycznie, należy sprawdzić czy estymowana wartość współczynnika korelacji wykracza poza przedział akceptacji hipotezy o zerowym współczynniku korelacji:

$$-z_{\alpha/2} \leq \frac{\sqrt{M-3}}{2} \ln \left( \frac{1+r_{xy}}{1-r_{xy}} \right) \leq z_{\alpha/2} \quad (6.2)$$

gdzie  $z_{\alpha/2}$  jest standaryzowaną zmienną losową o rozkładzie normalnym, a  $\alpha$  jest poziomem istotności (dla  $\alpha = 5\%$ ,  $z_{\alpha/2} = \pm 1,96$ ). Wartość  $M$ , podobnie jak poprzednio w równaniu (6.1), oznacza licznosc próby. Środkowa część nierówności (6.2) jest oznaczona jako  $z$  i jest zmienną losową o rozkładzie normalnym [4].

Należy podkreślić, że współczynnik korelacji liniowej znajduje zastosowanie, gdy zmienne  $x$ ,  $y$  mają rozkład normalny, co często uzyskuje się skalując (np. pierwiastkując, logarytmując) wybraną zmienną. W przypadku analizowanych danych, niektóre wyznaczone parametry miały rozkład znacząco różny od rozkładu normalnego. Jednak nawet w tym przypadku podjęto próbę analizy danych za pomocą współczynnika korelacji liniowej, ze

względem na brak konkurencyjnych metod przy ustalonej liczności próby  $M = 60$  badanych kondensatorów. Ponadto opisany przypadek dotyczył wyników uzyskanych dla próby trwałości 2000 h, które miały charakter badań wstępnych i zostały wykorzystane do określenia sposobu badań podczas przeprowadzania dłuższej próby trwałości dla tych samych typów kondensatorów. Wartości współczynnika korelacji liniowej  $r_{xy}$  oraz zmiennej losowej  $z$  wyznaczono dla różnych parametrów. Najistotniejsze wyniki przedstawiono w tabeli 6.3.

**Tab. 6.3.** Wartości współczynnika korelacji liniowej  $r_{xy}$  między rezystancją izolacji  $R_{izol}$  mierzoną po próbie trwałości 1000 h dla kondensatorów 470 nF i 2000 h dla kondensatorów 27 nF a parametrami sygnałów emisji akustycznej (kurtozy, gęstości widmowej mocy  $S(f)$ ) mierzonych w kondensatorach po ich wytworzeniu podczas próby wytrzymałości elektrycznej; w tabeli podano wartości unormowanej zmiennej losowej  $z$  wyznaczonej na podstawie wartości  $r_{xy}$ .

| Parametr sygnałów emisji akustycznej | 470 nF, X2 |        | 27 nF, Y2 |        |
|--------------------------------------|------------|--------|-----------|--------|
|                                      | $r_{xy}$   | $z$    | $r_{xy}$  | $z$    |
| kurtoza $\gamma_2$                   | -0,050     | -0,378 | -0,330    | -2,591 |
| $S(f)$ dla $f = 19,5$ kHz            | -0,072     | -0,546 | -0,359    | -2,835 |
| $S(f)$ dla $f = 293$ kHz             | -0,021     | -0,156 | -0,370    | -2,929 |

Wyniki wskazują na ujemną korelację między wybranymi parametrami rejestrowanych sygnałów emisji akustycznej a rezystancją izolacji mierzoną po próbie trwałości jedynie dla kondensatorów 27 nF [78]. Nie zaobserwowano znaczącej korelacji między zmianami pojemności  $C$  oraz  $\text{tg}\delta$  po próbie trwałości, a parametrami sygnałów emisji akustycznej. Podobne wyniki zanotowano dla kurtozy  $\gamma_2$  i gęstości widmowej mocy  $S(f)$  zarejestrowanych sygnałów emisji akustycznej przy częstotliwościach, gdzie występowały lokalne maksima, ustalone za pomocą analizy czasowo-częstotliwościowej (rys. 6.6). Ze względu na uszkodzenie znacznej liczby kondensatorów 470 nF, dla tych kondensatorów w przytoczonej analizie ograniczono się do wyników uzyskanych dla próby trwałości o czasie tylko 1000 h.

Z uzyskanych podczas badań wyników (tab. 6.3) można wnioskować, że w przypadku kondensatorów klasy Y2 występowanie intensywnych wyładowań niepełnych rejestrowanych w trakcie próby przepięciowej po ich wytworzeniu, oznacza podczas eksploatacji szybkie zmniejszanie się rezystancji izolacji. Ujemna korelacja występuje między  $R_{izol}$  a wszystkimi estymowanymi parametrami sygnałów emisji akustycznej (np. kurtozą, gęstością widmową mocy przy wybranych częstotliwościach).

### 6.1.3. Wyniki próby trwałości 4500 h

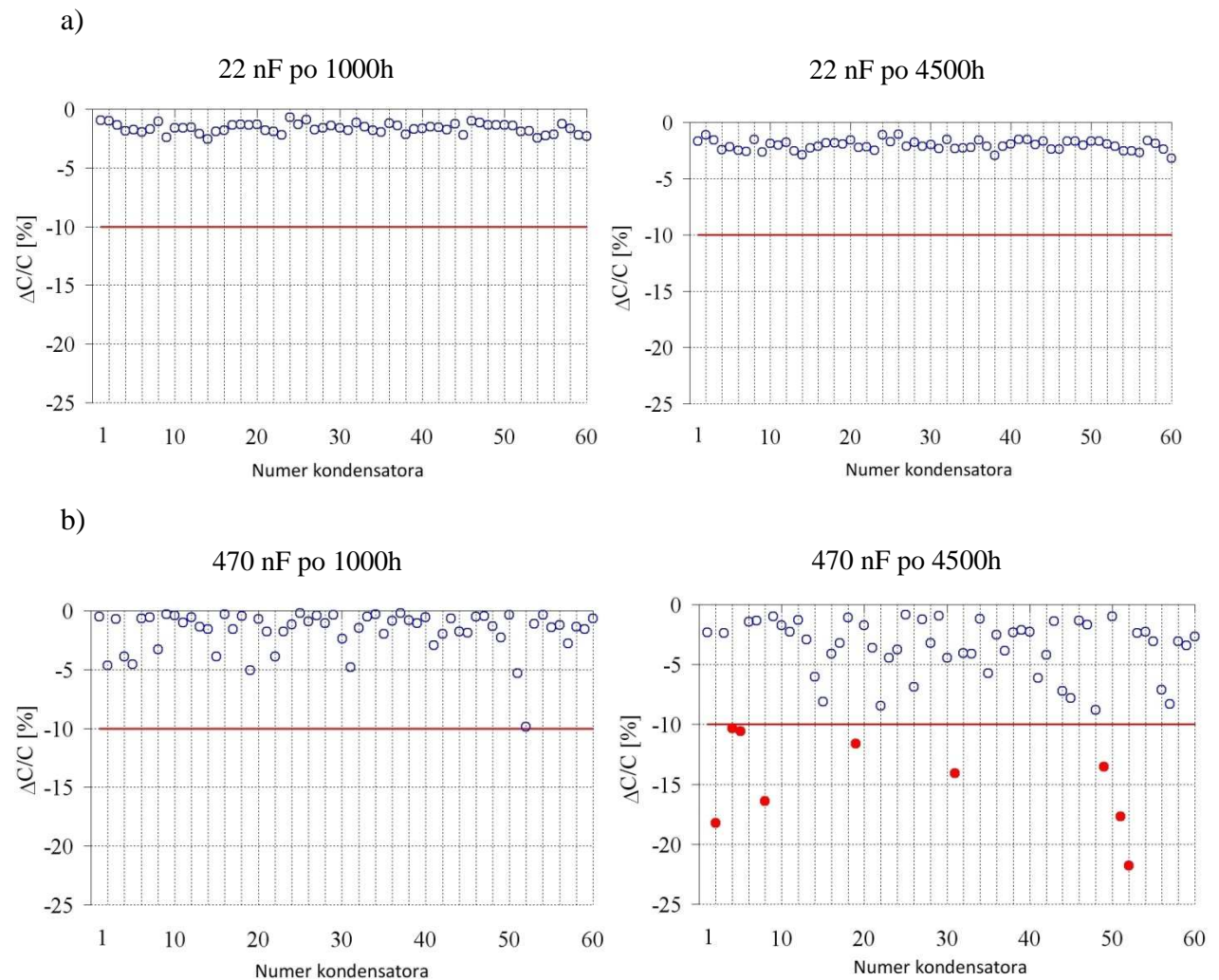
Analiza wyników uzyskanych po przeprowadzeniu próby trwałości 2000 h wskazała, że aby uzyskać pełniejszą informację o ewentualnej korelacji między parametrami kondensatorów mierzonymi po ich wytworzeniu, a ich parametrami po próbie trwałości, należy przeprowadzić dodatkowe pomiary, których nie przewidują obowiązujące normy. W związku z tym, próbie trwałości poddano nową grupę kondensatorów przeciwzakłóceńowych, po 60 sztuk z każdego typu przewidzianego do pracy przy napięciu zmiennym 275 V<sub>rms</sub>: 470 nF klasy X2 oraz 22 nF klasy Y2. Następnie wykonano pomiary większej niż dotychczas liczby parametrów, charakteryzujących badane kondensatory:

- pojemności  $C$ , współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  oraz rezystancji szeregowej  $R_s$  przy dwóch częstotliwościach 1 kHz i 10 kHz,
- pojemności  $C$  i współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  przy dwóch napięciach pomiarowych 100 V<sub>rms</sub> i 275 V<sub>rms</sub>,
- napięcia zapłonu  $u_z$  i napięcia gaśnięcia  $u_g$  wyładowań niezupełnych (tylko dla pojemności 470 nF),
- $R_{\text{izol}}$  dla napięć: 100 V, 200 V, 300 V, 400 V, 500 V, 600 V, 700 V dla pojemności 470 nF oraz 100 V, 500 V, 800 V dla pojemności 22 nF,
- sygnałów emisji akustycznej podczas polaryzacji nadmiarowym napięciem przez czas 60 s oraz po rozładowaniu.

Po pomiarach wstępnych przeprowadzono próbę trwałości zgodnie z opisem z punktu 4.1.3 wydłużając czas próby do 4500 h i wykonując pomiary pojemności  $C$  i współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  wielokrotnie w trakcie jej trwania. Te dodatkowe pomiary pozwoliły zidentyfikować lub w wielu przypadkach tylko ekstrapolować dla poszczególnych badanych kondensatorów czas próby trwałości, po którym pojemność spadła o 10% od wartości początkowej, co oznacza zgodnie z normą uznanie kondensatora za uszkodzony (według opisu dopuszczalnych zmian parametrów kondensatorów po przejściu próby trwałości, podanych w rozdz. 4.1.3). Wartość tego czasu przyjęto jako czas życia kondensatora pracującego w warunkach odpowiadających próbie trwałości. Szczegółowy sposób ekstrapolacji wartości tego czasu dla badanych kondensatorów przedstawiono w Dodatku A.

Pomiary parametrów kondensatorów po czasie próby wymaganym normą (1000 h) potwierdziły, że wszystkie badane egzemplarze kondensatorów spełniły wymagania stawiane przez obowiązującą normę – utrata ich pojemności nie przekroczyła w tym czasie 10%.

Po próbie trwałości 4500 h dziewięć kondensatorów 470 nF z grupy 60 egzemplarzy zmniejszyło swoją pojemność o co najmniej 10%. Dla pozostałych kondensatorów wyznaczono wartość czasu  $\tau_0$ , po którym kondensator utraci 10% swojej pojemności na podstawie ekstrapolacji zmian ich pojemności w trakcie próby trwałości (Dodatek A). Względne zmiany parametrów po 4500 h próby trwałości dla kondensatorów 470 nF są znacznie większe niż dla kondensatorów 22 nF (rys. 6.9). Podobne rezultaty uzyskano w badaniu dla próby trwałości 2000 h opisanej w poprzednim podrozdziale.



**Rys. 6.9.** Zmiany pojemności kondensatorów obserwowane po próbie trwałości o czasie 1000 h i 4500 h w kondensatorach o pojemności: a) 22 nF klasy Y2, b) 470 nF klasy X2; czerwoną linią ciągłą oznaczono wartość graniczną  $\Delta C/C = -10\%$

Dla populacji kondensatorów 470 nF klasy X2 przeanalizowano występowanie korelacji między wynikami pomiarów wstępnych wybranych parametrów kondensatorów ( $R_{izol}$ ,  $\text{tg}\delta$ ), a utratą pojemności lub czasem prawidłowej pracy  $\tau_0$  kondensatorów, określonym

na podstawie wyników podczas próby trwałości 4500 h. Wyznaczono współczynnik korelacji liniowej wybranych zmiennych przy założeniu normalności ich rozkładów.

Analizę rozpoczęto od testowania normalności rozkładu pomierzonych wartości. Znanych jest kilka testów analizujących rozkład badanej zmiennej. Przykładem takiego testu jest test  $\chi^2$  (Chi-kwadrat), który wymaga pomiarów próbki o większej liczności niż przyjęta jako równa 60, co ze względów ekonomicznych oraz czasu pomiarów było nie do zaakceptowania. Stąd, do analizy danych w pracy wykorzystano test Kołmogorowa-Smirnowa. Zaletą testu jest możliwość jego wykorzystania do badania rozkładu próbek o stosunkowo małej liczności, co miało miejsce w analizowanym przypadku. W teście wykorzystuje się statystykę  $\lambda_N$  dla liczności próby  $N$ , która porównuje dystrybuantę empiryczną  $F_N(x)$  z dystrybuantą  $F(x)$  odpowiadającą rozkładowi normalnemu:

$$\lambda_N = \sqrt{N}D_N = \sqrt{N} \sup_{-\infty < x < \infty} |F_N(x) - F(x)| \quad (6.3)$$

gdzie  $\lambda_N$  spełnia warunek

$$P(\lambda_N > \lambda_\alpha) = 1 - Q(\lambda) = \alpha, \quad (6.4)$$

$Q(\lambda)$  jest wartością dystrybuanty rozkładu określonego w twierdzeniu Kołmogorowa, a  $\alpha$  poziomem istotności testu [43]. Hipotezę zerową o rozkładzie normalnym analizowanych wartości odrzucamy na poziomie istotności  $\alpha$ , gdy:

$$\lambda_N = \sqrt{N}D_N > \lambda_\alpha, \quad (6.5)$$

a akceptujemy, gdy

$$\lambda_N = \sqrt{N}D_N \leq \lambda_\alpha. \quad (6.6)$$

Zgodnie z tablicą wartości rozkładu granicznego  $\lambda_\alpha$  dla poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  wartość progowa  $\lambda_{0,05} = 1,358$ .

Test Kołmogorowa-Smirnowa przeprowadzono dla parametrów zawartych w tab. 6.4. W tablicy przytoczono wartości rzeczywiste statystyk  $\lambda_N$  dla poszczególnych analizowanych zmiennych. Dla niektórych analizowanych zmiennych przeprowadzony test Kołmogorowa-Smirnowa nie pozwolił przyjąć hipotezy zerowej o rozkładzie normalnym ich wartości. W celu zapewnienia rozkładu normalnego wartościom analizowanych zmiennych dokonano ich przekształcenia stosując operację pierwiastkowania lub logarytmowania. Następnie przeprowadzono ponownie test Kołmogorowa-Smirnowa wyznaczając  $\lambda_N$  i oceniając skuteczność dokonanego przekształcenia, testując hipotezę zerową o rozkładzie normalnym tak zmienionych wartości.

Uzyskane wyniki po operacji pierwiastkowania lub logarytmowania danych pozwalają przyjąć, zgodnie z opisanym testem, że stosowane zmienne mają rozkład normalny. Bardziej skuteczna, ze względu na wyznaczone wartości  $\lambda_N$ , okazała się operacja logarytmowania (tab. 6.4). Dlatego w dalszej analizie przy obliczaniu wartości współczynnika korelacji liniowej stosowano logarytmowanie modułu odpowiednich wielkości ( $\text{tg}\delta$ ,  $R_{\text{izol}}$ ,  $\Delta C/C$ ,  $\tau_0$ ) [30].

W tabeli 6.5 zestawiono wyniki badania korelacji liniowej między wybranymi parametrami. W tabeli zamieszczono wartości współczynnika korelacji  $r_{xy}$  oraz zmiennej (statystyki)  $z$ , które świadczą o występowaniu znaczącej statystycznie korelacji między analizowanymi parametrami. Najistotniejszym wnioskiem jest występowanie korelacji wyników pomiarów wstępnych współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  i rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  z parametrami po próbie trwałości ( $\Delta C/C$ ,  $\tau_0$ ), gdy  $\text{tg}\delta$  i  $R_{\text{izol}}$  są mierzone przy wyższych napięciach, niż jest to przewidywane normą (rys. 6.10, rys. 6.11). Dla tych przypadków występuje dodatnia liniowa korelacja (np.  $r_{xy} \cong 0,38$ , gdy  $x = \log\{\text{tg}\delta\}$  i  $y = \log\{|\Delta C/C|\}$ ) między wartościami logarytmów ze współczynnika strat dielektrycznych mierzonych po wytworzeniu kondensatorów a logarytmem z modułu względnej zmiany pojemności rejestrowanej po próbie trwałości lub między logarytmem rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  a logarytmem czasu  $\tau_0$  poprawnej pracy kondensatora. Natomiast ujemna korelacja liniowa występuje między logarytmem z wartości  $\text{tg}\delta$  mierzonych po wytworzeniu kondensatorów a logarytmem z czasu  $\tau_0$  lub między logarytmem rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  mierzonej także po wytworzeniu kondensatorów a logarytmem z modułu względnej zmiany ich pojemności po próbie trwałości.

Różny znak współczynnika korelacji liniowej odpowiada charakterowi badanych powiązań. Przykładowo, duża wartość  $R_{\text{izol}}$  oznacza dłuższy czas poprawnej pracy (dodatnia korelacja) i jednocześnie mniejsze zmiany pojemności po próbie trwałości (ujemna korelacja).

Zgodnie z normą dla tego typu kondensatorów, pomiar współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  powinien być mierzony przy napięciu polaryzacji o wartości skutecznej 1 V, a pomiar  $R_{\text{izol}}$  przy stałym napięciu 100 V. Jak widać z wyników przytoczonych na rys. 6.10 warto wykonać pomiary wartości  $\text{tg}\delta$  przy wyższym napięciu, ponieważ wzrasta wówczas korelacja między wynikami takich pomiarów, a wynikami np. zmiany pojemności  $\Delta C/C$ , czy też czasu poprawnej pracy  $\tau_0$  podczas próby trwałości. Podobne wyniki uzyskano dla pomiarów  $R_{\text{izol}}$  charakteryzujących degradację dielektryka w kondensatorach (rys. 6.11).

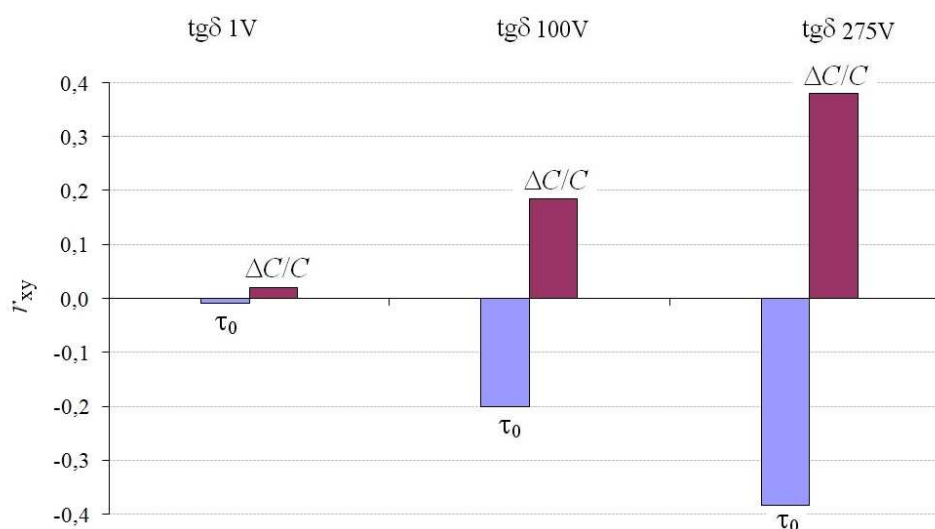
**Tab. 6.4.** Wyniki testu Kołmogorowa-Smirnowa analizowanych zmiennych uzyskanych podczas pomiarów wstępnych po zakończeniu próby trwałości 4500 h kondensatorów 470 nF; przyjęto poziom istotności  $\alpha = 0,05$ , co odpowiada granicznej wartości statystyki  $\lambda_{0,05} = 1,358$

| Lp. | Pomierzona zmienna losowa  | Wyniki dla wartości zmierzonych |                 | Wyniki dla pierwiastka z wartości zmierzonych |                 | Wyniki dla logarytmu z wartości zmierzonych |                 |
|-----|--|---------------------------------|-----------------|---|-----------------|---|-----------------|
|     |  | $\lambda_N$                     | Hipoteza zerowa | $\lambda_N$                                   | Hipoteza zerowa | $\lambda_N$                                 | Hipoteza zerowa |
| 1   | <b>tg<math>\delta</math></b> mierzony przy 100 V                     | 0,643                           | Przyjęta        | 0,713   | Przyjęta        | 0,775                                       | Przyjęta        |
| 2   | <b>tg<math>\delta</math></b> mierzony przy 275 V                     | 0,844                           | Przyjęta        | 0,751   | Przyjęta        | 0,658                                       | Przyjęta        |
| 3   | <b><math>R_{i200}</math></b> mierzona przy 100 V                     | 1,634                           | Odrzucona       | 1,410   | Odrzucona       | 1,255                                       | Przyjęta        |
| 4   | <b><math>R_{i200}</math></b> mierzona przy 200 V                     | 1,526                           | Odrzucona       | 1,348   | Przyjęta        | 1,154                                       | Przyjęta        |
| 5   | <b><math>R_{i200}</math></b> mierzona przy 400 V                     | 1,046                           | Przyjęta        | 1,131   | Przyjęta        | 1,232                                       | Przyjęta        |
| 6   | <b><math>R_{i200}</math></b> mierzona przy 600 V                     | 0,984                           | Przyjęta        | 1,022   | Przyjęta        | 1,046                                       | Przyjęta        |
| 7   | <b><math>R_{i200}</math></b> mierzona przy 700 V                     | 1,038                           | Przyjęta        | 0,953   | Przyjęta        | 0,945                                       | Przyjęta        |
| 8   | <b><math>R_{i200}</math></b> mierzona po próbie trwałości przy 100 V | 1,696                           | Odrzucona       | 1,232   | Przyjęta        | 0,713                                       | Przyjęta        |
| 9   | <b><math>\Delta C/C</math></b> po próbie trwałości 4500 h            | 1,774                           | Odrzucona       | 1,216   | Przyjęta        | 0,558                                       | Przyjęta        |
| 10  | czas <b><math>\tau_0</math></b> poprawnej pracy                      | 1,270                           | Przyjęta        | 0,651   | Przyjęta        | 0,604                                       | Przyjęta        |



**Tab. 6.5.** Wartości zmiennej losowej  $z$  wyznaczonej na podstawie współczynnika korelacji liniowej  $r_{xy}$  między wynikami pomiarów wstępnych, a wynikami pomiarów po próbie trwałości 4500 h wybranych parametrów kondensatorów 470 nF; moduły pomierzonych wartości zostały poddane logarytmowaniu

| Wielkość mierzona podczas pomiarów wstępnych | Wielkość mierzona po próbie trwałości 4500 h | $z$   | $r_{xy}$ |
|--|--|-------|----------|
| tg $\delta$ przy polaryzacji 270 V/50 Hz     | Czas $\tau_0$ poprawnej pracy                | -3,05 | -0,384   |
| tg $\delta$ przy polaryzacji 270 V/50 Hz     | Względna zmiana pojemności $\Delta C/C$      | 3,01  | 0,380    |
| $R_{izol}$ przy polaryzacji 600 V            | Czas $\tau_0$ poprawnej pracy                | 2,37  | 0,304    |
| $R_{izol}$ przy polaryzacji 600 V            | Względna zmiana pojemności $\Delta C/C$      | -2,54 | -0,325   |
| $R_{izol}$ przy polaryzacji 700 V            | Czas $\tau_0$ poprawnej pracy                | 2,33  | 0,300    |
| $R_{izol}$ przy polaryzacji 700 V            | Względna zmiana pojemności $\Delta C/C$      | -2,53 | -0,323   |

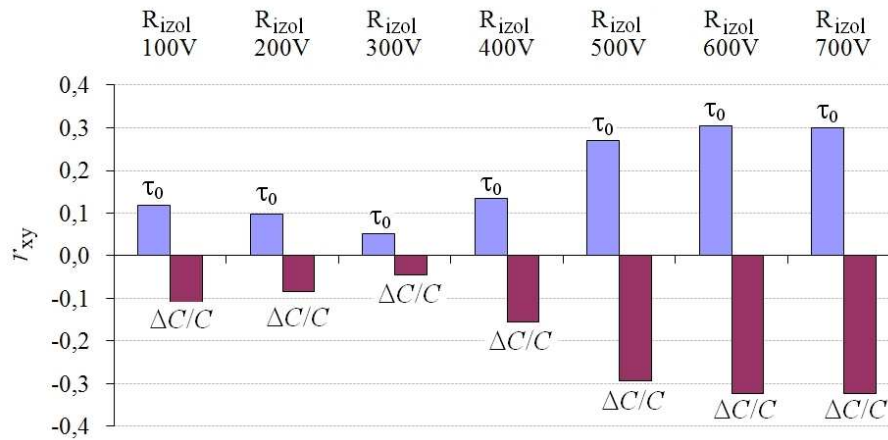


**Rys. 6.10.** Wartości współczynnika korelacji liniowej  $r_{xy}$  między wynikami pomiarów wstępnych współczynnika strat dielektrycznych tg $\delta$  mierzonego przy różnych napięciach, a zmianami pojemności  $\Delta C/C$  po próbie trwałości kondensatorów 470 nF oraz czasem poprawnej pracy  $\tau_0$ ; moduły zmiennych tg $\delta$ ,  $\Delta C/C$ ,  $\tau_0$  zostały poddane logarytmowaniu przy wyznaczaniu  $r_{xy}$

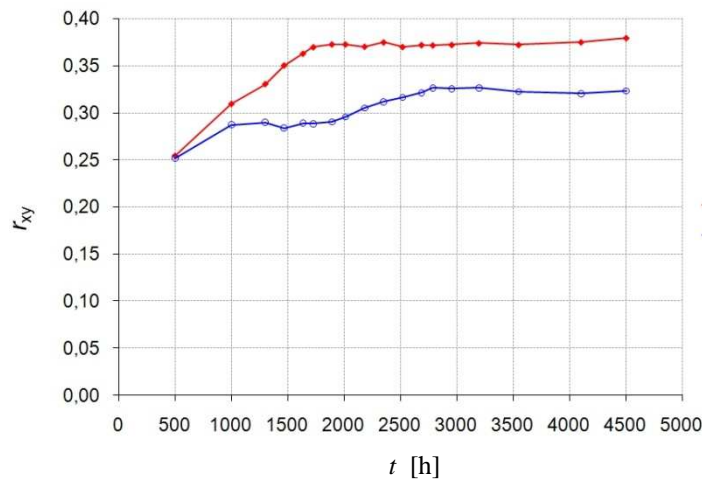
Zaobserwowano ponadto, że korelacja między niektórymi parametrami pomierzonymi po wytworzeniu a ubytkiem pojemności zmienia się w trakcie próby (rys. 6.12). Wartość współczynnika korelacji rośnie, gdy czas próby nie przekracza 3000 h.

Na rys. 6.13 przedstawiono wyniki zależności między gęstością widmową mocy sygnału emisji akustycznej dla ustalonej częstotliwości a wartościami czasu  $\tau_0$ , po upływie którego kondensator utracił 10% swojej pojemności. Analizując przytoczone wyniki nie można stwierdzić występowania jednoznacznej zależności między obiema wielkościami. Podobne

rezultaty uzyskano, gdy badano związki między wartościami  $\tau_0$  a  $S(f)$  przy innych częstotliwościach, niż podana na rys. 6.13 lub wartościami kurtozy.



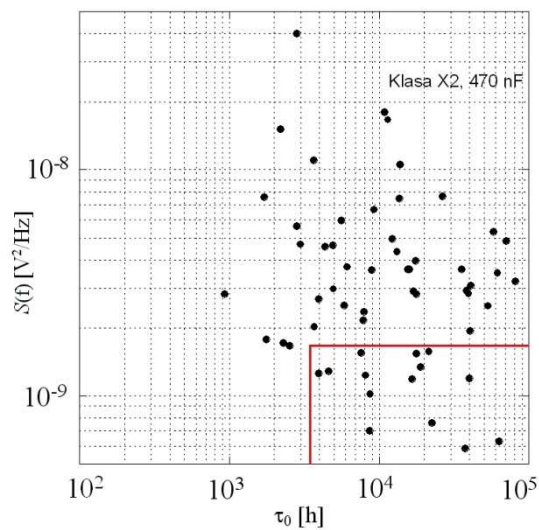
**Rys. 6.11.** Wartości współczynnika korelacji liniowej  $r_{xy}$  między wynikami pomiarów wstępnych rezystancji izolacji  $R_{izol}$  zmierzonej przy różnych napięciach, a zmianami pojemności  $\Delta C/C$  po próbie trwałości oraz czasem poprawnej pracy  $\tau_0$  kondensatorów 470 nF; moduły zmiennych  $R_{izol}$ ,  $\Delta C/C$ ,  $\tau_0$  zostały poddane logarytmowaniu przy wyznaczaniu  $r_{xy}$



**Rys. 6.12.** Wartości współczynnika korelacji liniowej  $r_{xy}$  między zmianami pojemności kondensatorów 470 nF w trakcie czasu  $t$  próby trwałości a wynikami pomiarów wstępnych: 1 –  $\text{tg}\delta$  275 V, 2 –  $R_{izol}$  700 V; wszystkie dane zostały poddane logarytmowaniu przy wyznaczaniu  $r_{xy}$

Wydaje się, że w przypadku egzemplarzy charakteryzujących się dużą intensywnością sygnałów emisji akustycznej, podobnie jak w przypadku kondensatorów silnikowych o pojemności 7,5  $\mu\text{F}$ , w zwijce folii był szereg miejsc, w których występowały wyładowania niezupełne. Można przypuszczać, że czas  $\tau_0$  był krótszy gdy lokalizacja tych miejsc dotyczyła ograniczonego obszaru powodując bardziej intensywne przegrzewanie się dielektryka,

zjawiska samoregeneracji i szybszą utratę pojemności kondensatora, w szczególności, gdy obszar wyładowań niezupełnych był w pobliżu jednego z czoł zwijki folii.



**Rys. 6.13.** Zależność między gęstością widmową mocy  $S(f)$  sygnału emisji akustycznej przy częstotliwości 97,6 kHz a czasem  $\tau_0$ , w którym kondensator zmniejszył swoją pojemność o 10% podczas próby trwałości

W przypadku, gdy intensywność sygnału emisji akustycznej była względnie mała, to wówczas wartości czasu poprawnej pracy  $\tau_0$  wzrastały wielokrotnie. Przykładowo, na rys. 6.13 w dolnym prawym rogu, zaznaczono obszar, dla którego gęstość widmowa mocy sygnału mierzonego na wyjściu układu pomiarowego z czujnikiem piezoelektrycznym nie przekraczała arbitralnie ustalonej wartości  $1,6 \cdot 10^{-9} \text{ V}^2/\text{Hz}$ . Wówczas dla egzemplarzy kondensatorów spełniających ten warunek, wartości  $\tau_0$  były kilkukrotnie większe, niż wymagane normą podczas próby. Ponadto, w tej grupie kondensatorów mniejszym wartościom gęstości widmowej mocy sygnału emisji akustycznej odpowiadały średnio większej wartości  $\tau_0$ .

Uwzględniając wyniki szczegółowej analizy uszkodzeń w kondensatorach można przyjąć, że przy małej liczbie wyładowań niezupełnych w kondensatorze, miejsca w których występują są z dużym prawdopodobieństwem rozproszone na całej długości stosowanej folii dielektryka i nie będą powodowały zjawisk samoregeneracyjnych i dużych zmian pojemności. Natomiast w przypadku dużej liczby wyładowań niezupełnych, prawdopodobieństwo, że wystąpią one w niewielkim obszarze folii wzrasta. Ponadto, gdy wyładowania niezupełne pojawią się przy krawędzi folii i spowodują samoregenerację degradującą połączenie metalizacji folii z czołem zwijki, wystąpią duże zmiany pojemności kondensatora. Jednocześnie, duża liczba wyładowań niezupełnych rozłożonych na całej

długości folii nie musi prowadzić do samoregeneracji i znacznych ubytków w pojemności kondensatora. Stąd, tak duży rozrzut wartości  $\tau_0$  i  $S(f)$  dla egzemplarzy, w których rejestrowano względnie intensywne sygnały emisji akustycznej.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów można zaproponować test, w którym warunkiem wysokiej jakości kondensatora jest dostatecznie mała intensywność sygnału emisji akustycznej rejestrowanej podczas testu przy polaryzacji nadmiarowym napięciem kondensatora lub zaraz po rozładowaniu, gdy sygnały emisji akustycznej występują w obszarach gromadzenia się ładunku szczątkowego. Proponowany sposób oceny jakości kondensatorów stał się przedmiotem zgłoszenia patentowego [P1].

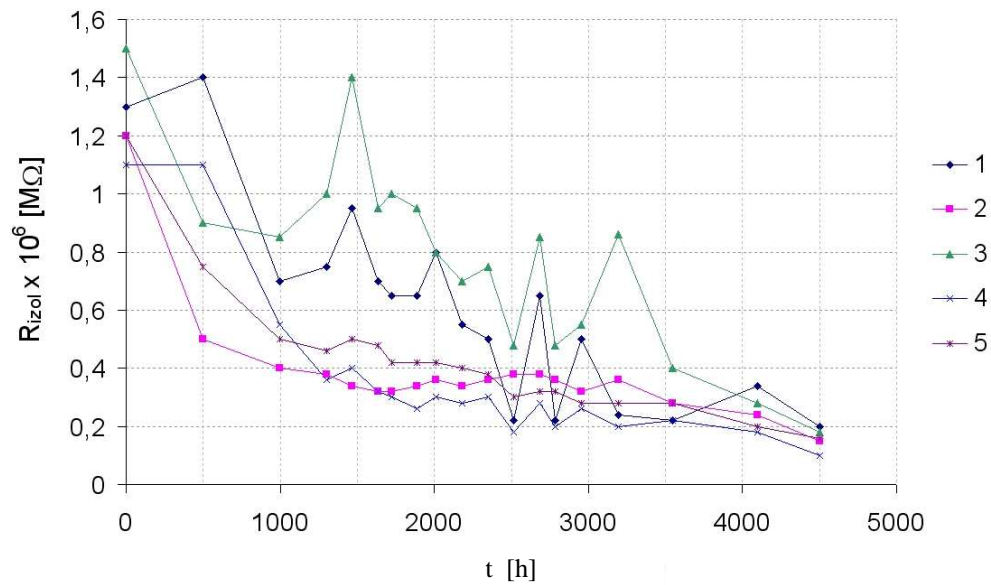
#### 6.1.4. Analiza uszkodzeń w kondensatorach po próbie trwałości 4500 h

Podczas próby trwałości o czasie 4500 h obserwowano identyczne rodzaje uszkodzeń w badanych kondensatorach, jak w przypadku próby trwałości 2000 h, które opisano szczegółowo w podrozdziale 6.1.1. Główną przyczyną utraty pojemności w kondensatorach podczas próby trwałości 2000 h były wadliwie wykonane połączenia warstwy metalizacji czoła z metalizacją folii. Podobne rezultaty uzyskano podczas kolejnej próby, przy czym przy dłuższych czasach jej trwania za ubytki pojemności zaczynały być także odpowiedzialne zjawiska licznych samoregeneracji w objętości całej folii.

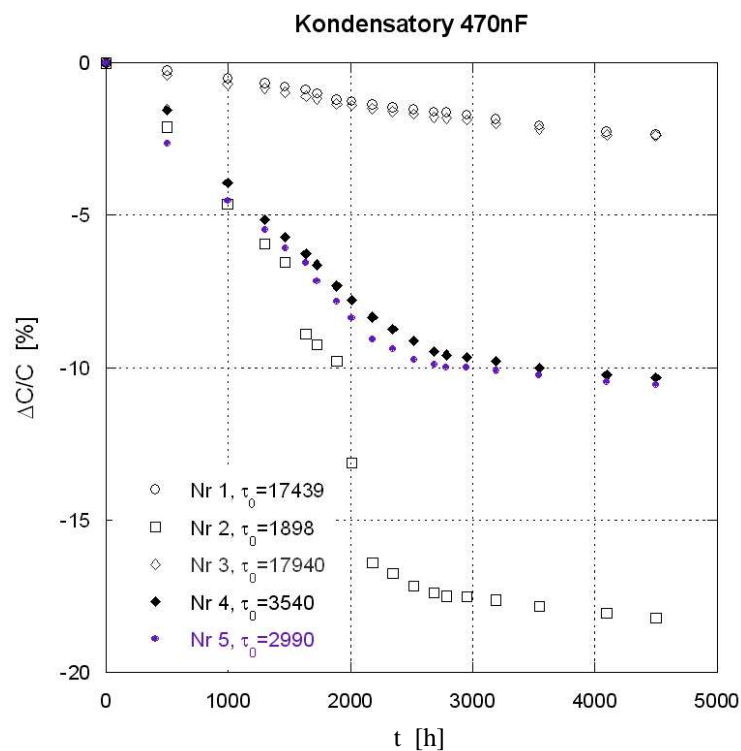
Do szczegółowej analizy wybrano pięć egzemplarzy kondensatorów 470 nF charakteryzujących się skrajnymi zmianami pojemności w badanej grupie (tab. 6.6). Kondensatory nr 1 oraz nr 3 wykazywały podczas pomiarów pośrednich znaczące zmiany wartości rezystancji izolacji  $R_{izol}$  (rys. 6.14). Jej wartość wzrastała lub malała w trakcie trwania próby. Jednocześnie w tych egzemplarzach zmiany pojemności są znacząco mniejsze i zależą praktycznie liniowo od czasu trwania próby (rys. 6.15).

**Tab. 6.6.** Zmiany pojemności  $\Delta C/C$  po próbie trwałości o czasie trwania 4500 h dla wybranych egzemplarzy kondensatorów 470 nF klasy X2

| Nr | $\Delta C/C$ [%] |
|----|------------------|
| 1  | -2,2             |
| 2  | <b>-18,1</b>     |
| 3  | -2,3             |
| 4  | <b>-10,2</b>     |
| 5  | <b>-10,5</b>     |



**Rys. 6.14.** Zmiany rezystancji izolacji  $R_{izol}$  podczas czasu  $t$  próby trwałości 4500 h dla pięciu wybranych kondensatorów 470 nF klasy X2 (tab. 6.6)

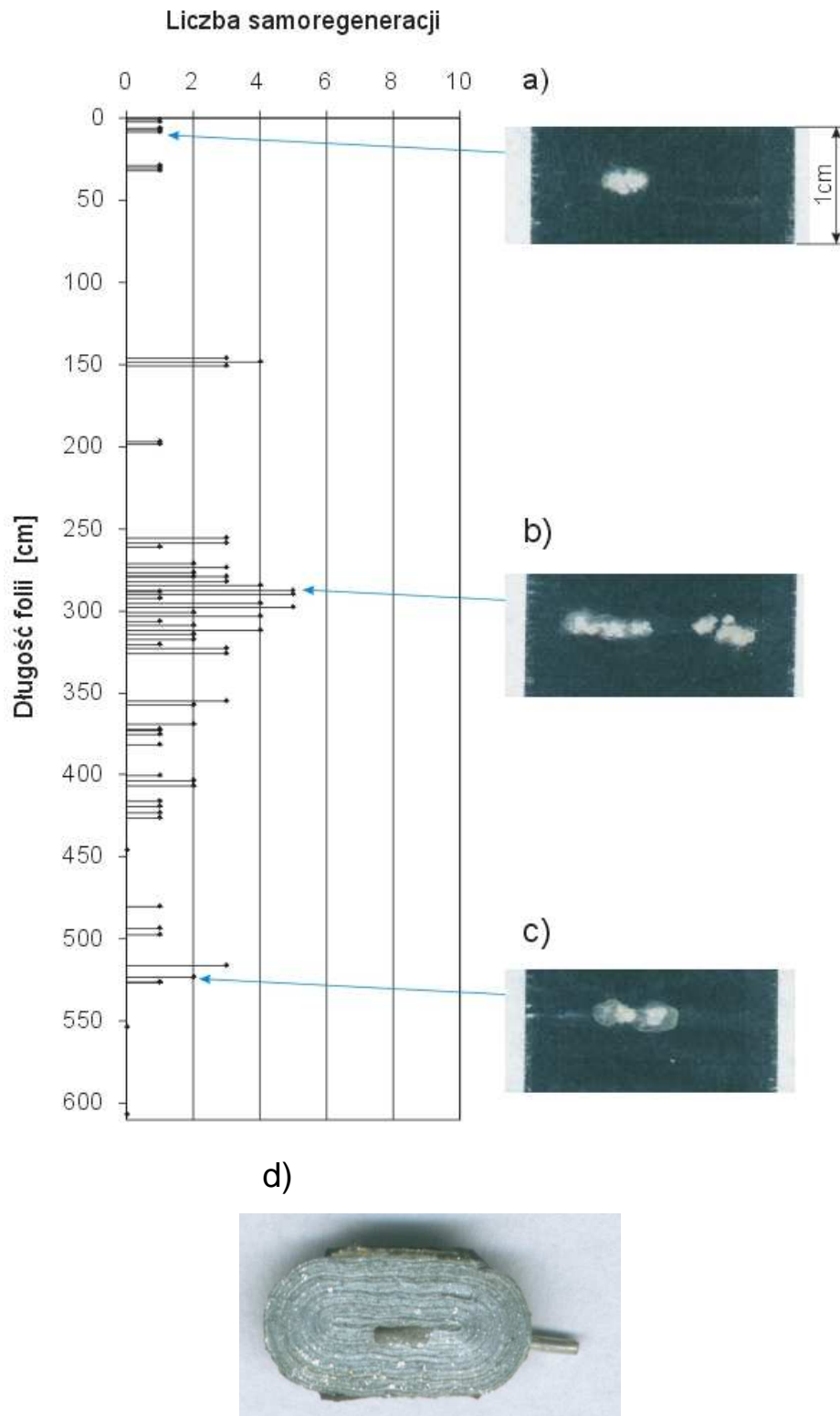


**Rys. 6.15.** Względne zmiany pojemności  $\Delta C/C$  w funkcji czasu  $t$  próby trwałości dla pięciu wybranych kondensatorów klasy X2 o pojemności 470 nF

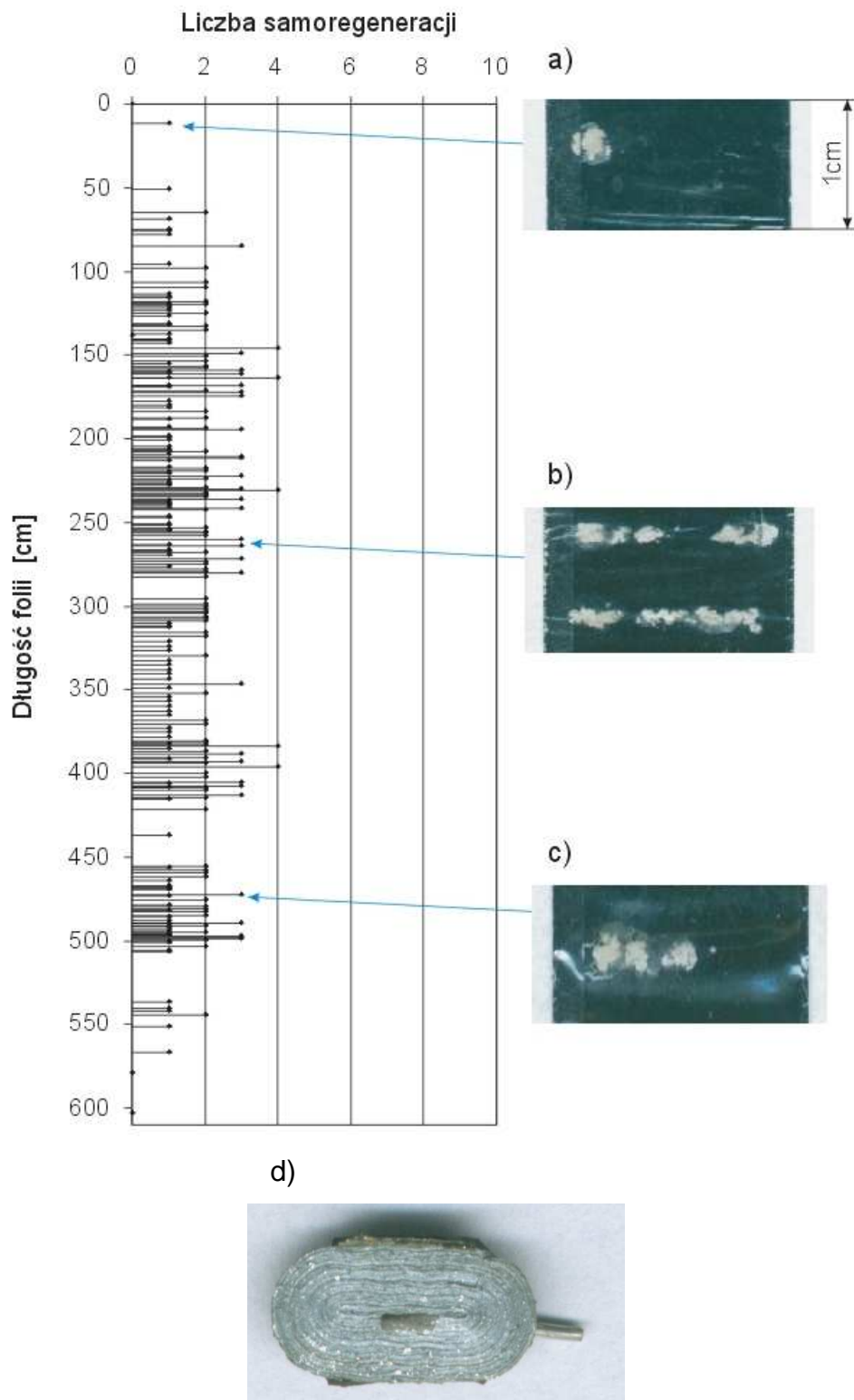
W kondensatorach nr 2, 4 oraz 5 zmiany rezystancji izolacji mają charakter krzywej monotonicznej opadającej do pewnej wartości minimalnej. Jednocześnie zmiany ich pojemności są znacznie szybsze w trakcie próby trwałości.

Wahania rezystancji izolacji  $R_{izol}$  dla kondensatorów nr 1 i nr 3 można wytłumaczyć zachodzącymi w nich procesami samoregeneracji, które nie powodują trwałego zmniejszania rezystancji izolacji. Taki proces gdy ma charakter lokalny, prowadzi do przegrzania dielektryka jedynie w niewielkim obszarze, co nie wpływa istotnie na degradację jego cech fizycznych. Natomiast ciągły spadek rezystancji izolacji w kondensatorach nr 2, 4 oraz 5 może być związany z procesami samoregeneracji skupionymi w małej objętości dielektryka, co powoduje znaczny chwilowy wzrost temperatury w tym obszarze i trwałe zmiany rezystancji izolacji dielektryka.

W celu potwierdzenia tych hipotez przeprowadzono dla trzech kondensatorów szczegółową analizę zmian jakie zaszły w metalizowanej folii podczas starzenia. Spośród pięciu egzemplarzy (tab. 6.6) wybrano dwa (nr 1 i nr 2) ze skrajnymi zmianami pojemności i jeden (nr 4) ze środkową wartością tych zmian. W kondensatorze nr 1 wystąpiło najmniej przebiegów samoregeneracyjnych (ok. 120), a ich częstotliwość występowania na jednostkę długości okładziny była najmniejsza (rys. 6.16). Taki rozkład nie był w stanie spowodować rozległego wzrostu temperatury w zwijce i znaczącej zmiany właściwości dielektryka. Zmiana pojemności dla tego kondensatora była nieznaczna. W kondensatorze nr 4 liczba samoregeneracji była znacznie wyższa (ok. 380), co spowodowało już istotną zmianę pojemności (ponad 10%). W tym egzemplarzu nie wystąpiło uszkodzenie połączenia metalizacji folii z metalizacją czoła (rys. 6.17). Obserwowane ubytki metalizacji folii były rozłożone dość równomiernie na jej całej powierzchni. Największą zmianę pojemności wśród szczegółowo analizowanych egzemplarzy wykazał kondensator nr 2 (ponad 18%). Zmiana była spowodowana dużą liczbą samoregeneracji (ok. 560), z których znaczna część była zlokalizowana na odcinku (~55 cm) folii w jej środkowej części (rys. 6.18). Samoregeneracje te doprowadziły do utraty kontaktu między częścią folii a warstwą metalizacji kontaktu. Ten fragment folii został oddzielony elektrycznie od reszty kondensatora i stąd nastąpiła duża utrata jego pojemności. Na podstawie rys. 6.15 można stwierdzić, że w czasie próby trwałości między 1500 h a 2300 h, gdy obserwowano gwałtowny spadek pojemności, w kondensatorze nastąpiło oddzielenie się wcześniej opisanych fragmentów folii. Dalsze zmiany pojemności miały podobny charakter jak w pozostałych opisywanych kondensatorach.

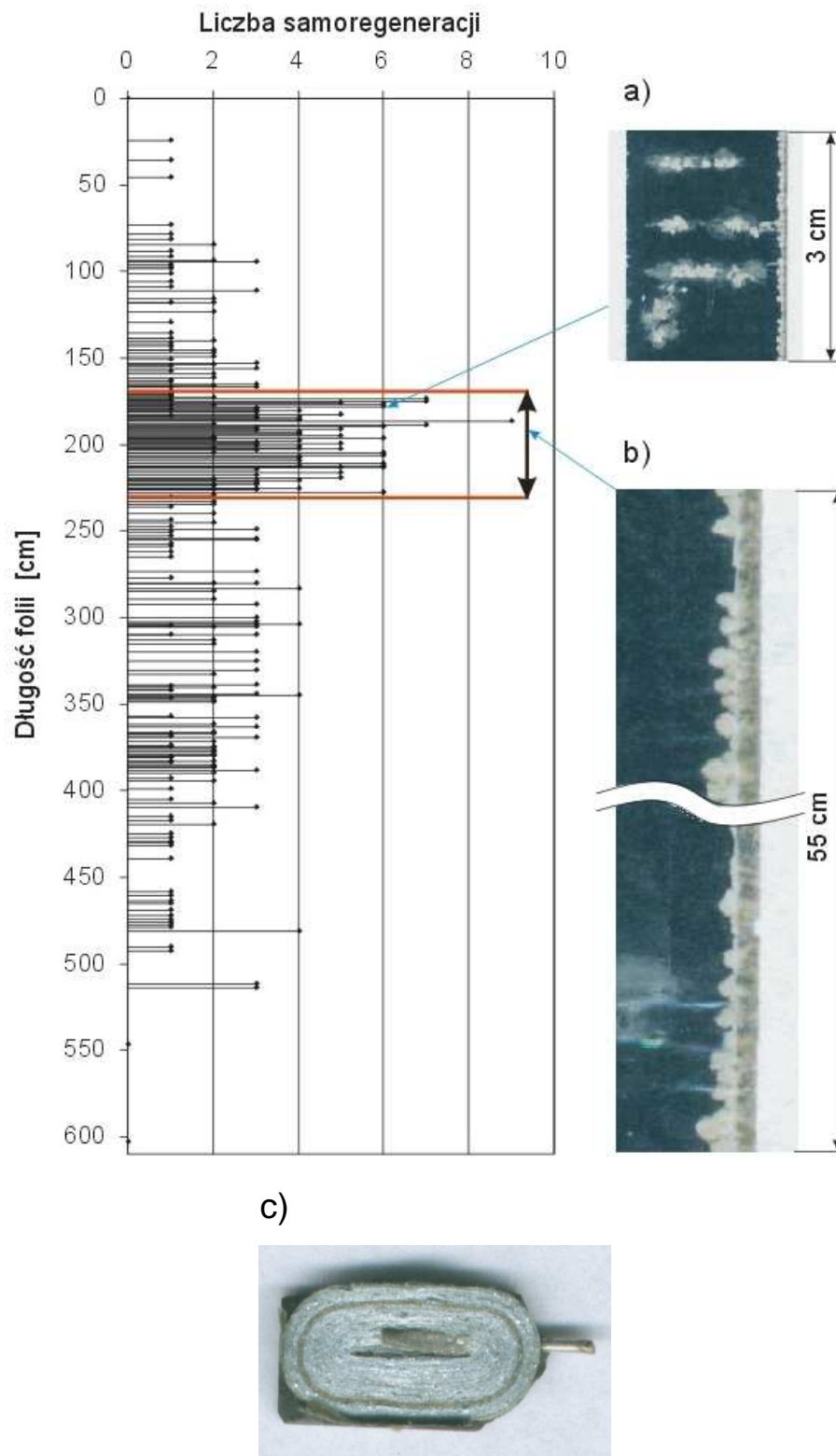


**Rys. 6.16.** Liczba samoregeneracji i ich rozłożenie na powierzchni folii kondensatora 470 nF nr 1: a) pojedyncza samoregeneracja na początku zwijki, b) kilka samoregeneracji w obszarze środkowym zwijki, c) pojedyncze samoregeneracje w końcowym obszarze zwijki, d) powierzchnia metalizacji czoła zwijki z brakiem brązowych odbarwień potwierdzającym dobry kontakt metalizacji folii z metalizacją czoła; łączną liczbę samoregeneracji oszacowano na 120



**Rys. 6.17.** Liczba samoregeneracji i ich rozłożenie na powierzchni folii kondensatora 470 nF nr 4: a) pojedyncza samoregeneracja na początku zwijki, b) kilkanaście samoregeneracji w obszarze środkowym zwijki, c) samoregeneracje w końcowym obszarze zwijki, d) powierzchnia metalizacji czoła zwijki z brakiem brązowych odbarwień potwierdzających dobry kontakt metalizacji folii z metalizacją czoła; łączną liczbę samoregeneracji oszacowano na 380





**Rys. 6.18.** Liczba samoregeneracji i ich rozłożenie na powierzchni folii kondensatora 470 nF nr 2: a) liczne samoregeneracje w środkowym obszarze zwijki, b) ubytki metalizacji folii w miejscu jej połączenia z metalizacją czoła, c) powierzchnia metalizacji czoła zwijki z widocznymi brązowymi odbarwieniami występującymi na całym obwodzie, co świadczy o zniszczeniu kontaktu metalizacji folii z metalizacją czoła; kolorem czerwonym oznaczono 55 cm odcinek folii w którym wystąpiły znaczące ubytki metalizacji folii; łączną liczbę samoregeneracji oszacowano na 560

Podsumowując wyniki analizy uszkodzeń w wybranych egzemplarzach kondensatorów można przyjąć, że najbardziej znaczącą przyczyną utraty pojemności w kondensatorach foliowych jest utrata kontaktu między krawędzią folii a metalizacją czoła zwijki. Dodatkowo, w przykładowych analizowanych szczegółowo egzemplarzach utrata tego kontaktu następowała w sposób praktycznie ciągły na badanym odcinku folii.

## 6.2. Badania trwałości kondensatorów silnikowych

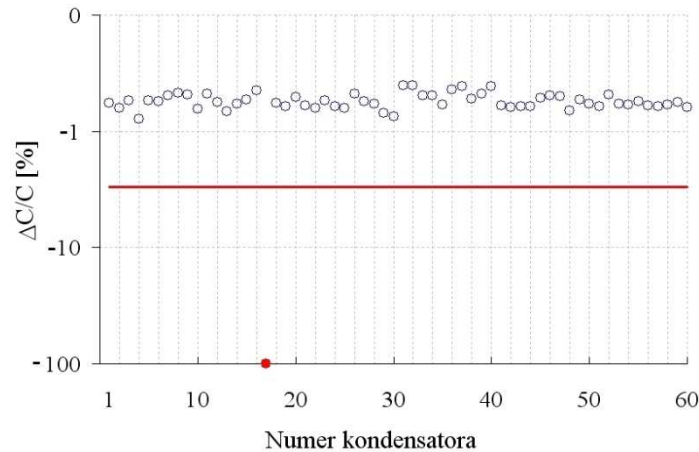
Do badań wybrano 60 sztuk kondensatorów silnikowych o pojemności  $7,5 \mu\text{F}$ , przeznaczonych do pracy przy napięciu znamionowym  $U_N = 425 \text{ V}/50 \text{ Hz}$  i przewidywanym bezawaryjnym czasie pracy 30 000 h (klasa pracy A). Po wytworzeniu kondensatorów przeprowadzono szczegółowe pomiary ich parametrów w celu porównania z wynikami po próbie trwałości, aby ocenić możliwość predykcji ich jakości. Wykonano pomiary następujących wielkości:

- pojemności  $C$ , współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$ , rezystancji szeregowej  $R_S$  przy polaryzacji napięciem  $1 \text{ V}_{\text{rms}}$  o częstotliwości 1 kHz,
- pojemności  $C$ , współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  przy polaryzacji napięciem o wartości skutecznej 100 V, 200 V, 300 V, 425 V, 600 V, 850 V i częstotliwości 50 Hz,
- rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  przy polaryzacji napięciem stałym o wartości 50 V, 100 V, 200 V, 300 V, 400 V, 600 V, 800 V.

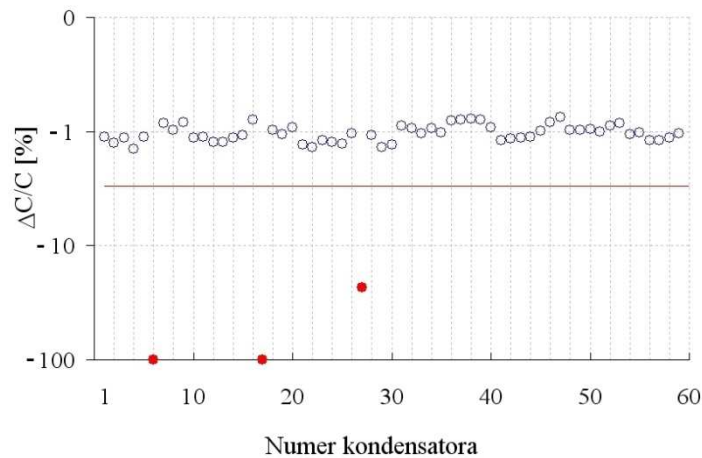
Próbie trwałości wykonano doprowadzając do kondensatorów napięcie  $U = 1,35U_N = 573,75 \text{ V}_{\text{rms}}$ . Badane kondensatory podczas próby umieszczono w temperaturze  $+85^\circ\text{C}$ . Zgodnie z normą PN-EN 60252-1, czas badania dla tego typu kondensatorów wynosi 3000 h, a maksymalna dopuszczalna zmiana pojemności po tym czasie wynosi  $|\Delta C/C| \leq 3\%$ . Próbie trwałości przedłużono do 6000 h. W trakcie próby wykonano pomiary parametrów kondensatorów po czasie 2000 h, 3000 h, 5000 h, 6000 h. Po zakończeniu próby trwałości ponownie pomierzono parametry badanych kondensatorów. Obserwowane zmiany pojemności przedstawiono na rys. 6.19. Kondensatory po próbie 3000 h (rys. 6.19a) wykazały średnią zmianę pojemności  $-0,56\%$ . Przedłużenie próby do 6000 h (rys. 6.19b) zwiększyło średni spadek pojemności do  $-1,05\%$ , po odrzuceniu wyników dla wadliwych sztuk (tab. 6.7).

Kondensatory nr 6, nr 17 i nr 27 (rys. 6.19b) znacząco zmniejszyły swoją pojemność. Określenie czasu uszkodzenia kondensatorów odbyło się na podstawie obserwacji ich wyglądu oraz prądu pobieranego przez nie w trakcie próby. Kondensatory badanego typu P2 posiadają mechaniczny bezpiecznik ciśnieniowy, który odłącza zwijkę kondensatora podczas wzrostu ciśnienia w jego wnętrzu. Ciśnienie wzrasta podczas samoregeneracji lub przebicia dielektryka w zwijce folii, gdy w wyniku wysokiej temperatury wydzielają się gazy.

a)



b)



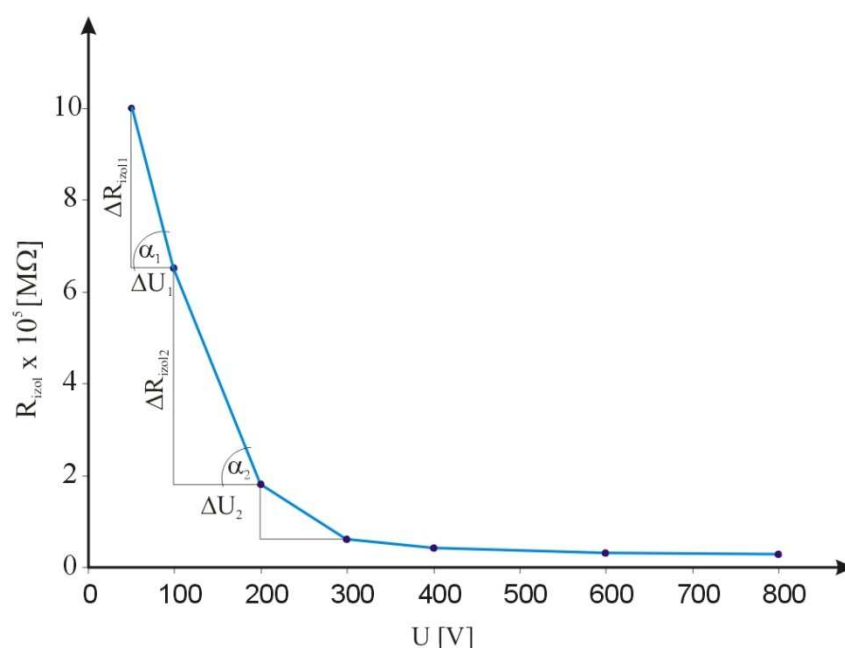
**Rys. 6.19.** Zmiany pojemności badanych kondensatorów po próbie trwałości: a) 3000 h, b) 6000 h; ciągłą linią oznaczono dopuszczalną normą poziom zmian pojemności  $\Delta C/C = -3\%$

**Tab. 6.7.** Opis uszkodzeń obserwowanych w kondensatorach  $7,5 \mu\text{F}$  podczas próby trwałości; pomiar pojemności  $C$  wykonano przy polaryzacji napięciem zmiennym  $1 V_{\text{rms}}$  o częstotliwości  $1 \text{ kHz}$

| Numer próbki | Moment wystąpienia uszkodzenia [h] | Pojemność zwijki po zdemontowaniu obudowy $C [\mu\text{F}]$ | $\Delta C/C [\%]$ |
|--------------|------------------------------------|---|-------------------|
| 6            | 4640                               | Przebiecie dielektryka                                      | -100              |
| 17           | 2910                               | Przebiecie dielektryka                                      | - 100             |
| 27           | 5820                               | <b>5,720</b>  | <b>-23,69</b>     |

W pomiarach wstępnych po wytworzeniu kondensatorów zmierzono rezystancję izolacji  $R_{izol}$  przy różnych napięciach uzyskując charakterystyki dla 60 badanych kondensatorów. Dla tych kondensatorów do dalszych analiz wyznaczono przyrost rezystancji izolacji  $\Delta R_{izol}$  jako różnicę między pomiarami przy najmniejszym (50 V) i największym napięciu pomiarowym (800 V) oraz współczynniki nachylenia  $\alpha$  między kolejnymi punktami charakterystyki  $R_{izol}(U)$  (rys. 6.20):

$$\sum \alpha_i = \sum_{i=1}^N \alpha_i = \alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_N. \quad (6.7)$$



**Rys. 6.20.** Ilustracja zmian rezystancji izolacji  $R_{izol}$  w funkcji napięcia polaryzacji kondensatora  $U$ ;  $\Delta R_{izol}$  – przyrost rezystancji izolacji między kolejnymi napięciami polaryzującymi kondensator o różnicy  $\Delta U$ ,  $\alpha$  – szybkość zmian  $\Delta R_{izol}/\Delta U$  między poszczególnymi punktami pomiarowymi

Przyrost rezystancji  $\Delta R_{izol}$  oraz współczynniki nachyleń  $\alpha$  dla poszczególnych kroków pomiarowych wykazuje znaczącą korelację ze zmianami procentowymi pojemności po próbie trwałości (tab. 6.8).

Podobnie jak w przypadku rezystancji izolacji wykonano pomiary współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  w funkcji napięcia polaryzującego kondensator. Napięcie zwiększono od 100 V do wartości 850 V odpowiadającej dwukrotnemu napięciu znamionowemu kondensatora. Te napięcia są stosowane w trakcie testu wytrzymałości elektrycznej i nie powinny powodować degradacji dielektryka przy pomiarach w czasie 60 s. Wyniki

pomiarów, podobnie jak w przypadku pomiarów rezystancji izolacji, wskazują na istotne korelacje między logarytmem z modułu przyrostu  $\Delta \text{tg}\delta$  zmierzonym przy skrajnych napięciach lub logarytmem z modułu sumy współczynników nachyleń  $\alpha$  charakterystyki  $\text{tg}\delta(U)$  a logarytmem z modułu zmian pojemności  $\Delta C/C$  określonych po próbie trwałości (tab. 6.9).

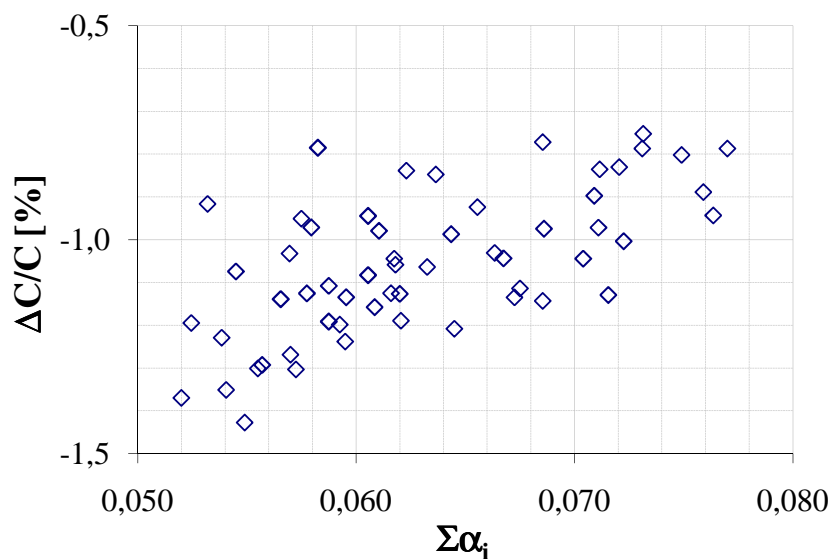
**Tab. 6.8.** Wartości współczynnika korelacji liniowej  $r_{xy}$  oraz unormowanej zmiennej losowej  $z$  między logarytmem z modułu przyrostu rezystancji izolacji  $\Delta R_{\text{izol}}$  między minimalnym (50 V) i maksymalnym (800 V) napięciem pomiarowym lub logarytmu z modułu sumy nachyleń wyróżnionych odcinków charakterystyki rezystancji izolacji  $\alpha$  wyznaczone dla wyników pomiarów przed próbą a logarytmem z modułu zmian pojemności  $\Delta C/C$  po próbie trwałości

| Czas próby [h] | Korelacja między $\log( \Delta R_{\text{izol}} )$ a $\log( \Delta C/C )$ |       | Korelacja między $\log( \sum \alpha_i )$ a $\log( \Delta C/C )$ |       |
|----------------|--|-------|---|-------|
|                | $r_{xy}$   | $z$   | $r_{xy}$  | $z$   |
| 2000           | -0,20  | -1,46 | -0,14   | -1,02 |
| 3000           | 0,45   | 3,52  | 0,54  | 4,46  |
| 5000           | 0,51   | 4,10  | 0,61  | 5,16  |
| 6000           | 0,50   | 4,07  | 0,62  | 5,27  |

**Tab. 6.9.** Wartości współczynnika  $r_{xy}$  oraz unormowanej zmiennej losowej  $z$  dla logarytmu z modułu przyrostu  $\Delta \text{tg}\delta$  między maksymalnym (850 V) i minimalnym (100 V) napięciem pomiarowym lub logarytmu z sumy nachyleń poszczególnych odcinków charakterystyki  $\text{tg}\delta(U)$  wyznaczone dla wyników pomiarów przed próbą trwałości a logarytmem z modułu zmian pojemności  $\Delta C/C$  po próbie

| Czas próby [h] | Korelacja między $\log( \Delta \text{tg}\delta )$ a $\log( \Delta C/C )$ |       | Korelacja między $\log( \sum \alpha_i )$ a $\log( \Delta C/C )$ |       |
|----------------|--|-------|---|-------|
|                | $r_{xy}$   | $z$   | $r_{xy}$  | $z$   |
| 2000           | -0,05  | -0,35 | -0,02   | -0,15 |
| 3000           | 0,31   | 2,33  | 0,33  | 2,55  |
| 5000           | 0,58   | 4,83  | 0,60  | 5,13  |
| 6000           | 0,54   | 4,49  | 0,57  | 4,81  |

Na rys. 6.21 przedstawiono wyniki zmian pojemności kondensatorów po próbie 6000 h w funkcji sumy wartości  $\alpha$  odpowiadających szybkości zmian rezystancji izolacji przy zmianach napięcia polaryzacji kondensatora (rys. 6.20). Można stwierdzić, że istnieje związek między zmianami pojemności  $\Delta C/C$  a sumą nachyleń  $\alpha$ . Dla egzemplarzy o dużych wartościach nachyleń  $\alpha$  obserwowano względnie duże spadki pojemności  $\Delta C/C$ .



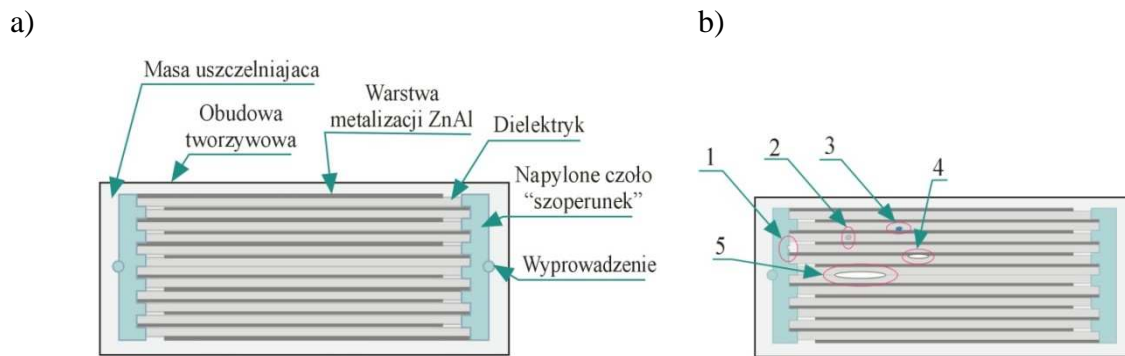
**Rys. 6.21.** Zależność między zmianami pojemności  $\Delta C/C$  w kondensatorach  $7,5 \mu\text{F}$  po próbie trwałości 6000 h w funkcji sumy szybkości zmian rezystancji izolacji  $\Sigma\alpha_i$  ( $\alpha_i = \Delta R_{\text{izol}}/\Delta U$  według rys. 6.20) między poszczególnymi wartościami napięcia przy którym wyznaczono  $R_{\text{izol}}$

Przy badaniu kondensatorów silnikowych  $7,5 \mu\text{F}$ , ze względu na ich konstrukcję (obudowa w kształcie walca i znaczna odległość zwijki od ścianek obudowy) nie rejestrowano sygnałów emisji akustycznej.

### 6.3. Emisja akustyczna indukowana naprężeniami mechanicznymi

Jak już wspomniano, parametry kondensatorów foliowych zależą od właściwości materiałów użytych podczas produkcji oraz technologii ich wytwarzania. Zarówno parametry materiałów, jak i procesy technologiczne, są obarczone pewną zmiennością. Ukryte wady materiałów oraz błędy urządzeń produkcyjnych mogą powodować powstanie wad w gotowym wyrobie. Stąd, przy wytwarzaniu kondensatorów należy ocenić poprawność poszczególnych operacji procesu technologicznego. Podczas nawijania folii oraz podczas operacji spłaszczenia nawiniętej zwijki, w przypadku niektórych kondensatorów, istnieje możliwość zachowania między zwojami folii obszarów powietrznych (rys. 6.22). Taki stan wpływa bardzo negatywnie na jakość kondensatora ze względu na możliwość występowania w tych miejscach wyładowań niezupełnych oraz negatywnego oddziaływania wilgoci zawartej w powietrzu, a także niestabilności mechanicznej zwijki. Dodatkowo, w tych miejscach obniża się wytrzymałość elektryczna kondensatora. W celu usunięcia powietrza

ze zwojów przeprowadza się termiczną obróbkę nawiniętej już zwijki. Niestety, taka obróbka nie zawsze jest skuteczna.

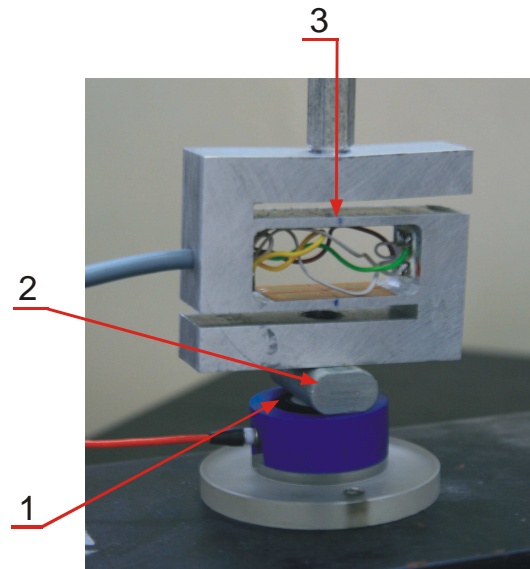


**Rys. 6.22.** Przekrój kondensatora foliowego: a) wykonanego prawidłowo, b) z widocznymi defektami; 1 – wada połączenia metalizacji folii i warstwy metalizacji czoła, 2 – wtrącina w strukturze dielektryka, 3 – wtrącina między zwojami folii, 4 – „pustka powietrzna” między zwojami folii, 5 – „pustka powietrzna” powstała podczas spłaszczania zwijki

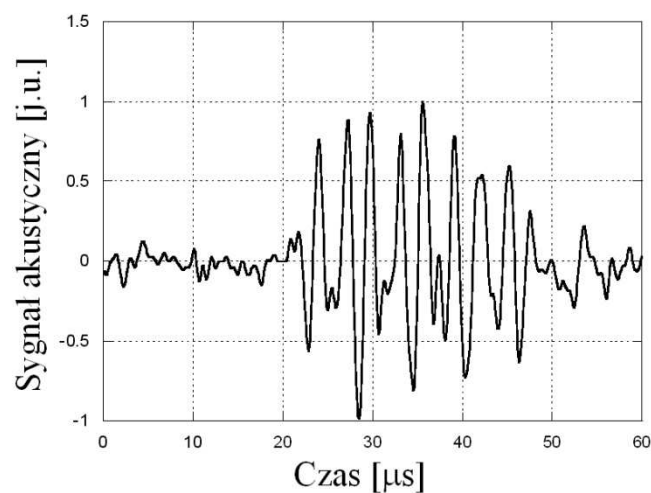
W celu wyeliminowania zwijek o gorszych parametrach wprowadzane są dodatkowe metody kontroli ich jakości. Dotychczas było brak metod oceny ich jakości. Stąd, nową zaproponowaną w rozprawie metodą wykrywania niepoprawnie wykonanych zwijek (stanowiącą pierwszą tezę pracy), są pomiary sygnałów emisji akustycznej wywołanych mechanicznym ściskaniem zwijki (rys. 6.23) [24-26]. W trakcie ściskania zwijki, ze względu na tarcie wokół obszarów pustek powietrznych, można spodziewać się wystąpienia sygnałów emisji akustycznej (rys. 6.24). Parametry tych sygnałów będą świadczyły o częstotliwości występowania takich obszarów.

Aby przeanalizować skuteczność proponowanej metody oceny jakości zwijek przebadano 30 sztuk tych zwijek wykorzystywanych w kondensatorach o pojemności  $2,2 \mu\text{F}/275 \text{ V}$ . Badanie przeprowadzono dla zwijek z metalizacją czoł, aby istniała możliwość pomierzenia parametrów elektrycznych i następnie porównania z wynikami pomiarów emisji akustycznej podczas ściskania tych zwijek. Najpierw pomierzono ich podstawowe parametry elektryczne, takie jak  $C$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $R_S$ ,  $R_{\text{izol}}$ , a następnie przeprowadzono pomiary sygnałów emisji akustycznej w funkcji siły nacisku w układzie z rys. 6.23 przy narastającym liniowo w czasie naprężeniu. Zwijki poddano następnie próbie trwałości, opisanej w podrozdziale 4.1.3 i ponownie wykonano pomiary ich podstawowych parametrów elektrycznych. Pomiary  $C$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $R_S$  przeprowadzono mostkiem  $RLC$  typu GenRad 1689M przy napięciu 1 V i częstotliwości 1 kHz, pomiary  $R_{\text{izol}}$  wykonano megaomierzem IM6 przy napięciu 100 V po czasie 60 s od momentu przyłożenia napięcia polaryzacji. Wyniki pomiarów zawarto w tab. 6.10. Pomiary

$\text{tg}\delta$  w funkcji napięcia wykonano za pomocą mostka transformatorowego Tettex 2805 zwiększając napięcie pomiarowe od  $100 \text{ V}_{\text{rms}}$  do  $600 \text{ V}_{\text{rms}}$  w badaniach wstępnych i do  $400 \text{ V}_{\text{rms}}$  w badaniach po próbie.



**Rys. 6.23.** Mechaniczny układ ściskania zwijki folii i pomiar sygnałów emisji akustycznej; 1 – czujnik piezoelektryczny, 2 – badana zwijka, 3 – źródło nacisku z czujnikiem do pomiaru siły nacisku



**Rys. 6.24.** Przykładowy przebieg sygnału emisji akustycznej zarejestrowany podczas ściskania zwijki folii [26]

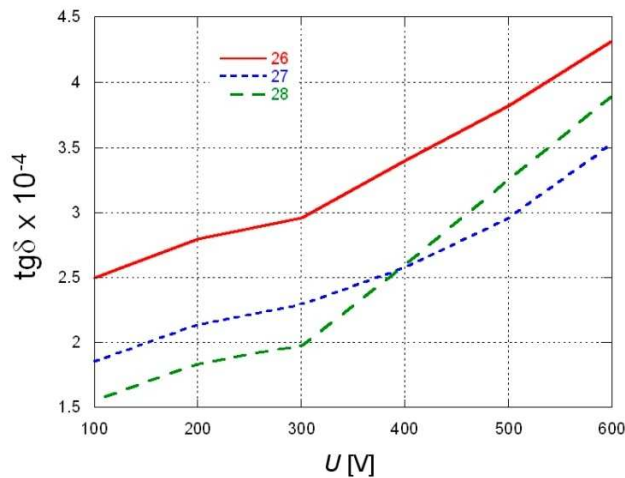
Na rys. 6.25 przedstawiono przebieg  $\text{tg}\delta$  w funkcji napięcia dla trzech wybranych zwijek, pomierzony przed oraz po próbie trwałości. Proces starzenia spowodował wzrost wartości  $\text{tg}\delta$  oraz potwierdził duże różnice we właściwościach badanych egzemplarzy. Różnice między egzemplarzami obserwowano także w przypadku parametrów sygnałów emisji akustycznej.



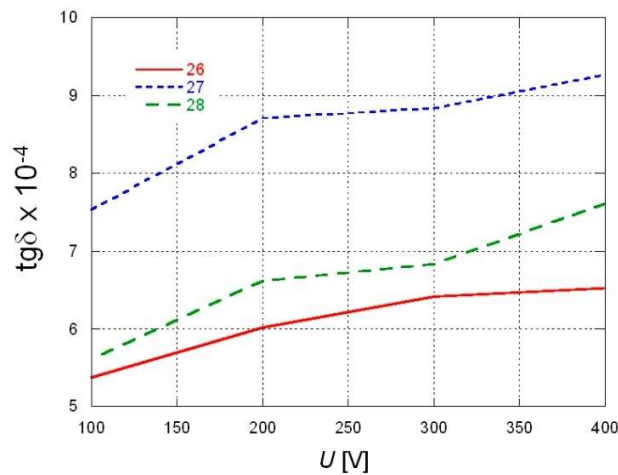
**Tab. 6.10.** Pomiary parametrów elektrycznych wybranych zwijek kondensatorowych 2,2  $\mu\text{F}/275\text{ V}\sim$ 

| Nr                   | Pomiar wstępny         |                                       |                        |  | Pomiar po próbie trwałości 1000 h |                                       |                        |  |                     |
|----------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--|---------------------|
|                      | 1 kHz/1 V              |                                       |                        | 100 V/60 s                                       | 1 kHz/1 V                         |                                       |                        | 100 V/60 s                                       | $\Delta C/C$<br>[%] |
|                      | C<br>[ $\mu\text{F}$ ] | $\text{tg}\delta$<br>$\times 10^{-4}$ | $R_s$<br>[m $\Omega$ ] | $R_{\text{izol}}$<br>$\times 10^5\text{M}\Omega$ | C<br>[ $\mu\text{F}$ ]            | $\text{tg}\delta$<br>$\times 10^{-4}$ | $R_s$<br>[m $\Omega$ ] | $R_{\text{izol}}$<br>$\times 10^4\text{M}\Omega$ |                     |
| 26                   | 2,086                  | 2,98                                  | 22,84                  | 2,0  | 1,974                             | 12,27                                 | 97,69                  | 6,0  | -5,36               |
| 27                   | 2,085                  | 2,54                                  | 19,28                  | 2,0  | 1,888                             | 4,19                                  | 34,84                  | 0,8  | -9,43               |
| 28                   | 2,125                  | 2,56                                  | 18,90                  | 2,2  | 1,969                             | 12,07                                 | 97,55                  | 2,0  | -7,33               |
| T = 21°C, R.H. = 36% |                        |                                       |                        |  | T = 24°C R.H. = 46%               |                                       |                        |  |                     |

a)

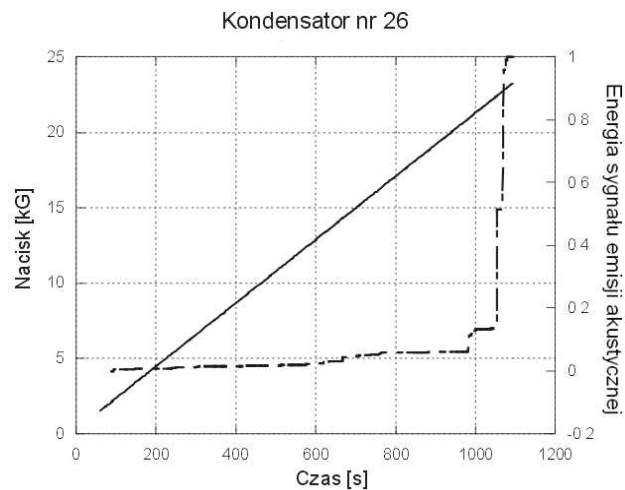


b)

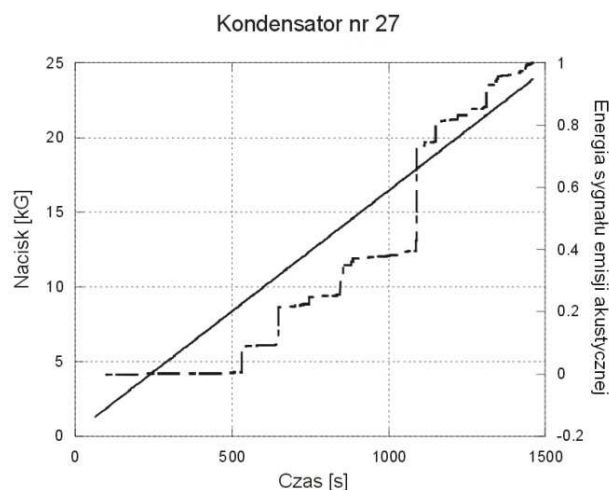
**Rys. 6.25.** Przebiegi wartości  $\text{tg}\delta$  w funkcji napięcia pomiarowego: a) pomiar po wytworzeniu, b) pomiar po próbie trwałości 1000 h

Na rys. 6.26, rys. 6.27 i rys. 6.28 przedstawiono zmiany intensywności rejestrowanego sygnału emisji akustycznej w czasie, gdy naprężenie jakiemu poddawano próbkę rosło liniowo. Jako miarę intensywności emisji akustycznej przyjęto energię rejestrowanego sygnału od momentu rozpoczęcia pomiaru (sumę kwadratów wszystkich zarejestrowanych

wartości chwilowych sygnału emisji akustycznej). Zaobserwowano istotne różnice, które występowały także przy analizie rozkładu prawdopodobieństwa wartości chwilowych sygnału emisji akustycznej (rys. 6.29) [26].

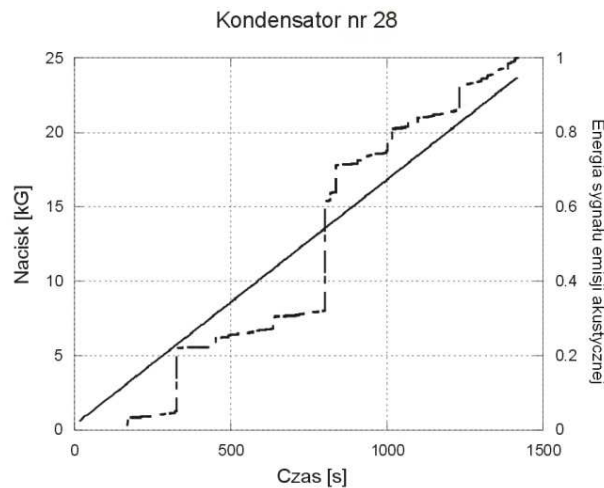


**Rys. 6.26.** Energia rejestrowanego sygnału emisji akustycznej (linia przerywana) podczas liniowo narastającego naprężenia (linia ciągła) zwijki nr 26

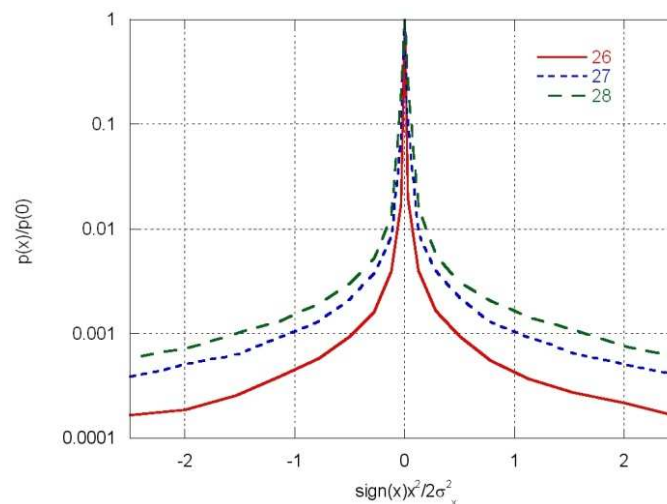


**Rys. 6.27.** Energia rejestrowanego sygnału emisji akustycznej (linia przerywana) podczas liniowo narastającego naprężenia (linia ciągła) zwijki nr 27

Wszystkie badane zwijki folii przeszły próbę trwałości 1000 h z wynikiem pozytywnym. Najmniejsza bezwzględnie zmiana pojemności wynosiła -5,36% (zwijka nr 26), pozostałe próbki cechowały się wyraźnie większymi zmianami, ale poniżej dopuszczalnej granicy -10%. Najmniejszą bezwzględnie zmianę rezystancji izolacji zaobserwowano dla zwijki nr 26. Również zmiana wartości  $\text{tg}\delta$  po próbie trwałości (rys. 6.25b) jest najmniejsza dla zwijki nr 26.



**Rys. 6.28.** Energia rejestrowanego sygnału emisji akustycznej (linia przerywana) podczas liniowo narastającego naprężenia (linia ciągła) zwijki nr 28



**Rys. 6.29.** Rozkład prawdopodobieństwa  $p(x)/p(0)$  wartości chwilowych sygnałów emisji akustycznej  $x(t)$  rejestrowanych dla zwijek  $2,2 \mu\text{F}/275 \text{ V}$  podczas poddawania ich naprężeniom mechanicznym

Energia sygnałów ultradźwiękowych emitowanych podczas mechanicznego ściskania zwijki nr 26 odbiega od wyników obserwowanych dla innych prezentowanych egzemplarzy. Dla pozostałych zwijek energia sygnału emisji akustycznej rośnie prawie proporcjonalnie ze wzrostem siły nacisku. Te różnice widać także w rozkładzie prawdopodobieństwa wartości chwilowych sygnałów emisji akustycznej (rys. 6.29). Takie wyniki świadczą o tym, że zwijka nr 26 była bardzo sztywna i praktycznie pozbawiona wtrąceń gazowych w swojej objętości. Pozostałe przytoczone wyniki wskazują, że zwijki nr 27 i nr 28 były bardziej plastyczne, co dowodzi występowania pustek wewnątrz ich struktury. Pustki mogły powstać podczas niewłaściwego nawinięcia folii lub podczas jej obróbki cieplnej w trakcie spłaszczania. Tak różne wyniki uzyskane dla poszczególnych zwijek pozwalają zaproponować kryterium oceny jakości badanych zwijek. W Dodatku B pracy opisano proponowane kryterium, dotyczące

wyników badań dla próby pięciu zwijek. Gdy w badanej próbie występuje przynajmniej jedna zwijka, dla której energia rejestrowanego sygnału akustycznego od momentu rozpoczęcia próby do osiągnięcia naprężenia równego 60% maksymalnej wartości przekracza 20% całkowitej energii sygnału akustycznego rejestrowanego podczas próby to uznaje się całą partię wytworzonych zwijek za wadliwą. Zgodnie z podanym kryterium, zwijki nr 27 oraz nr 28 (rys. 6.27, rys. 6.28) nie spełniają proponowanego kryterium.

W proponowanej metodzie ocena jakości zwijek odbywa się przez pomiar zmian energii sygnałów emisji akustycznej w funkcji siły nacisku narastającej liniowo w czasie. Ze względu na koszty pomiarów w stosunku do kosztów wytwarzania zwijek proponowaną metodę należy stosować tylko do próby statystycznej z całej partii produkcyjnej, pozwalającej podjąć decyzję o wykorzystaniu danej partii w dalszej produkcji. Stąd, w podanym kryterium ograniczono się do badań tylko pięciu sztuk. Warto nadmienić, że do chwili obecnej nie stosowano oceny jakości wytworzonych zwijek po tym etapie produkcji.

#### **6.4. Podsumowanie**

W rozdziale przedstawiono szczegółowe wyniki badań eksperymentalnych wybranych typów kondensatorów foliowych, których celem było określenie możliwości oceny ich jakości na podstawie pomiarów parametrów tych kondensatorów mierzonych zaraz po wytworzeniu. Przeprowadzono badania kondensatorów przeciwzakłóceniovych, silnikowych oraz zwijek folii przed ich umieszczeniem w obudowie. Badania obejmowały grupy po 60 sztuk wybranych typów. Zmierzono podstawowe parametry charakteryzujące kondensatory po ich wytworzeniu, a następnie poddano je próbie starzenia, przy podwyższonej temperaturze oraz ustalonej polaryzacji. Przeprowadzenie próby umożliwiło określenie czasów poprawnej pracy kondensatorów w przyjętych warunkach starzenia (Dodatek A). W przypadku egzemplarzy, które uległy uszkodzeniu określono przyczyny powstania tych uszkodzeń.

Uzyskane wyniki pozwoliły na zaproponowanie oryginalnych metod oceny jakości tych kondensatorów na podstawie pomiarów rezystancji izolacji przy napięciu polaryzacji powyżej 500 V (kondensatory przeciwzakłóceniove, tab. 6.5) lub na podstawie nachylenia charakterystyki rezystancji izolacji oraz współczynnika strat dielektrycznych w funkcji napięcia (kondensatory silnikowe, tab. 6.8, tab. 6.9). Kryterium selekcji kondensatorów

do grupy spełniającej wymagania normy oraz grupy o podwyższonej jakości na podstawie pomiarów wartości  $R_{izol}$  oraz zmian  $\tan\delta$  podczas polaryzacji różnym napięciem załączono w Dodatku B, opisującym szczegółowo przyjęte kryterium selekcji kondensatorów do dwóch wyróżnionych grup.

Stwierdzono, że pomiary sygnałów emisji akustycznej generowanych w zwijkach kondensatorów foliowych pod wpływem naprężenia mechanicznego pozwalają na wykrycie występowania pustek powietrznych w tych zwijkach. Te obszary są potencjalnymi miejscami zachodzenia wyładowań niezupełnych i powstawania uszkodzeń w kondensatorach. Stąd, zaproponowano nową metodę oceny jakości wytwarzanych zwiłek na podstawie rejestrowanych sygnałów emisji akustycznej.

Oryginalne wyniki badań przedstawionych w bieżącym rozdziale doprowadziły do opracowania szczegółowej instrukcji badań jakim powinny podlegać wytwarzane kondensatory. Instrukcja (Dodatek B) jest już wykorzystywana podczas badań produkowanych kondensatorów w Zakładach Podzespołów Radiowych MIFLEX.

---

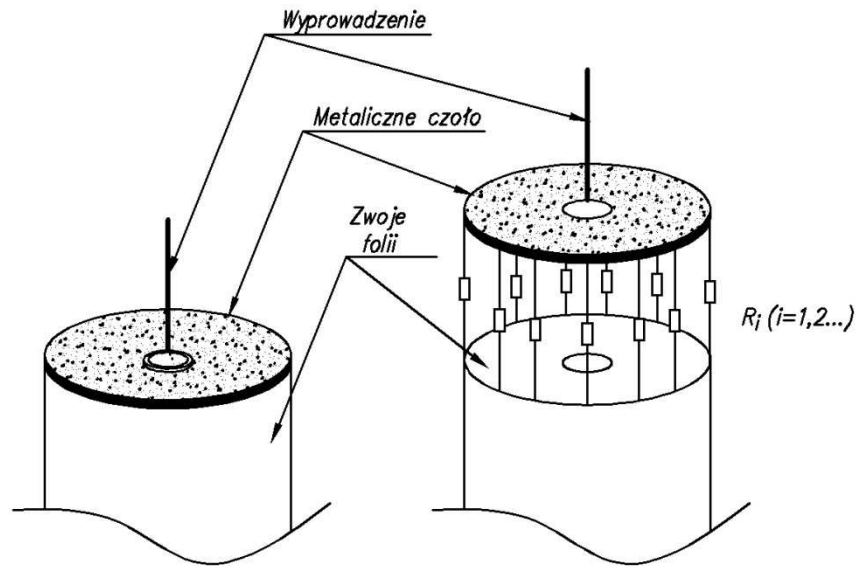
## 7. Ocena jakości połączenia warstwy metalizacji z metalizacją zwijki kondensatora

---

Jednym z istotnych miejsc powstawania defektów w kondensatorach foliowych jest obszar kontaktu między zwijką folii a warstwą metalizacji na jej czołach. W trakcie wytwarzania metalizacji ten obszar może łatwo ulec przegrzaniu. Zastosowanie natomiast zbyt niskiej temperatury podczas napyłania metalu skutkuje gorszym kontaktem. Stąd jakość wykonania obszaru kontaktu powinna podlegać szczegółowej ocenie.

Kondensatory z folii metalizowanej są bardzo wrażliwe na impulsy prądowe, które degradują połączenia cienkiej warstwy metalizacji folii z metalizacją czoła zwijki. Prąd impulsu wywołuje wydzielanie się ciepła na wszystkich elementach kontaktów decydujących o wartości rezystancji szeregowej. Szczególnie narażony jest obszar kontaktu warstwy metalizacji czoła z metalizacją folii, ze względu na ograniczone możliwości odprowadzania ciepła oraz niewielką wytrzymałość tego połączenia. Rezystancja tego połączenia może być modelowana przez szereg połączonych równolegle rezystorów o rezystancji  $R_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) i o dopuszczalnej mocy strat  $P_i$  (rys. 7.1). Jeżeli napyłanie metalu na czoła zwijki przeprowadzono niepoprawnie lub metalizacja folii na krawędziach wykazywała defekty, to w złączu pojawią się duże różnice w wartościach  $R_i$  i  $P_i$  między poszczególnymi obszarami kontaktu. Wówczas, podczas przepływu prądu, część złącza będzie się nagrzewała bardziej od reszty. W przypadku lokalnego przekroczenia wartości  $P_i$  nastąpi przegrzanie kontaktu warstwy metalizacji czoła z metalizacją folii, a w skrajnym przypadku przerwanie tego połączenia na skutek odparowania metalu na krawędzi folii. Taki proces będzie się pogłębiał i może doprowadzić do lawinowego wypalenia znacznej części lub nawet całego czoła zwijki, co skutkuje utratą pojemności kondensatora. Zmiana pojemności w wyniku tego procesu jest zwykle znacznie większa, niż zmiana powodowana procesami samoregeneracji w objętości zwijki.

---

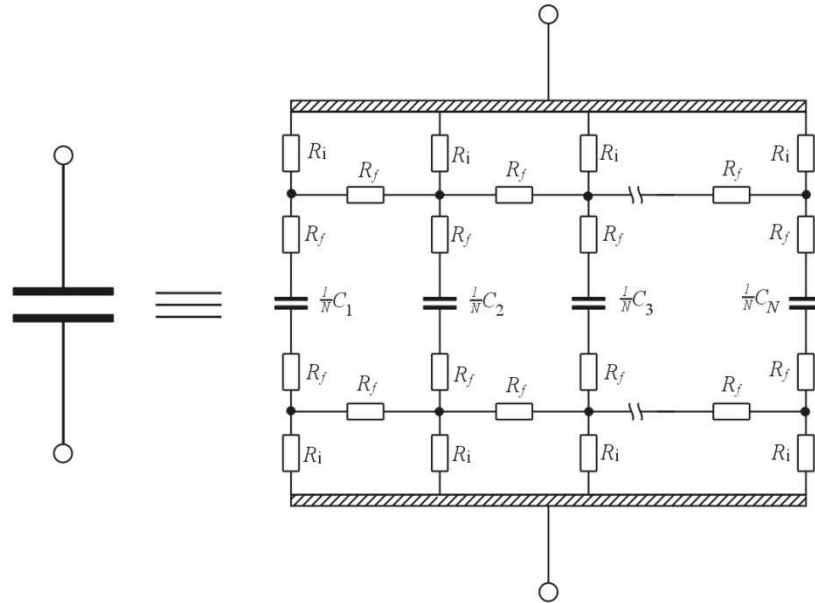


**Rys. 7.1.** Model połączenia metalizacji kontaktu z metalizacją folii;  $R_i$  – rezystancja kontaktu między poszczególnymi zwojami folii a metalizacją czoła kondensatora

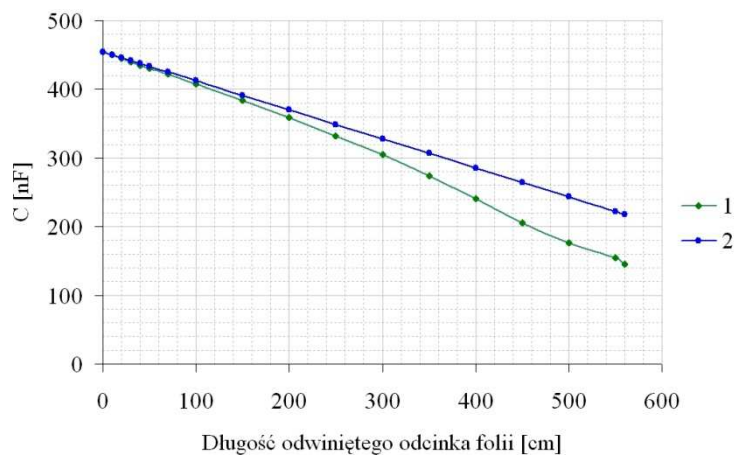
Metalizacja czoła ma grubość dziesiątych części milimetra i stanowi połączenie warstwy metalizacji folii i wyprowadzeń kondensatora. Oznacza to, że wszystkie zwoje folii są zwarte ze sobą przez bardzo małą rezystancję, rzędu ułamków  $m\Omega$ , co pozwala na efektywne wykorzystanie całej powierzchni metalizacji folii jako okładzin gromadzących ładunek oraz zapewnia, że kondensatory są praktycznie bezindukcyjne. Zakładając, że rezystancja warstwy metalizacji zwojów oraz wpływ indukcyjności są pomijalne, to pojemność kondensatora jest proporcjonalna do całej powierzchni jego okładzin. Niestety, rezystancja na jednostkę powierzchni metalizacji folii jest dość duża np.  $R_f = 7,5\Omega/$  (każdy odcinek okładziny o długości równej szerokości posiada rezystancję  $7,5\Omega$ , rys. 7.2). Jeżeli wskutek lokalnego uszkodzenia wystąpi brak połączenia kilkunastu zwojów z warstwą metalizacji kontaktów, to udział tej odłączonej powierzchni folii w całkowitej pojemności kondensatora jest znacząco ograniczony ze względu na duży wzrost rezystancji szeregowej, przez którą przepływa ładunek gromadzony na metalizacji folii.

W celu sprawdzenia wpływu przerwania kontaktu fragmentu metalizacji folii z metalizacją czoła na pojemność takiego układu przeprowadzono eksperyment polegający na odwijaniu kolejnych zwojów folii od zwijki kondensatora o pojemności  $470\text{ nF}$ . Odwinięte zwoje stanowiły kondensator płaski połączony równolegle ze zwijką. Pojemność układu dwóch płaskich fragmentów folii jest dwukrotnie mniejsza niż układu gdy ta folia jest zwinięta. Stąd, rozwijanie folii będzie zmniejszało pojemność powstałego kondensatora. Natomiast impedancja takiego układu będzie zmieniała się jeszcze szybciej niż tylko

z powodu zmniejszania się pojemności, ze względu na wpływ rezystancji metalizacji folii na wypadkową impedancję układu. Dlatego, w przypadku pomiarów miernikiem pojemności pracującym przy częstotliwości 1 kHz, spadek pojemności jest większy, niż wynika to tylko z faktu samego rozwinięcia folii (rys. 7.3, rys. 7.4).



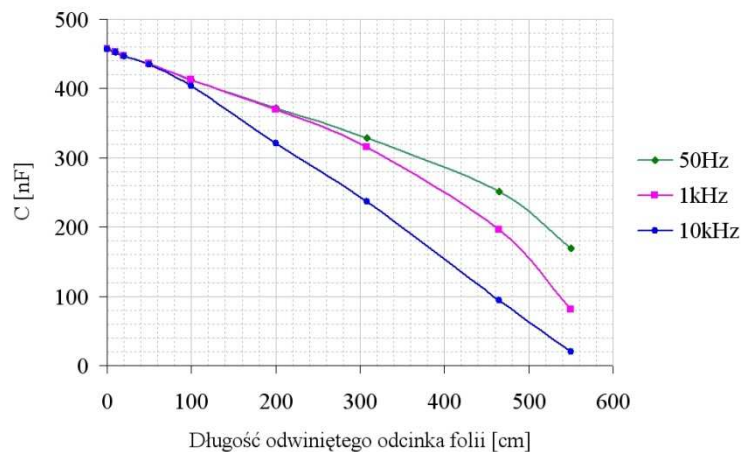
**Rys. 7.2.** Schemat zastępczy kondensatora ilustrujący wpływ rezystancji metalizacji folii dla wyróżnionych  $N$  fragmentów zwijki folii;  $R_f$  – rezystancja metalizacji fragmentu folii,  $R_i$  – rezystancja kontaktu między poszczególnymi zwojami folii a metalizacją czoła kondensatora



**Rys. 7.3.** Zmiana pojemności kondensatora 470 nF podczas rozwijania folii zwijki; 1 – pojemność mierzona przy częstotliwości 1 kHz, 2 – zmiana pojemności przewidywana teoretycznie

Dalsze zwiększanie częstotliwości sygnału polaryzującego kondensator podczas pomiarów powoduje nasilenie się tego efektu (szybszy spadek pojemności kondensatora podczas odwijania folii, rys. 7.4). Efekt obserwowany podczas odwijania folii dotyczy także zmian współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  i rezystancji szeregowej  $R_s$ .

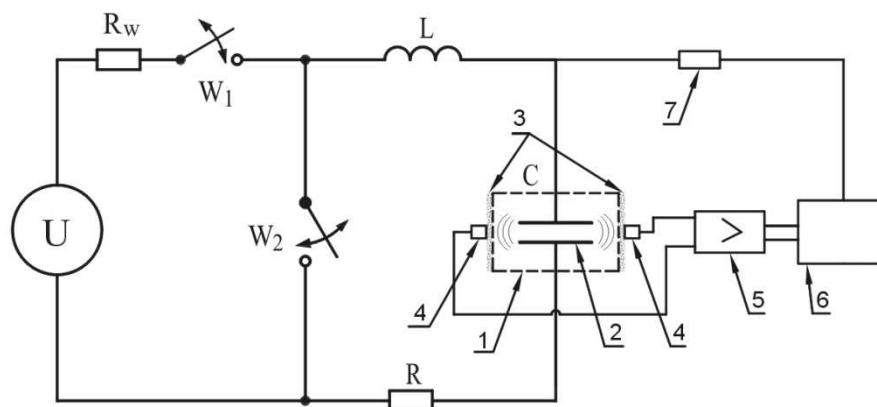




**Rys. 7.4.** Zmiany pojemności kondensatora 470 nF podczas rozwijania folii zwijki mierzone miernikiem przy trzech różnych częstotliwościach sygnału polaryzującego kondensator

W pracy przedstawiono wyniki badań jakości złącza warstwy metalizacji kontaktu z metalizacją folii przewodzących dla dwóch wybranych typów kondensatorów o pojemnościach 4  $\mu\text{F}$  oraz 470 nF. W tym celu przygotowano stanowisko zawierające (rys. 7.5):

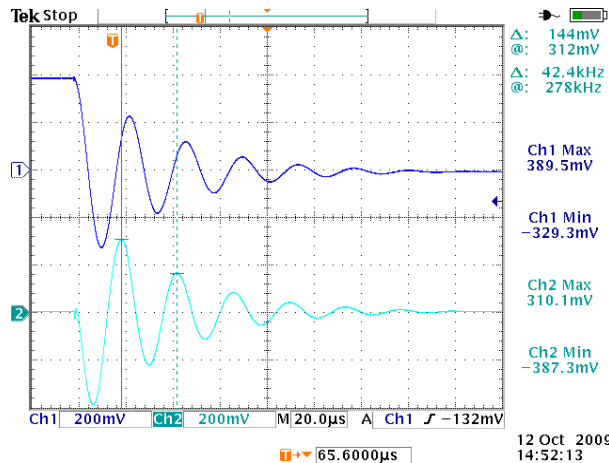
- falownik wymuszający przepływ przez kondensator ustalonych impulsów prądowych,
- czujniki do pomiarów sygnałów emisji akustycznej,
- wzmacniacze napięciowe,
- układ akwizycji danych.



**Rys. 7.5.** Stanowisko do pomiarów emisji akustycznej powodowanej impulsowym pobudzeniem kondensatora: 1 – obudowa kondensatora, 2 – zwijka kondensatorowa, 3 – żel ograniczający opory akustyczne dla sygnału docierającego do czujnika, 4 – czujniki piezoelektryczne, 5 – wzmacniacze napięciowe, 6 – układ akwizycji danych, 7 – sonda napięciowa

W układzie falownika (rys. 7.5) badany kondensator  $C$  jest ładowany ze źródła napięcia stałego do określonego napięcia  $U$  w obwodzie  $R_wLC$  (załączony przełącznik  $W_1$ ). Parametry

obwodu ładującego są dobrane tak, aby nie wystąpiły oscylacje [2, 11], a jednocześnie maksymalna wartość prądu ładującego nie przekraczała 10% wartości granicznej dla danego typu kondensatora. Tak mała przyjęta wartość prądu ładującego oznacza, że proces ten nie spowoduje jakichkolwiek zmian w strukturze kondensatora i nie wpływa w zauważalny sposób na wyniki prób. Następnie kondensator  $C$  jest odłączany od źródła napięcia stałego  $U$  (rozwarcie  $W_1$ ), a jego rozładowanie następuje w obwodzie  $RLC$ , po zwarceniu  $W_2$ . Parametry obwodu są tak dobrane, że w układzie wystąpią gasnące oscylacje (rys. 7.6).



**Rys. 7.6.** Przykładowe przebiegi napięcia (górny) i prądu (dolny) podczas rozładowania kondensatora w układzie z rys. 7.5 [20]

Cykl ładowania i rozładowania jest powtarzany z ustaloną częstotliwością rzędu od kilku do kilkuset Hz. Wartość rezystancji  $R$  decyduje o szybkości tłumienia oscylacji podczas rozładowania i jest względnie mała [40, 89]. W zrealizowanym układzie jako przełącznik  $W_1$  zastosowano tyrystor, a jako  $W_2$  triak. Elementy  $W_1$  i  $W_2$  są sterowane odpowiednią sekwencją impulsów z zewnętrznego układu sterującego. Dobór parametrów impulsu prądowego zależy od typu i przeznaczenia badanego kondensatora. Dla danego typu kondensatora producent podaje istotne parametry określające jego wytrzymałość. Do tych parametrów należą napięcie znamionowe  $U_N$  oraz dopuszczalna szybkość zmian napięcia  $du/dt$ .

Dobór indukcyjności  $L$  obwodu rozładowania powinien zapewnić zachowanie granicznych wartości prądów i napięć dla danego kondensatora. Stąd, aby określić wartość indukcyjności  $L$ , należy porównać energię zgromadzoną w polu elektrycznym kondensatora naładowanego do napięcia stałego  $U$  z energią zgromadzoną w polu magnetycznym cewki

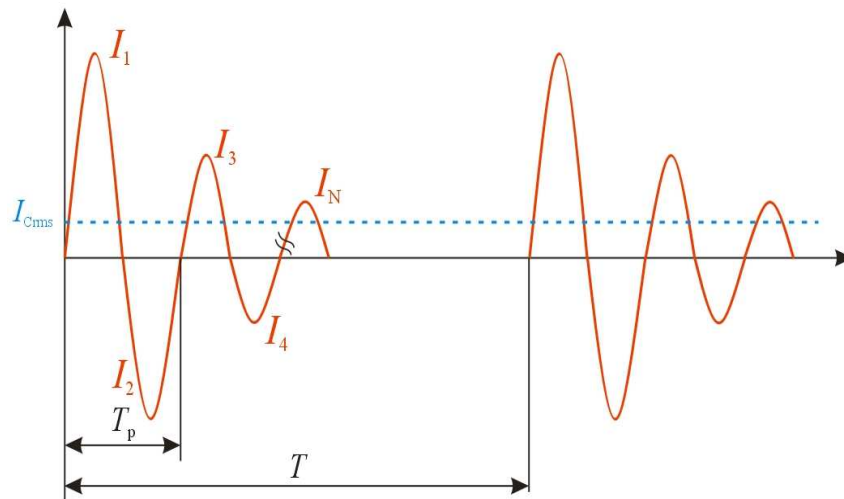
$$\frac{U^2 C}{2} = \frac{I_{\max}^2 L}{2}. \quad (7.3)$$

Po przekształceniach uzyskuje się wyrażenie na indukcyjność:

$$L = C \left[ \frac{U}{I_{\max}} \right]^2 = C \left[ \frac{\sqrt{2}U_N}{C \frac{du}{dt}} \right]^2 = \frac{2U_N^2}{C \left[ \frac{du}{dt} \right]^2}. \quad (7.4)$$

W układzie pomiarowym częstotliwość ładowania i rozładowania zmienia się przez przełączanie  $W_1$  i  $W_2$  regulując wartość skuteczną prądu płynącego przez kondensator, a nie zmieniając wartości maksymalnej impulsu prądowego  $I_{\max}$ . Mierząc parametry oscylacji prądu płynącego przez kondensator można wyznaczyć jego wartość skuteczną (rys. 7.7):

$$I_{C_{rms}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N \left( \frac{I_k}{\sqrt{2}} \right)^2}{N}} \cdot \sqrt{\frac{T_p}{T} \cdot \frac{N}{2}} \quad (7.5)$$



**Rys. 7.7.** Przebiegi impulsów prądowych i ich parametry:  $I_{C_{rms}}$  – wartość skuteczna prądu płynącego przez kondensator,  $I_{1..N}$  – kolejne wartości szczytowe prądu,  $N$  – liczba impulsów w przebiegu oscylacyjnym,  $T_p$  – okres podstawowy oscylacji,  $T$  – czas powtarzania impulsów

Badania dla kondensatorów o pojemności  $4 \mu\text{F}$  dotyczyły oceny wpływu narażenia impulsami prądowymi na zmiany ich właściwości elektrycznych. Podczas badania kondensatorów o pojemności  $470 \text{ nF}$  dodatkowo mierzono sygnały emisji akustycznej generowane podczas pobudzenia impulsem prądowym. Sygnały te są generowane wskutek mechanicznych drgań okładzin kondensatora w wyniku sił elektrodynamicznych podczas procesów jego przeładowywania. Do badań przygotowano różne grupy kondensatorów, w których metalizację czół wykonano poprawnie oraz wadliwie, w sposób jaki może wystąpić podczas wytwarzania (napylenie warstwy metalu w zawyżonej lub zaniżonej temperaturze).

## 7.1. Badania zwijek kondensatorów silnikowych o pojemności 4 $\mu$ F

Do badań przygotowano grupę zwijek, w których metalizacja jednego z czoł podczas napyłania warstwy metalizacji została przegrzana (próbki 6÷10) [20]. Pozostałe próbki (1÷5) zostały wykonane prawidłowo. Przy tak dużej pojemności ograniczono się do mniejszej liczności próby, niż w przypadku kondensatorów o pojemności 470 nF, których wyniki badań przedstawiono w kolejnym podrozdziale pracy. Ograniczenie liczby badanych egzemplarzy wynika z analizy rezultatów uzyskanych dla innych pojemności, w których wady powstawały głównie w przypadku, gdy operacja napyłania odbywał się w temperaturze wyższej niż optymalna.

Zastosowano następujące parametry próby:

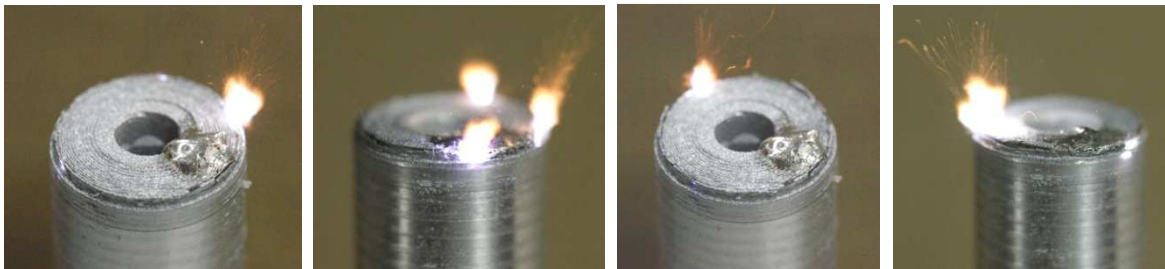
- $I_{\max} = 213\text{A}$  ( $J_{\text{imp}} = 0,15\text{ A/cm}$ ,  $l = 1421\text{ cm}$ ;  $du/dt \approx 53\text{ V}/\mu\text{s}$ ),
- $I_{\text{Cmax}} = 7,1\text{A}$  ( $J_{\text{rms}} = 5\text{ mA/cm}$ ),
- napięcie ładowania  $U_{\text{DC}} = 355\text{ V}$ ,
- czas próby 20 minut.

Zastosowany test impulsem prądowym pozwolił zidentyfikować, które z kondensatorów zostały wykonane wadliwie (tab. 7.1). W wyniku testu wadliwe egzemplarze znacząco (powyżej kilku procent) zmniejszyły swoją pojemność. W trakcie oględzin po narażeniu obserwowano ubytki metalizacji folii w miejscach połączenia z metalicznym czołem.

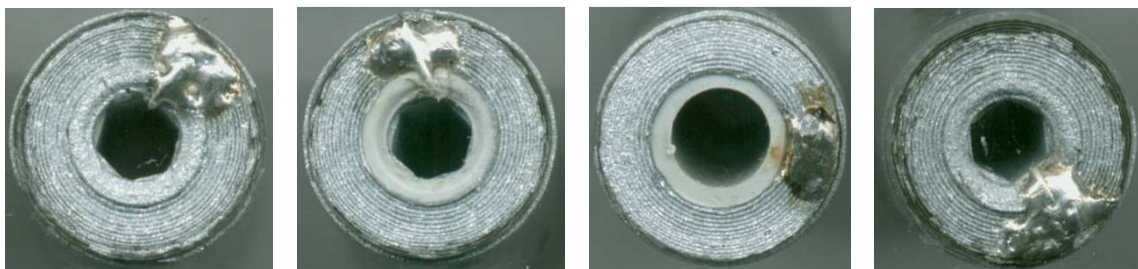
**Tab. 7.1.** Parametry kondensatorów 4  $\mu$ F/250 V mierzone przed i po polaryzacji impulsami prądowymi

| Lp. | Pomiary po wytworzeniu |                            |                     |  | Narażenie impulsami przez 60 s | Pomiary po narażeniu impulsowym |                            |                     |  |                  |
|-----|------------------------|----------------------------|---------------------|--|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------|--|------------------|
|     | 1 kHz/1 V              |                            |                     | 100 V / 60 s                                 |                                | 1 kHz/1 V                       |                            |                     | 100 V/60 s                                   | $\Delta C/C$ [%] |
|     | C [ $\mu$ F]           | tg $\delta \times 10^{-4}$ | $R_s$ [m $\Omega$ ] | $R_{\text{izol}} \times 10^5 \text{M}\Omega$ |                                | C [ $\mu$ F]                    | tg $\delta \times 10^{-4}$ | $R_s$ [m $\Omega$ ] | $R_{\text{izol}} \times 10^5 \text{M}\Omega$ |                  |
| 1   | 3,944                  | 6,24                       | 25,18               | 1,1  | -                              | 3,944                           | 6,4                        | 25,75               | 1,2  | -0,01            |
| 2   | 3,881                  | 6,41                       | 26,29               | 1,4  | -                              | 3,880                           | 6,6                        | 26,91               | 1,5  | -0,01            |
| 3   | 3,878                  | 5,41                       | 22,20               | 1,5  | -                              | 3,878                           | 5,6                        | 22,82               | 1,4  | -0,01            |
| 4   | 3,893                  | 5,66                       | 23,14               | 1,2  | -                              | 3,893                           | 5,8                        | 23,67               | 1,4  | -0,01            |
| 5   | 3,883                  | 6,06                       | 24,84               | 1,1  | -                              | 3,883                           | 6,2                        | 25,29               | 1,2  | -0,01            |
| 6   | 3,954                  | 5,29                       | 21,30               | 1,2  | Iskrzenie                      | 1,545                           | 10230                      | 105400              | 1,4  | -60,93           |
| 7   | 3,946                  | 5,46                       | 22,02               | 1,5  | Iskrzenie                      | 3,192                           | 2334                       | 11640               | 1,5  | -19,11           |
| 8   | 3,889                  | 5,95                       | 24,35               | 1,2  | Iskrzenie                      | 3,557                           | 52,0                       | 232,6               | 1,4  | -8,54            |
| 9   | 3,953                  | 6,33                       | 25,49               | 1,4  | Iskrzenie                      | 1,115                           | 12680                      | 181100              | 1,4  | -71,80           |
| 10  | 3,887                  | 5,98                       | 24,49               | 1,2  | Iskrzenie                      | 3,178                           | 365,0                      | 1828                | 1,4  | -18,24           |

Podczas testu obserwowano intensywne iskrzenie w obszarze kontaktów (rys. 7.8). W wyniku iskrzenia nastąpiło oddzielenie się warstwy metalizacji folii od metalizacji czoła i zbrązowienie tych obszarów (rys. 7.9), co oznaczało odparowanie metalizacji folii (rys 7.10). Warto podkreślić, że narażenie impulsem prądowym nie wpływa istotnie na rezystancję izolacji ze względu na stosowanie niskiego napięcia podczas tego testu. W egzemplarzach wykonanych prawidłowo, zmiany parametrów po przeprowadzonym teście są nieznaczne i mieszczą się w granicy dokładności pomiarowej użytej aparatury (według kryterium z punktu B.4.3).



**Rys. 7.8.** Występowanie iskrzenia w obszarze kontaktu podczas polaryzacji wadliwych egzemplarzy zwojek kondensatorów 4  $\mu\text{F}$  impulsem prądowym



**Rys. 7.9.** Widok wadliwych czoł kondensatorów po badaniu odporności na narażenia impulsem prądowym



**Rys. 7.10.** Fragment folii zwijki kondensatorowej z uszkodzoną podczas iskrzenia krawędzią od strony metalizacji czoła

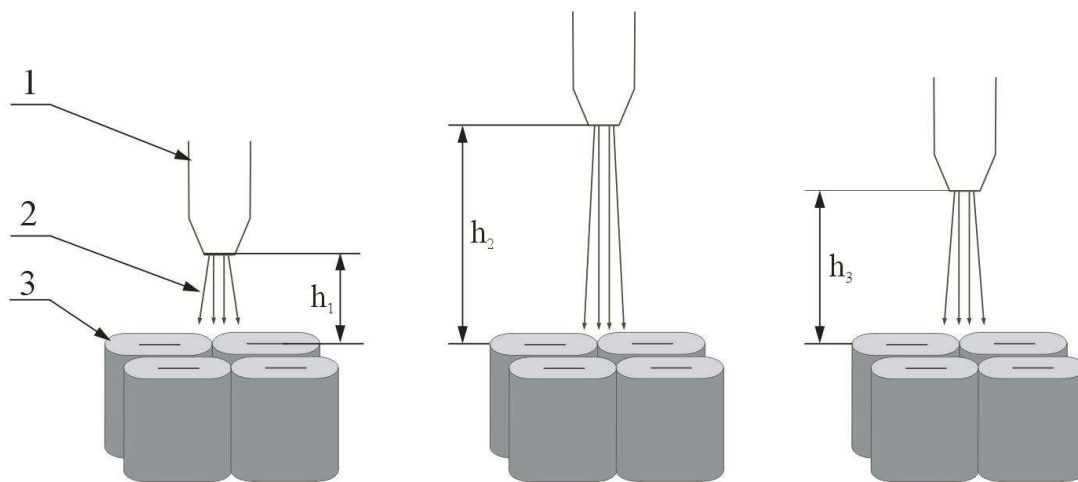
## 7.2. Badania kondensatorów przeciwzakłóceńowych o pojemności 470nF

Do badań, kondensatorów przeciwzakłóceńowych wybrano kondensatory o pojemności 470 nF. W tym celu przygotowano grupę kondensatorów, w których jedno czoło wykonano

zawsze zgodnie ze stosowanym procesem technologicznym, a drugie wykonano w jednym z trzech wariantów (rys. 7.11):

- a) czoło wykonane przy temperaturze metalu podczas napyłania wyższej niż optymalna,
- b) czoło wykonane przy temperaturze metalu podczas napyłania niższej niż optymalna,
- c) czoło wykonane zgodnie z procesem technologicznym.

Temperaturę metalu padającego na czoło zwijki ustalono przez zmianę wysokości dyszy nad powierzchnią czół zwijek. Dla najmniejszej odległości uzyskano przegrzanie czoła, a dla największej wykonanie metalizacji przy zbyt niskiej temperaturze.



**Rys. 7.11.** Ilustracja procesu napyłania metalowych czół kondensatorów: 1 – dysza napyłająca roztopione cząstki metalu, 2 – strumień cząstek metalu, 3 – czoła pakietu zwijek;  $h_1 < h_3 < h_2$  – odległości dyszy od czoła zwijek pozwalające uzyskać różne temperatury cząstek metalu

Kondensatory po wytworzeniu przebadano mierząc:

- pojemność  $C$ ,  $\text{tg}\delta$  przy dwóch częstotliwościach 1 kHz i 10 kHz oraz rezystancję szeregową  $R_s$  przy częstotliwościach 200 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz,
- przebiegi sygnałów akustycznych przy pobudzeniu kondensatora sygnałem impulsowym o szybkości zmian napięcia  $du/dt = 100 \text{ V}/\mu\text{s}$ ; użyto dwóch czujników akustycznych umieszczonych po obu stronach obudowy, w pobliżu obu czół.

W badanej grupie numerami 1 ÷ 15 oznaczono egzemplarze, w których metalizacja kontaktu z jednej strony została wykonana w temperaturze powyżej optymalnej dla tej operacji. Numerami 16 ÷ 30 oznaczono egzemplarze, w których metalizacja po jednej stronie została wykonana, gdy napyłany metal posiadał zbyt niską temperaturę. Natomiast numerami 31 ÷ 40 oznaczono grupę kondensatorów wykonanych prawidłowo. Po wstępnych pomiarach

wszystkie kondensatory poddano jednocześnie narażeniu impulsem prądowym, generowanym za pomocą układu z rys. 7.5. Zastosowano następujące parametry próby:

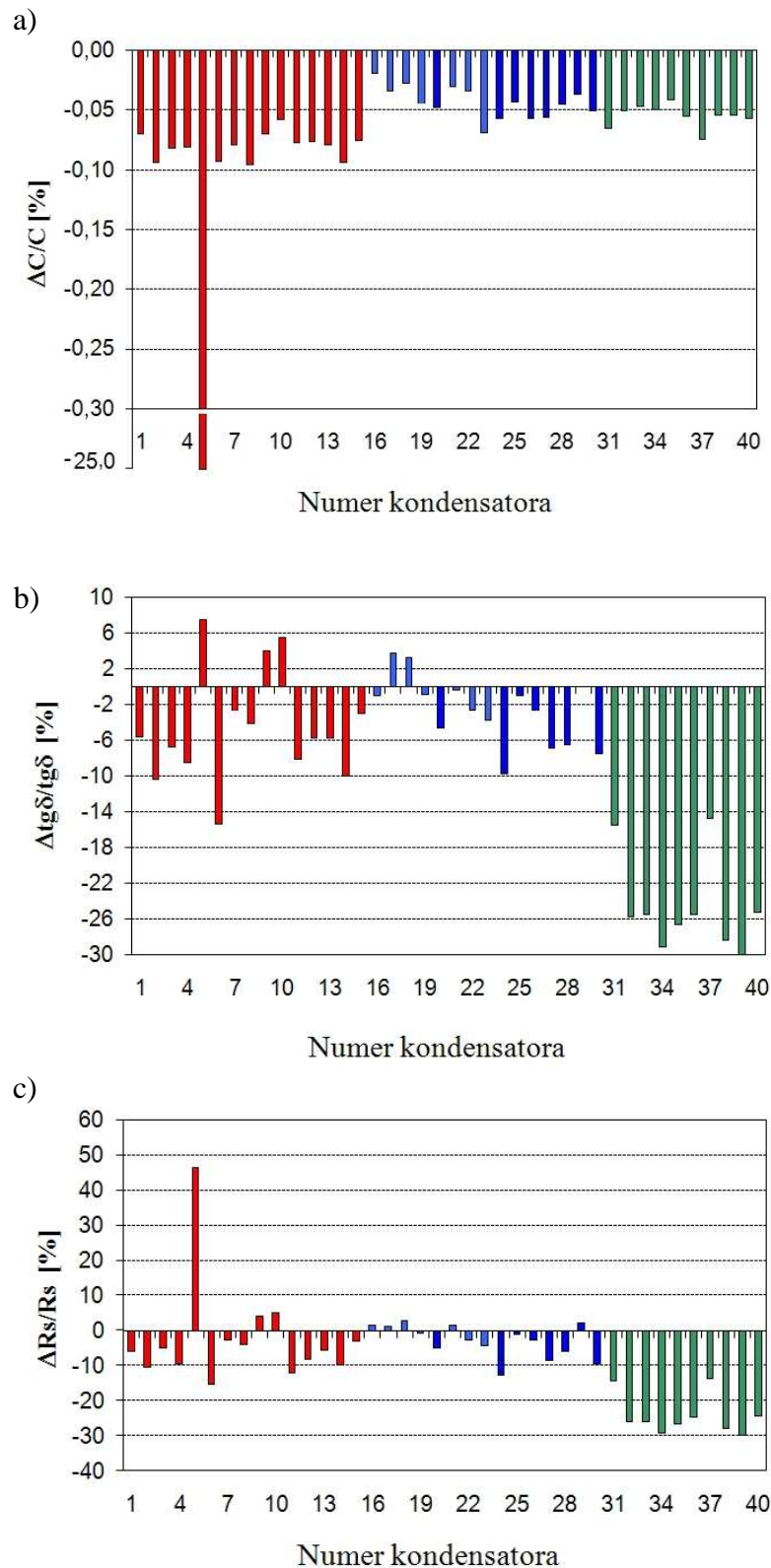
- $I_{\max} = 94 \text{ A}$  ( $J_{\text{imp}} = 0,15 \text{ A/cm}$ ,  $du/dt = 200 \text{ V}/\mu\text{s}$ ),
- $I_{\text{Cmax}} = 3 \text{ A}$  ( $J_{\text{rms}} = 5 \text{ mA/cm}$ ),
- napięcie ładowania  $U_{\text{DC}} = 390 \text{ V}$ ,
- czas próby 20 minut.

Po badaniu wykonano ponownie pomiary  $C$ ,  $\text{tg}\delta$  i  $R_s$ . Wyznaczono zmiany mierzonych wielkości w stosunku do wyników pomiarów wykonanych po wytworzeniu.

Po próbie pojemność kondensatorów uległa największej zmianie w grupie, w której jedno z czoł było przegrzane podczas napyłania metalizacji kontaktu. Tylko w tej grupie wystąpił egzemplarz, który przy utracie 25% pojemności uznaje się za wadliwy. W pozostałych grupach kondensatorów nie stwierdzono takich dużych zmian pojemności. Największe zmiany wartości współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  oraz rezystancji szeregowej  $R_s$  zaobserwowano w grupie poprawnie wykonanych kondensatorów. Występujące zmniejszanie się wartości  $R_s$  podczas próby obciążenia impulsami prądowymi wynika z procesu poprawy jakości kontaktu między warstwą metalizacji czoła a metalizacją zwijki folii. Tego zjawiska nie obserwuje się w przypadku egzemplarzy z kontaktem wykonanym w podwyższonej lub zaniżonej temperaturze. Dla kontaktów wykonanych przy zbyt wysokiej temperaturze przepływ impulsów prądowych może jedynie doprowadzić do pogorszenia właściwości tego kontaktu. Natomiast dla kontaktów wykonanych przy zaniżonej temperaturze ilość ciepła wydzielanego podczas narażenia impulsami prądowymi jest zbyt mała, aby poprawić właściwości tego kontaktu.

W trakcie próby przeprowadzono pomiary parametrów kondensatorów już po poddaniu narażeniom impulsowym po pierwszych 10 minutach próby. Uzyskano podobny charakter zmian parametrów kondensatorów jak po 20 minutach trwania próby (rys. 7.12). Wszystkie egzemplarze, które miały jeden z kontaktów wykonany przy zbyt wysokiej temperaturze, zmniejszyły swoją pojemność.

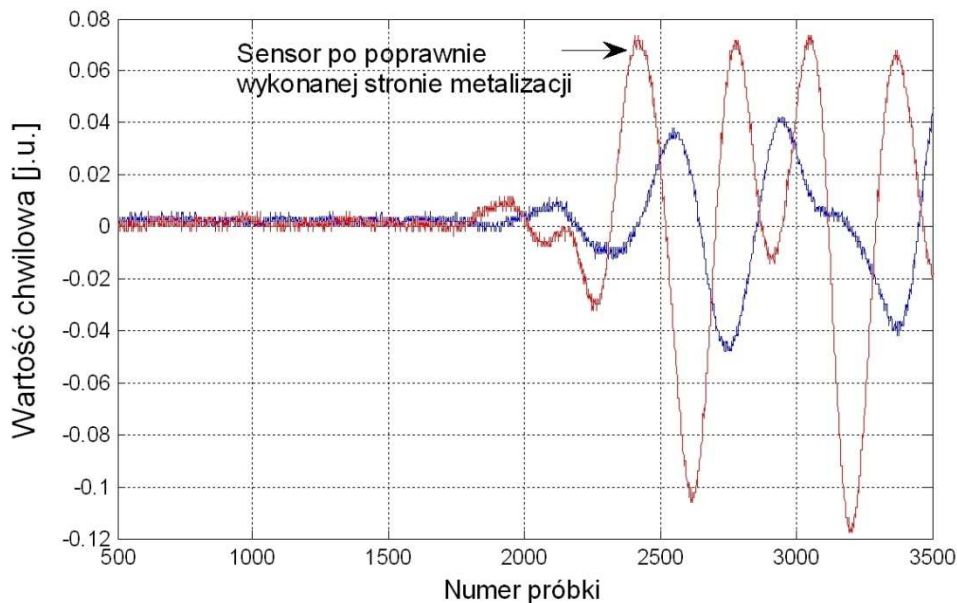
Proponowana procedura badań jest relatywnie krótka. Uzupełnienie dotychczasowych testów o taką metodę może znacznie poprawić szybkość oceny jakości kontaktów między czołem zwijki folii a warstwą jej metalizacji (wykrycie źle wytworzonych kondensatorów). Ponadto, może być ona bardzo użyteczna podczas badań porównawczych wykonywanych na próbkach różnych folii.



**Rys. 7.12.** Względne zmiany podstawowych parametrów kondensatorów 470 nF po poddaniu ich narażeniu impulsami prądowymi przez 20 minut: a) zmiany pojemności  $\Delta C/C$ , b) zmiany współczynnika stratności  $\Delta tg\delta/tg\delta$ , c) zmiany rezystancji szeregowej  $\Delta R_s/R_s$ ; kondensatory 1÷15 wykonano z metalizacją jednego czoła przy podwyższonej temperaturze, egzemplarze 16÷30 wykonano z metalizacją jednego czoła przy obniżonej temperaturze, egzemplarze 31÷40 wykonano poprawnie



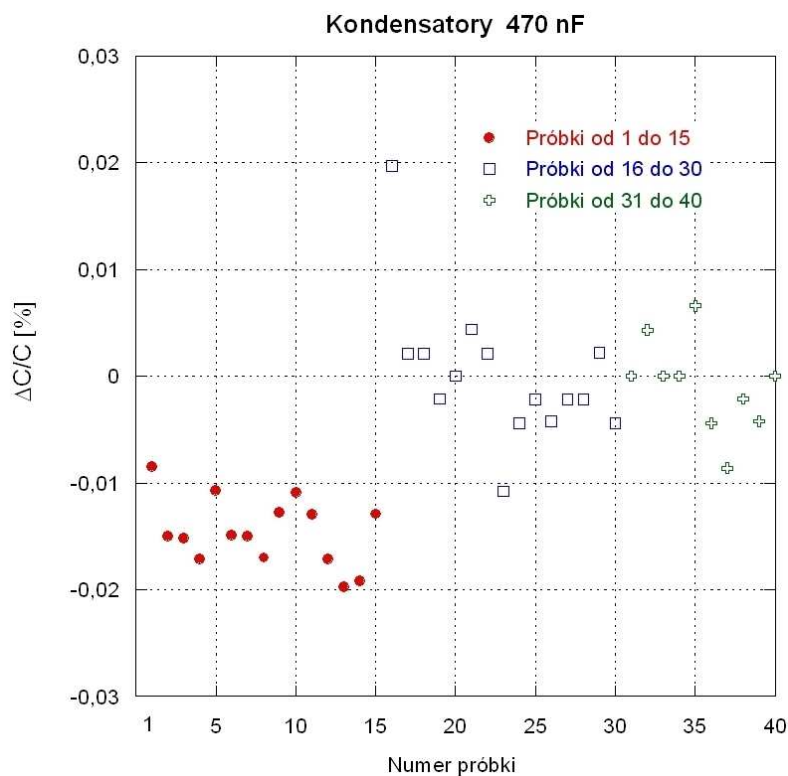
Dla badanych kondensatorów w trakcie narażania impulsami przeprowadzono dodatkowo pomiary sygnałów emisji akustycznej. W związku z różnicami w sposobie wykonania kontaktów kondensatorów spodziewano się także wystąpienia różnic w sygnałach akustycznych pochodzących z dwóch sensorów zamontowanych w pobliżu każdego z czoł kondensatora. Taki test byłby jeszcze krótszy, niż wyżej opisany. Największe różnice w przebiegach sygnałów akustycznych obserwowano dla grupy kondensatorów, w których jedna strona kontaktu była wykonana w zbyt wysokiej temperaturze. Wówczas, sygnał z sensora po stronie prawidłowo wykonanego kontaktu posiadał bardzo często regularne i intensywniejsze oscylacje oraz występował nieco szybciej, niż sygnał rejestrowany przez drugi sensor, umieszczony bliżej nieprawidłowo wykonanego kontaktu (rys. 7.13). Opóźnienie wynosiło około  $10\ \mu\text{s}$ , co odpowiadało 100 próbkom sygnału. Przyjmując, że sygnał akustyczny rozchodzi się w folii polipropylenowej z prędkością  $2740\ \text{m/s}$ , to podany czas odpowiada przebyciu odległości równej  $2,74\ \text{cm}$ . Ta wartość jest w przybliżeniu równa szerokości folii stosowanej w zwijkach badanych kondensatorów.



**Rys. 7.13.** Przebieg sygnału akustycznego rejestrowanego po obu stronach kondensatora  $470\ \text{nF}$  z wykonaną wadliwie (przeżrzaną) po jego jednej stronie warstwą metalizacji

Jako wyjaśnienie opisywanego przesunięcia w czasie między sygnałami rejestrowanymi przez sensory można przyjąć fakt, że sygnał akustyczny jest generowany głównie po stronie jednego kontaktu (wykonanego poprawnie o większej sprężystości mechanicznej), który powoduje, że zwijka po tej stronie łatwiej podlega drganiom mechanicznym podczas polaryzacji impulsem napięciowym. Opisanych różnic praktycznie nie obserwowano w grupie

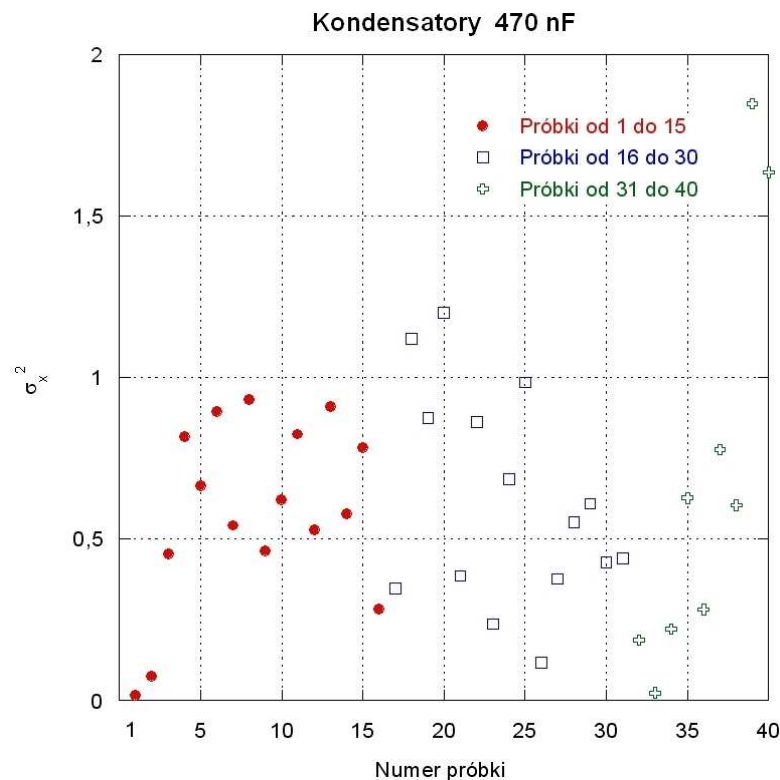
poprawnie wykonanych kondensatorów oraz kondensatorów z warstwą metalizacji wykonaną w niższej temperaturze. Należy podkreślić, że opisane różnice nie występowały w przypadku wszystkich kondensatorów z warstwą wytworzoną w podwyższonej temperaturze, a tylko części kondensatorów z tej grupy. Z tego względu nie można uzyskanych wyników wykorzystać do zaproponowania w pełni wiarygodnej metody testowania jakości kontaktów opartej o obserwowane przesunięcie sygnałów z obu czujników. Można przypuszczać, że na uzyskany wynik ma wpływ sposób wypełnienia obudowy kondensatora uszczelniaczem (syciwem), który w różny sposób wpływa na propagację sygnału ultradźwiękowego.



**Rys. 7.14.** Względne zmiany  $\Delta C/C$  pojemności kondensatorów klasy X2 470 nF po narażeniu impulsem prądowym przy szybkości zmian  $du/dt = 200 \text{ V}/\mu\text{s}$  przez 10 min; w próbkach o numerach 1÷15 warstwa metalizacji po jednej stronie została wytworzona w podwyższonej temperaturze, w próbkach o numerach 16÷30 warstwa metalizacji po jednej stronie została wytworzona w obniżonej temperaturze, próbki o numerach 31÷40 zostały wykonane poprawnie

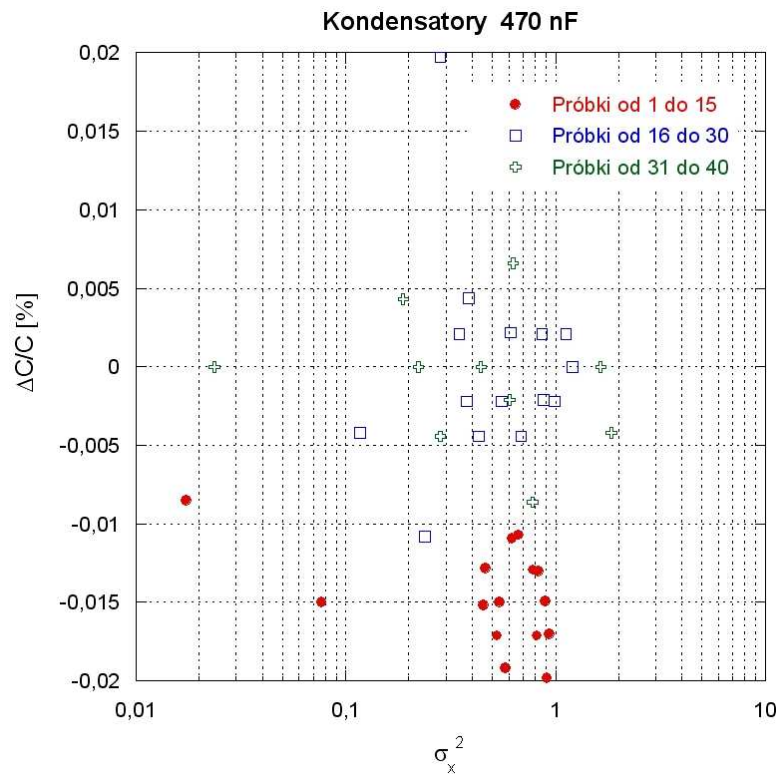
W badanych kondensatorach poza zmianą pojemności (rys. 7.14) obserwowano także różnice w intensywności sygnału emisji akustycznej rejestrowanego podczas polaryzacji kondensatora impulsem napięciowym w układzie z rys. 7.5. Na rys. 7.15 przedstawiono wariancję sygnału akustycznego dla wszystkich badanych grup kondensatorów, dla sensora umieszczonego zawsze po stronie odpowiadającej wadliwie wykonanemu kontaktowi. W przypadku grupy kondensatorów, w których jedno czoło było wykonane w nadmiernie

wysokiej temperaturze, wartości wariancji sygnału akustycznego były bardziej skupione niż dla pozostałych badanych grup kondensatorów. Na rys. 7.16 przedstawiono zależność między wariancją sygnału akustycznego, a zmianą pojemności w badanych kondensatorach. Można zauważyć, że kondensatory z warstwą metalizacji wykonaną w podwyższonej temperaturze zajmują zwartą część powierzchni wykresu (z wyjątkiem dwóch egzemplarzy), natomiast wyniki dla pozostałych kondensatorów są bardziej rozproszone na wykresie.



**Rys. 7.15.** Wariancja  $\sigma_x^2$  sygnału emisji akustycznej  $x(t)$  rejestrowanego podczas narażenia impulsem prądowym kondensatorów 470 nF klasy X2; numery próbek przyjęto jak na rys. 7.14

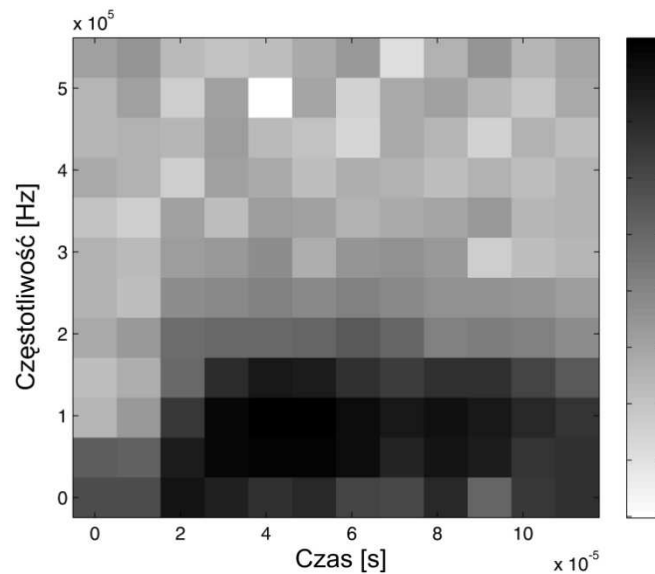
Przeprowadzone pomiary oraz analiza ich wyników pozwalają na ocenę poprawności warunków wytwarzania warstw metalizacji kontaktów podczas procesu technologicznego. Należy jednak podkreślić, że ze względu na potrzebę testowania jakości kondensatorów o charakterze dyskryminującym (test: go-nogo, dobry-wadliwy) wydaje się, że prostszym i krótszym czasowo pomiarem będzie badanie jakości każdego kondensatora za pomocą impulsu prądowego o ustalonej intensywności. W takim przypadku, gdy kontakt będzie nieprawidłowy, to proces iskrzenia spowoduje znaczącą lub nawet całkowitą utratę pojemności i wyeliminowanie wadliwej sztuki.



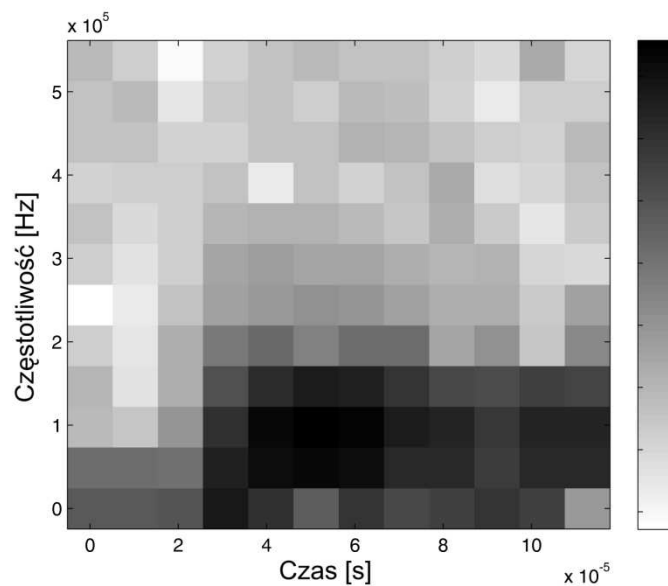
**Rys. 7.16.** Zależność wariancji  $\sigma_x^2$  sygnału emisji akustycznej  $x(t)$  podczas narażenia impulsem kondensatorów 470 nF klasy X2 w funkcji względnej utraty ich pojemności  $\Delta C/C$  w wyniku starzenia za pomocą impulsów prądowych przez czas 20 min; numery próbek kondensatorów przyjęto jak na rys. 7.14

Zarejestrowane przebiegi sygnałów emisji akustycznej zostały przeanalizowane także za pomocą metody analizy czasowo-częstotliwościowej, przez zastosowanie krótkoczasowej transformaty Fouriera dostępnej jako funkcja *specgram* w środowisku programu *Matlab* (rys. 7.17, rys. 7.18) [29, 54, 63]. Jednak mimo obserwowanych często wyraźnych różnic w wyznaczonych spektrogramach, nie udało się wykryć zależności statystycznych w badanej próbie, pozwalających jednoznacznie oceniać jakość poszczególnych kondensatorów na tej podstawie.

Dla kondensatorów przeciwzakłóceńowych klasy X2 oraz Y2, przeprowadza się badanie ich odporności na szybkie zmiany ładunku przy polaryzacji napięciem o szybkości zmian  $du/dt = 100 \text{ V}/\mu\text{s}$ , zgodnie z normą przemysłową EN 60384-14 [51]. Badanie polega na wykonaniu 10000 rozładowań kondensatora przez rezystor zapewniający odpowiednią wartość  $du/dt$ , z powtarzaniem procesu rozładowania co 1 s. Niestety, taka próba nie pozwala wykryć wszystkich egzemplarzy, które posiadają niepoprawnie wykonane kontakty. W przypadku kondensatorów silnikowych norma nie zaleca żadnego badania sprawdzającego odporność kondensatorów na impulsowe oddziaływanie prądu. Stąd, istnieje potrzeba opracowania bardziej selektywnego testu, niż obecnie stosowane.



**Rys. 7.17.** Spektrogram przykładowego sygnału emisji akustycznej generowanej podczas drgań prawidłowo wykonanego kondensatora o pojemności 470 nF w wyniku polaryzacji impulsem prądowym



**Rys. 7.18.** Spektrogram przykładowego sygnału emisji akustycznej generowanej podczas drgań kondensatora o pojemności 470 nF w wyniku polaryzacji impulsem prądowym; jedną z warstw metalizacji czoł w kondensatorze wykonano w podwyższonej temperaturze

Podsumowując, należy wnioskować, że ze względu na możliwość wdrożenia testu oceniającego jakość kondensatorów podczas produkcji w fabryce, prostszym i skuteczniejszym badaniem będzie test wytrzymałości kondensatorów za pomocą narażenia impulsem prądowym o ustalonej intensywności. Test taki odpowiada narażeniom jakim są poddawane kondensatory podczas eksploatacji. Ze względu na wydzielanie się ciepła w obszarze

kontaktów między warstwą metalizacji a zwijką folii, test ten będzie miał charakter niszczący dla egzemplarzy z wadliwie wykonanym kontaktem.

Z folii metalizowanych wykonywane są zwicki kondensatorowe o bardzo zróżnicowanych wartościach pojemności, od pojedynczych nF do setek  $\mu\text{F}$ . Często kondensatory o tych samych pojemnościach i napięciach znamionowych mają znacznie różniące się wymiary, ze względu na różną szerokość folii. Stąd, aby można przetestować jakość połączenia warstwy metalizacji folii z metalicznym czołem zwijki, należy określić wartość graniczną prądu przypadającego na jednostkę długości folii zwijki. Tę graniczną wartość określono eksperymentalnie przeprowadzając badania impulsowe kondensatorów przy różnych wartościach  $du/dt$  powodujących różne natężenia prądu na jednostkę długości folii. Ostatecznie poprawność doboru granicznej wartości została potwierdzona badaniami przeprowadzonymi w grupie 900 kondensatorów o pojemności  $7,5 \mu\text{F}$ . Ze wszystkich kondensatorów w tej grupie, które przeszły próbę narażenia impulsem prądowym, wybrano losowo 60 sztuk i poddano próbie trwałości przez 6000 h. Cała grupa przeszła pozytywnie próbę trwałości. Gdy wartości graniczne prądu podczas narażenia impulsowego zwiększono o 25%, to obserwowano już wpływ narażenia impulsowego na połączenie metalizacji folii z napyłonymi czołami kontaktów dla niektórych egzemplarzy. Natomiast, przy zmniejszeniu wartości prądu o 25% nie udało się wykryć wadliwych kondensatorów w kilku różnych próbach.

Podsumowując, na podstawie przeprowadzonych badań ustalono wartości graniczne parametrów dla dwóch rodzajów kondensatorów przeciwzakłóceńowych klasy X i Y z zakresu pojemności  $2 \text{ nF} \div 10 \mu\text{F}$  oraz silnikowych z zakresu pojemności  $1 \mu\text{F} \div 100 \mu\text{F}$ :

- wartość szczytową prądu przypadającego na jednostkę długości folii przy narażeniu impulsowym równą  $J_{\text{imp}} = 0,15 \text{ A/cm}$ ,
- wartość skuteczną prądu przypadającą na jednostkę długości folii przy narażeniu impulsowym równą  $J_{\text{rms}} = 5 \text{ mA/cm}$ .

Wybrane wartości graniczne prądu pozwalają ocenić poprawność wykonania połączenia warstwy metalizacji z metalizacją czoła, a jednocześnie nie powodują istotnego obniżenia trwałości kondensatorów, co wykazano podczas przeprowadzonej próby trwałości.

### 7.3. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono metodę oceny jakości połączenia metalizacji czoła ze zwijką folii. Niska jakość tego połączenia jest częstą przyczyną utraty pojemności przez kondensator. Zaproponowana metoda umożliwia ocenę jakości połączenia po teście polegającym na narażeniu impulsem prądowym o ustalonym przebiegu oraz intensywności. Kształt przebiegu określa przyjęty układ falownika, generującego sygnał polaryzujący kondensator podczas testu. Intensywność przebiegu ustalono eksperymentalnie, tak aby narażenie impulsem uszkadzało wadliwe egzemplarze i jednocześnie nie powodowało uszkodzenia kondensatorów wykonanych prawidłowo.

Skuteczność zaproponowanej metody przetestowano na dwóch typach kondensatorów: silnikowych o pojemności 4  $\mu\text{F}$  i przeciwzakłóceńowych o pojemności 470 nF. Do badań przygotowano grupy kondensatorów, w których jedno z czoł napylono w temperaturze różnej od optymalnej. Stwierdzono, że wystarczy proponowany test przeprowadzić w czasie kilkunastu minut, aby wykryć wadliwe egzemplarze. Uzyskany wynik pozwala na wielokrotne przyśpieszenie czasu badań jakości kondensatorów oraz istotne ograniczenie kosztów tych badań.

Prawidłowość wyboru parametrów impulsu prądowego podczas testu określono ustalając wartość maksymalną i skuteczną impulsu prądowego przypadającego na jednostkę długości folii w zwijce, co pozwala przeprowadzać taki test dla kondensatorów o różnych pojemnościach oraz kształtach. Stwierdzono eksperymentalnie, za pomocą dodatkowej próby starzeniowej przeprowadzonej w grupie 900 kondensatorów, że przyjęte wartości impulsu prądowego podczas testu nie wpływają na obniżenie jakości poprawnie wykonanych kondensatorów.

W rozdziale podano wyniki pomiarów sygnałów emisji akustycznej, generowanych podczas polaryzacji kondensatora impulsem prądowym. Uzyskane wyniki nie pozwoliły na jednoznaczną identyfikację wadliwego kontaktu w badanych kondensatorach. Można przypuszczać, że jest to spowodowane różnym tłumieniem sygnału akustycznego w objętości materiału (tzw. syciwa) wypełniającego obszar między zwijką folii a obudową kondensatora.

## 8. Wnioski końcowe

---

Kondensatory foliowe są tanimi i powszechnie stosowanymi elementami w układach zasilania. Powszechność stosowania implikuje potrzebę długotrwałej i niezawodnej pracy. Ponadto, uszkodzenie kondensatora podczas eksploatacji może spowodować zakłócenia w funkcjonowaniu urządzenia. Stąd, problematyka oceny jakości tych elementów ma istotne znaczenie praktyczne i stała się przedmiotem niniejszej pracy.

Jakość kondensatorów oraz wartości parametrów charakteryzujących te elementy są uzależnione od zjawisk zachodzących w materiałach zastosowanych do ich produkcji, zwłaszcza w dielektryku oraz w kontaktach metalizacji folii z warstwą metalizacji czół zwijki. Oba wyróżnione obszary są kształtowane w odrębnych procesach technologicznych. Dlatego też postawiony w pracy cel opracowania nowych metod oceny jakości kondensatorów foliowych za pomocą pomiarów sygnałów emisji akustycznej oraz badania odporności na narażenia impulsami prądowymi, ma istotne znaczenie dla określania jakości wytwarzanych kondensatorów. Ponadto, proponowane metody ze względu na krótki czas przeprowadzania badań umożliwiają szybkie testowanie próbek prototypowych w celu porównania zastosowanych materiałów od różnych dostawców.

W rozprawie przedstawiono wyniki szeregu badań jakim poddano wybrane, ze względu na znaczenie w produkcji, typy kondensatorów wykonanych z folii metalizowanej. Pozwoliły one na wskazanie metod umożliwiających ocenę jakości kondensatorów już na etapie produkcji oraz bezpośrednio po ich wytworzeniu, bez konieczności stosowania długotrwałych normatywnych badań trwałości. Walidacja proponowanych metod oceny jakości została potwierdzona wynikami uzyskanymi po poddaniu badanych grup kondensatorów próbom trwałości o czasie nawet do 6000 h.

W pracy postawiono cztery główne tezy:

1. Analiza sygnałów emisji akustycznej zwijek folii ściskanych mechanicznie pozwala wykryć występowanie obszarów wtrącin gazowych, gdzie mogą zachodzić wyładowania niezupełne.
-



2. Prawdliwość wykonania kontaktu między metalizacją folii a metalizacją czoła zwijki można wykryć za pomocą narażenia impulsem prądowym o ustalonej intensywności.
3. Intensywność sygnałów emisji akustycznej powodowanych wyładowaniami niezpełnymi i obserwowanych w trakcie próby wytrzymałości elektrycznej pozwala przewidywać zmianę właściwości wybranych typów kondensatorów w wyniku ich starzenia.
4. Charakterystyki wybranych parametrów kondensatorów w funkcji napięcia polaryzacji decydują w znacznym stopniu o czasie ich poprawnej pracy.

Wyniki dowodzące słuszności pierwszej tezy przedstawiono w rozdziale 6.3, gdzie wykazano, że zwijki ściskane mechanicznie generują sygnał emisji akustycznej w wyniku tarcia w obszarach występowania wtrącin gazowych. Stwierdzono, że parametry sygnałów emisji akustycznej przy ustalonym naprężeniu zależą od jakości zwijki. Obecnie brak jest jakiegokolwiek metody oceny zwijek po procesie ich termicznej obróbki. Przy ocenie jakości zwijek bazuje się jedynie na pomiarach wykonywanych w dalszych etapach produkcji, co często jest obarczone błędami wynikającymi z wpływu innych etapów procesu produkcyjnego. Proces termicznego kształtowania zwijki jako jeden z najważniejszych determinuje często czas poprawnej eksploatacji kondensatora. Dlatego wdrożenie skutecznej metody jego oceny jest bardzo pożądane.

Druga teza została potwierdzona wynikami przedstawionymi w podrozdziałach 7.1 i 7.2. Stwierdzono, że jakość połączenia metalizacji folii z warstwą metalizacji czoła zwijki decyduje często o jakości kondensatora i zmianach jego pojemności w trakcie eksploatacji. Jakość tego połączenia może być oceniona przez przepływ impulsu prądowego o ustalonej wartości, który powoduje zniszczenie wadliwych egzemplarzy.

Trzecia teza została potwierdzona wynikami pomiarów przedstawionymi w rozdziale 6.1. Natomiast czwarta teza wynikami zawartymi także w rozdziale 6.1 oraz rozdziale 6.2. Rozdział 6.1 opisuje wyniki próby trwałości kondensatorów przeciwzakłóceńowych. Przedstawiono w nim analizę wskazującą na związek między wynikami pomiarów wstępnych niektórych parametrów, wykonanych przy odpowiednio dużym napięciu polaryzacji kondensatorów ( $R_{izol}$ ,  $tg\delta$ ) oraz intensywności sygnałów emisji akustycznej podczas próby wytrzymałości elektrycznej, a zmianami pojemności  $\Delta C/C$  po próbie trwałości lub czasem poprawnej pracy kondensatorów  $\tau_0$ . W rozdziale 6.2 przedstawiono wyniki potwierdzające znaczącą korelację między pomiarami wybranych charakterystyk napięciowych

kondensatorów silnikowych po ich wytworzeniu, a zmianami pojemności  $\Delta C/C$  po próbie trwałości 6000 h.

Wyniki badań pozwoliły na zaproponowanie nowych metod oceny jakości kondensatorów, na poszczególnych etapach procesu technologicznego ich wytwarzania. Autor proponuje wprowadzenie następujących oryginalnych metod oceny jakości kondensatorów foliowych, polegających na:

- badaniu czy energia sygnału emisji akustycznej rejestrowanego podczas ściskania zwijek przekroczy przyjętą wartość progową,
- testowaniu jakości gotowych kondensatorów przez polaryzację ustalonym impulsem prądowym, niszczącym egzemplarze o wadliwie wykonanych kontaktach między zwijką a metalizacją czoła,
- badaniu zmiany wartości  $\text{tg}\delta$  przy zmianie polaryzacji kondensatora od  $U_N$  do  $2U_N$  i kwalifikacji na tej podstawie do dwóch grup jakości,
- pomiarach rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  przy napięciu polaryzacji  $2\sqrt{2}U_N$  i kwalifikacji na podstawie wartości średniej dla danego typu kondensatorów do jednej z dwóch grup jakości.

Równoczesne spełnienie warunków stawianych przez wszystkie proponowane metody pozwala wybrać kondensatory o wysokiej jakości.

Wymienione procedury pozwalają na rezygnację z długotrwałych badań szeregu prototypowych konstrukcji. Obecnie, ze względu na częste zmiany materiałów stosowanych do produkcji kondensatorów, istnieje konieczność ich szczegółowego testowania celem wyboru materiału o odpowiedniej jakości. Stosując proponowane metody można szybciej zareagować na nieprawidłową jakość dostarczanej folii lub wady powstające podczas produkcji. Szczegółową treść instrukcji opisującej prowadzenie badań testowanych kondensatorów załączono w Dodatku B pracy. Warto podkreślić, że możliwość selekcji kondensatorów do grupy o założonym lub nawet wydłużonym czasie bezawaryjnej eksploatacji pozwala spełnić oczekiwania szeregu odbiorców stawiających znacznie wyższe wymagania, niż wynikające z istniejących norm przemysłowych.

Podsumowując, efektem przeprowadzonych badań poza wymienioną w Dodatku B instrukcją, jest:

- opracowanie dwóch zgłoszeń patentowych,
- wygłoszenie i opublikowanie sześciu artykułów w materiałach konferencyjnych lub zeszytach naukowych,

- przygotowanie i opublikowanie czterech artykułów w recenzowanych czasopismach (w tym dwa w czasopismach wyróżnionych w JCR),
- przygotowanie propozycji kolejnego artykułu, przekazanego do recenzji w *Microelectronics Reliability*.

Wyniki badań są już wdrożone do oceny jakości kondensatorów w procesie produkcji w Zakładach Podzespołów Radiowych MIFLEX, a zdobyte przez autora doświadczenie będzie z pewnością wykorzystane przy projektowaniu i przygotowywaniu produkcji nowych wyrobów, w tym także kondensatorów o podwyższonym czasie poprawnej pracy.

W pracy przeprowadzono analizy wyników z wykorzystaniem szeregu programów komputerowych. Do analizy czasowo-częstotliwościowej zarejestrowanych przebiegów sygnałów emisji akustycznej został użyty program *Matlab*, funkcja *specgram*. Do wyznaczenia współczynnika korelacji liniowej między wynikami pomiarów użyto programu *MS Excel*. W tym programie przeprowadzono również aproksymację czasu poprawnej pracy kondensatorów na podstawie pomiarów podczas próby trwałości. Aproksymacja była przeprowadzona za pomocą regresji liniowej, z zastosowaniem funkcji *reglinp*. Ponadto, przeprowadzono analizę rozkładu pola elektrycznego w wybranych fragmentach kondensatora używając programu *FEMM*, który stosuje metodę elementów skończonych.

W następstwie przeprowadzonych prac badawczych i analiz otrzymanych wyników, autor uważa, że prowadzone prace warto kontynuować w zakresie:

- badań sygnałów emisji akustycznej generowanych pod wpływem mechanicznego naprężania zwijek w kształcie walca, które nie były analizowane w pracy,
- oceny zjawiska absorpcji dielektrycznej w stosowanych dielektrykach (pomiaru ładunku powrotnego i innych wielkości określających parametry kondensatora po jego rozładowaniu).

---

## 9. Literatura

---

- [1] Bachora Ł., Kotarski M., **Józwiak K.**, Smulko J.: Dwa zastosowania procesorów sygnałowych w układach przetwarzania i akwizycji danych. Zesz. Nauk. Wydz. Elektrotech. i Autom. P. Gdańsk., nr 25, s. 13–16, 2008.
- [2] Barlik R., Nowak M.: Technika tyrystorowa. WNT Warszawa, 1998.
- [3] Bassim M.N., Dudar M., Rifaat M., Roller R.: Application of acoustic emission for non destructive evaluation of utility inductive reactors. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, no. 1, s. 281–284, January 1993.
- [4] Bendat J., Piersol A.: Random Data: Analysis & Measurement Procedures. Wiley & Sons, New York, 2000.
- [5] Benzerouk D.: Pulse Sequence Analysis and Pulse Shape Analysis: Methods to Analyze Partial Discharge Processes. PhD Thesis, University of Siegen, Germany, 2008.
- [6] Boczar T., Borucki S., Cichoń A.: The analysis of the acoustic emission signals generated by multisource partial discharges. Molecular and Quantum Acoustics vol. 28, s. 13–22, 2007.
- [7] Boczar T., Zmarzły D.: Application of wavelet analysis to acoustic emission pulses generated by partial discharges. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.11, no. 3, s. 433–449, 2004.
- [8] Boczar T.: Identification of a specific type of PD from acoustic emission frequency spectra. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 8, no. 4, s. 598–605, August 2001.
- [9] Boczar T.: Widma emisji akustycznej generowanej przez wyładowania niezupełne w izolacji olejowej, SiM, z. 114, Politechnika Opolska, Opole 2003.
- [10] Boggs S., Pathak A., Walker P.: Partial discharge. High frequency attenuation in shielded solid dielectric power cable and implications thereof for PD location. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 12, no. 1, s. 9–16, 1996.
- [11] Budzisz M., Nowacki Z., Szewczyk J.: Laboratorium przekształtników. Łódź, 1994.

- 
- [12] Dudkiewicz J: Pomiary teletransmisyjne. WKiŁ, Warszawa, 1984.
- [13] Flisowski Z: Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa, 1992.
- [14] Goworkow W.A.: Pola elektryczne i magnetyczne. WNT, Warszawa 1978.
- [15] Grzybowski S.: Kondensatory w energoelektryce. WNT, Warszawa 1968.
- [16] Gulski E., Kreuger F.: Computer-aided analysis of discharge patterns. J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 23, s. 1569–1575, 1990.
- [17] Gulski E.: Digital Analysis of Partial Discharges. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 2, s. 828–837, 1995.
- [18] Hasse L., Smulko J.: Quality assessment of high voltage varistors by third harmonic index. Metrology and Measurement Systems, vol. 15, no. 1, s. 23–31, 2008.
- [19] Ho J., Jow T.R., Boggs S.: Historical Introduction to Capacitor Technology, IEEE Electrical Insulation Magazine January/February — vol. 26, no. 1, s. 20–25, 2010.
- [20] **Józwiak K.**, Hasse L., Olesz M., Smulko J.: Badanie emisji akustycznej kondensatorów foliowych przy napięciowym pobudzeniu impulsowym. Zeszyty Naukowe Wydziału ETI Politechniki Gdańskiej Technologie Informacyjne, t. 19, 2010.
- [21] **Józwiak K.**, Hasse L., Olesz M., Smulko J.: Pomiary wyładowań niezupełnych w kondensatorach foliowych. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), nr 9, s. 55–59, 2010.
- [22] **Józwiak K.**, Hasse L., Olesz M., Smulko J.: Pomiary wyładowań niezupełnych w kondensatorach foliowych. V Kongres Metrologii, 6–8 września 2010, Łódź, Politechnika Łódzka, s. 150–151.
- [23] **Józwiak K.**, Olesz M., Smulko J.: Measurements of acoustic emission induced by partial discharges in foil-based capacitors for their quality assessment. XIX IMECO World Congress Fundamental and Applied Metrology, September 6–11, Lisbon, Portugal, s. 1375–1379, 2009.
- [24] **Józwiak K.**, Smulko J.: Methods of quality characterization of foil-based capacitors. Metrology and Measurement, Systems, vol. 15, no. 2, s. 305–316, 2008.
- [25] **Józwiak K.**, Smulko J.: Problemy wytwarzania i testowania kondensatorów z folii metalizowanych. PAK, vol. 55, nr 5, 2009.
- [26] **Józwiak K.**, Olesz M., Hasse L., Smulko J.M.: Quality Prediction of Foil Capacitors by Acoustic Emission Signals. EWGAE, Vienna, 2010.
- [27] Karkowski M.: Elektrotechnika Teoretyczna Pole Elektromagnetyczne. Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 1995.
- [28] Kil G.S., Song J.E.: Study on a Partial Discharge Test for Low-Voltage Electronic Components. Journal of Korean Physical Soc. vol. 49, no. 6, s. 2311–2315, 2006.
-

- 
- [29] Knight A.: Basic of MATLAB and beyond. Chapman and Hall CRC, 1999.
- [30] Koptavy P., Koptavy B., Liederman K., Sedlakova V., Sikula J.: Current fluctuations in M-I-M capacitors, 1995.
- [31] Konczakowska A.: 1/f noise of electrolytic capacitors as a reliability indicator, *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 14, no. 2, s. 83–85, March/April 1998.
- [32] Konczakowska A.: Szumy małowzestotliwosciowe a indywidualne prognozowanie niezawodnosci elementow elektronicznych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Gdanskiej*, nr 485, 1992.
- [33] Kossakowski J.: Elementy dyskretne RC Poradnik. MON, Warszawa, 1979.
- [34] Kotecki J.: Kondensatory. WKiŁ, Warszawa, 1962.
- [35] Kreuger F. H., Gulski E., Krivda A.: Classification of Partial Discharges. *IEEE Transactions on Electrical Insulation* vol. 28, no. 6, s. 917–931 1993.
- [36] Kreuger F.: Discharge detection in high voltage equipment. Heywood Book. London, 1964.
- [37] Kuffel E., Zaengel W. S., High – Voltage Engineering. Fundamental, Pergamon Press, Oxford, 1984.
- [38] Kwan Chi Kao: Dielectric phenomena in solid with emphasis on physical concepts of electronic processes. San Diego, USA, 2004.
- [39] Litwin R.: Teoria pola elektromagnetycznego. WNT, Warszawa, 1976.
- [40] Lucinski J.: Układy tyrystorowe. WNT, Warszawa, 1973.
- [41] Macur J., Domansky K., Sikula J.: Stochastic character of partial discharges in insulators. *Journal of Applied Physics*, vol. 67, s. 540–542, 1990.
- [42] Macur J., Koptavy B., Sikula J., Vasina P.: Noise on a metal – insulation contact. *Proc. of Int. Conf. on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations*, s. 313–315, 1991.
- [43] Majchrzak E. Mochnacki B.: Metody numeryczne Podstawy teoretyczne, Aspekty praktyczne i algorytmy, Wydawnictwo Politechniki Slaskiej, Gliwice 2001.
- [44] Massart D.L., Vandeginste B.G.M., Buydens L.M.C., Jong S., Lewi P.J., Smeyers-Verbeke J.: Handbook of chemometrics and qualimetrics, part A. Elsevier, Amsterdam, 1997.
- [45] Mendel, J.: Tutorial on Higher-Order Statistics (Spectra) in Signal Processing and System Theory: Theoretical Results and some Application. *Proc. of the IEEE*, vol. 79, no. 3, s. 278–305, 1991.
-

- 
- [46] Montanari G.C.: The Electrical Degradation Threshold of Polyethylene Investigated by Space Charge and Conduction Current Measurements, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, no. 3, 2000.
- [47] Morley A., Campbell D.S.: Electrolytic capacitors—their fabrication and the interpretation of their operational behavior. *Radio Electron. Eng.*, vol. 43, no. 7, s. 421–429, 1973.
- [48] Mroczka J., Szczuczyński D.: Inverse problems formulated in terms of first-kind Fredholm integral equations in indirect measurements. *Metrology and Measurement Systems*, vol. 16, no. 3, s. 333–357, 2009.
- [49] Norma przemysłowa: PN-EN 50160:2002. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
- [50] 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.
- [51] 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.
- [52] Olesz M., **Józwiak K.**: Metody pomiaru izolacji kondensatorów niskonapięciowych. *Metrologia dziś i jutro: praca zbiorowa*. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, s. 185–192, Gdańsk, 2009.
- [53] Olesz M.: The influence of switching impulses on degradation of polyethylene insulation. *EMD 2005, XV International Conference on Electromagnetic Disturbances*, Białystok, Poland, 2005.
- [54] Osowski S., Cichocki A., Siwek K.: *Matlab w zastosowaniu do obliczeń obwodowych i przetwarzania sygnałów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [55] Osvath P., Zaengl W., Weber H.J.: *Pomiary wyładowań niezupełnych*. *Tettex Information*, nr 311, 1985.
- [56] Patsch R., Berton F.: Pulse Sequence Analysis – A Diagnostic Tool Based on the Physics behind Partial Discharges. *J. Physics D: Applied Physics*, vol. 35, s. 25–32, 2002.
- [57] Patsch R., Berton F.: Pulse Sequence Analysis – Chances to Characterize Defects. *Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, Austin, Texas, USA, s. 243–248, 1999.
- [58] Patsch R., Hoof M., Reuter C.: Pulse-Sequence-Analysis, A Promising Diagnostic. *The 8th Int’l Symposium on High Voltage (ISH)*, Yokohama, Japan, s. 157–160, 1993.
-

- 
- [59] Patsch R., Hoof M.: Pulse-Sequence-Analysis, the Physics Behind. Proc. of Int. Workshop on Electrical Insulation and 25th Symposium on Electrical Insulating Materials, Nagoya, Japan, s. 111–114, 1993.
- [60] Pilawski M.: Fizyczne podstawy elektrotechniki. WSiP, Warszawa 1987.
- [61] Plucińska A., Pluciński E.: Elementy probabilistyki, PWN, Warszawa 1990.
- [62] Qi X., Ronzello J., Boggs S.: Dielectric Properties of Metallized Paper-film Capacitors, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 12, no. 6, s. 1235–1240, 2005.
- [63] Qian S., Chen D.: Understanding the nature of signals whose power spectra change with time. Joint Analysis. IEEE Signal Processing Magazine, vol. 16, no. 2, s. 52–67, 1999.
- [64] Qin S., Boggs S. A.: Design of Longitudinal ultrasection Foil-film Capacitors, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 17, no. 6, s. 1884–1887, 2010.
- [65] Ram N., Prasad C., Sunanda K.P.: Dielectric Materials: Introduction, Research and Applications, New York, 2009.
- [66] Reboul J.M., Rouff M., Carin R.: Characterization of dielectric films for power capacitors by space charge technique. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, s. 323–326, 2002.
- [67] Se-Hee L., Byeong-Yoon L., Hong-Kyu K., Heung-Geun K.: Local Heat Source Approximation Technique for Predicting Temperature Rise in Power Capacitors, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, no. 3, s. 1250–1253, March 2009.
- [68] Shigeru A., Hiroyuki S.: Ultrasonic Emission Tactile Sensing. IEEE Control Systems, s. 61–69, 1995.
- [69] Shkuratov S.I., Talantsev E.F., Hatfield L.L., Dickens J.C., Kristiansen M.: Single-Shot, Repetitive, and Lifetime High-Voltage Testing of Capacitors, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 30, no. 5, s. 1943–1949, October 2002.
- [70] Sikula J., Hruska P., Koktavy B., Vasina P., Vymlatil S.: Noise and degradation of electrolytic capacitors. 16th Capacitor and Resistors Technology Symposium, 11–15 March, 1996.
- [71] Sikula J., Koktavy B., Hruska P., Vasina P., Koktavy P., Hajek K.: Partial Discharges as Reliability Indicator in Foil Capacitors, Proc. of CARTS Europe, s. 82–85, 1997.
- [72] Sikula J., Navarova H., Koktavy B., Kosikova I., Koktavy P. and Vasina P.: Acoustic emission and partial discharges in ceramic tiles, EWGAE, Vienna, 1999.
- [73] Sikula J., Pavelka J., Hashiguchi S., Vasina P., Zednicek T.: Low frequency noise of thin insulating films, Proc. of Int. Conf. on Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations, Hong-Kong, 26 August. s. 130–133, 1997.
-



- 
- [74] Sikula J., Pavelka J., Grmela L.: Noise and Self-Healing of Tantalum Capacitors, CARTS 2002: 22nd Capacitor And Resistor Technology Symposium, s. 25–29, March 2002.
- [75] Skubis J., Gronowski B., Ranachowski J., Zalewski J.: Pomiary tłumienia emisji akustycznej od wyładowań elektrycznych w materiałach elektroizolacyjnych, IPPT PAN Warszawa 1986.
- [76] Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. Polska Akademia Nauk, Instytut Podstawowych Problemów Techniki, Warszawa, 1993.
- [77] Skubis J.: Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej, Politechnika Opolska, 1998.
- [78] Smulko J., **Józwiak K.**, Olesz M., Hasse L.: Acoustic emission for detecting deterioration of capacitors under aging, *Microelectronics Reliability*, vol. 53, no. 3, s. 621–627, 2011.
- [79] Stevens J.L., Shaffer J.S., Vandenharn J.T.: The Service Life of Large Aluminum Electrolytic Capacitors: Effects of Construction and Application, *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 38, no. 5, s. 1441–1445, 2002.
- [80] Sukiennicki A. Zagórski A.: *Fizyka ciała stałego*. WNT, Warszawa, 1984.
- [81] Szmajda M., Górecki K., Mroczka J.: Gabor Transform, SPWVD, Gabor-Wigner Transform and Wavelet Transform - Tools for Power Quality monitoring. *Metrology and Measurement Systems*, vol. 17, no. 3, s. 383–396, 2010.
- [82] Weber H.J.: Technika pomiaru wyładowań niezupełnych. *Tettex Information*, nr 310, 1985.
- [83] Wira A., Zybert R.: *Laboratorium techniki wysokich napięć*. Łódź, 1973.
- [84] Wodziński J.: *Wysokonapięciowa technika laboratoryjna*. Łódź, 1973.
- [85] Wodziński J.: *Wysokonapięciowa technika probiercza i pomiarowa*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1978.
- [86] Wodziński J.: *Wysokonapięciowa technika prób i pomiarów*. WNT, Warszawa 1997.
- [87] Yanning Q., Guangning W., Xueqin Z., Xiaohua L., Wen S.: Detecting Instrument for DC Partial Discharge within Storage Capacitor. *Conference Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, s. 326–331, 2006.
- [88] Yanuar Z.A., Katsunori K., Takehiko M., Shinya O., Masayuki H.: Effect of Fillers on Ageing Properties by Partial Discharge of EPR Used in Cable Insulation, *Proc. of Asian Conference on Electrical Discharge*, Shenzhen, China, s. 466–469, 2004.
- [89] Zagajewski T.: *Układy elektroniki przemysłowej*. WNT, Warszawa, 1971.
-

- [90] Zalewski J.: Dielektryki kondensatorów energetycznych. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Opolu, Opole, 1988.
- [91] Katalog EPCOS: Film Capacitors Data Book 2005.
- [92] Katalog firmy Tettex, Tettex Information 311, Technika pomiaru wyładowań niezupełnych.
- [93] [www.femm.info/wiki/Download](http://www.femm.info/wiki/Download) v. 4.2. Strona oprogramowania do analizy rozkładu pola elektrycznego.
- [94] [www.capacor.com](http://www.capacor.com). Strona producenta kondensatorów CAPACOR.

### **Zgłoszenia patentowe**

- [P1] **Józwiak K.**, Olesz M., Smulko J., Hasse L.: Sposób i układ do oceny jakości kondensatorów foliowych indukowanych elektrycznie drganiami mechanicznymi. Zgłoszenie patentowe nr P.390928, 2010.
- [P2] Smulko J., Olesz M., **Józwiak K.**: Sposób i układ do oceny jakości kondensatorów foliowych. Zgłoszenie patentowe nr P.38.94.62, 2009.

## Dodatek A

### Aproksymacja czasu poprawnej pracy kondensatorów podczas próby trwałości

W trakcie prowadzonych, zgodnie z normą PN-EN 60384-14 dla kondensatorów 470 nF, badań określono czas  $\tau$  ich poprawnej pracy podczas próby trwałości jako czas, w którym pojemność kondensatora nie zmniejszyła się o więcej niż 10%. Podczas próby tylko niewielka część badanych egzemplarzy zmniejszyła swoją pojemność w podanym zakresie. Wartość  $\tau$  dla pozostałych egzemplarzy wyznaczono aproksymując zmiany pojemności w czasie próby za pomocą równania liniowego. Przy zmianach pojemności do 10% taka aproksymacja wydaje się wystarczająco dokładna (rys. A.1). Pozwala to wyznaczyć wartości  $\tau$  dla wszystkich badanych egzemplarzy w akceptowanym w praktyce czasie prowadzenia próby trwałości, przy niedokładności maksymalnie rzędu kilkunastu procent.

W proponowanej metodzie należy wyznaczyć współczynniki  $a$  i  $b$  równania prostej według zależności:

$$y = a \cdot x + b \quad (\text{A.1})$$

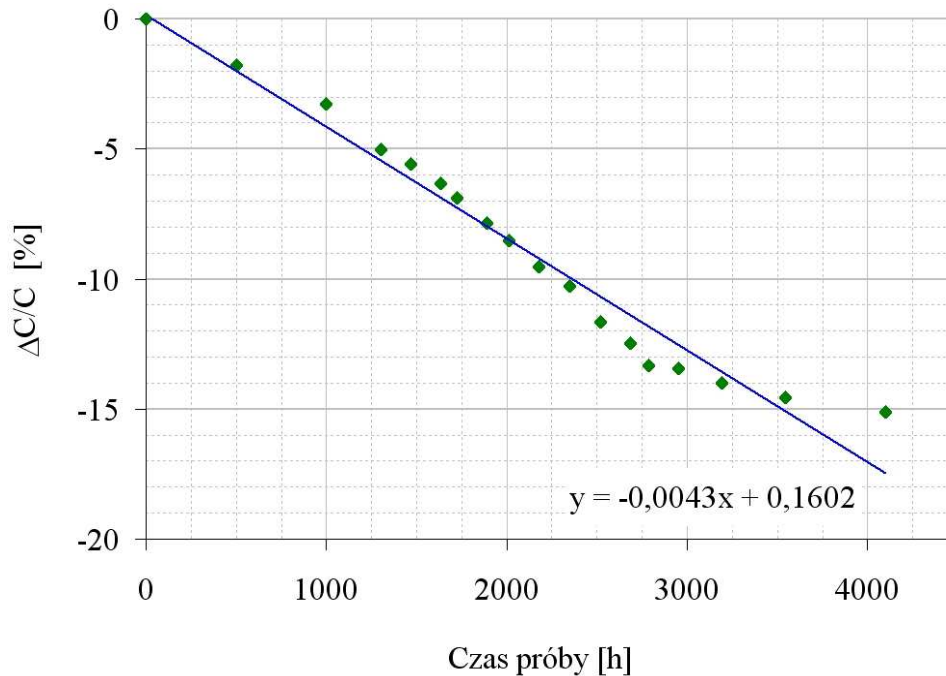
na podstawie zbioru wartości mierzonych punktów  $(y_i, x_i)$  dla  $i = 1, 2, \dots, N$ . Wartości  $y_i$  określają względną zmianę pojemności  $\Delta C/C$  mierzoną po zadanym czasie  $\tau$  trwania próby trwałości. Stąd, w równaniu (A.1) wartości  $x_i$  są równe momentom czasu  $\tau$  trwania próby, gdy wyznaczano  $\Delta C/C$ . Współczynniki  $a$  i  $b$  według metody najmniejszych kwadratów można wyznaczyć ze wzorów [4, 43]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N y_i - N \cdot \sum_{i=1}^N (x_i y_i)}{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2 - N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (\text{A.2})$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot \sum_{i=1}^N (x_i y_i) - \sum_{i=1}^N y_i \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N x_i\right)^2 - N \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2} = \frac{\sum_{i=1}^N y_i - a \sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (\text{A.3})$$

Czas próby  $\tau_0$ , po którym zmiana pojemności wynosi -10% należy wyznaczyć ze wzoru:

$$\tau_0 = \frac{-10-b}{a} \quad (\text{A.4})$$



**Rys. A.1.** Ilustracja aproksymacji funkcją liniową wartości czasu  $\tau_0$  w którym badany kondensator utracił 10% pojemności podczas próby trwałości

W tabeli A.1. podano dla wszystkich badanych egzemplarzy kondensatorów wartości  $\tau$  uzyskane na podstawie pomiarów w trakcie próby trwałości oraz wartości aproksymowanego czasu  $\tau_0$ . Z porównania obu wartości dla egzemplarzy, które zmieniły pojemność o ponad 10% podczas 4500 h próby trwałości wynika, że różnica między wartościami tych czasów nie przekracza kilkunastu procent, co świadczy o poprawności zaproponowanej procedury. Szczegółowe wyniki pomiarów zmian pojemności podano w tab. A.2.

**Tab. A.1.** Wartości czasów poprawnej pracy kondensatorów podczas próby trwałości; $\tau_0$  – wartość ekstrapolowana,  $\tau$  – wartość obserwowana

| Nr | $\tau_0$ [h] | $\tau$ [h] | Nr | $\tau_0$ [h] | $\tau$ [h] |
|----|--------------|------------|----|--------------|------------|
| 1  | 17123        | -          | 31 | 2293         | 2042       |
| 2  | 1732         | 1898       | 32 | 9558         | -          |
| 3  | 16706        | -          | 33 | 8387         | -          |
| 4  | 3152         | 3540       | 34 | 55970        | -          |
| 5  | 3001         | 2990       | 35 | 6319         | -          |
| 6  | 34543        | -          | 36 | 17457        | -          |
| 7  | 37155        | -          | 37 | 8708         | -          |
| 8  | 2365         | 2288       | 38 | 18203        | -          |
| 9  | 57645        | -          | 39 | 22112        | -          |
| 10 | 23033        | -          | 40 | 18487        | -          |
| 11 | 19637        | -          | 41 | 6070         | -          |
| 12 | 38912        | -          | 42 | 9416         | -          |
| 13 | 14738        | -          | 43 | 37602        | -          |
| 14 | 6415         | -          | 44 | 5174         | -          |
| 15 | 4267         | -          | 45 | 4608         | -          |
| 16 | 8176         | -          | 46 | 38821        | -          |
| 17 | 13075        | -          | 47 | 33151        | -          |
| 18 | 49635        | -          | 48 | 3898         | -          |
| 19 | 2652         | 2250       | 49 | 2967         | 2566       |
| 20 | 26569        | -          | 50 | 53225        | -          |
| 21 | 11755        | -          | 51 | 1795         | 1763       |
| 22 | 3979         | -          | 52 | 863          | 908        |
| 23 | 8532         | -          | 53 | 18691        | -          |
| 24 | 9940         | -          | 54 | 16258        | -          |
| 25 | 66294        | -          | 55 | 14020        | -          |
| 26 | 4930         | -          | 56 | 5222         | -          |
| 27 | 39693        | -          | 57 | 4227         | -          |
| 28 | 12251        | -          | 58 | 14484        | -          |
| 29 | 55766        | -          | 59 | 12519        | -          |
| 30 | 9429         | -          | 60 | 15488        | -          |

Tab. A.2. Zmiany pojemności kondensatorów 470 nF podczas próby trwałości w wybranych momentach

| Nr | C [ $\mu$ F]<br>Pomiar wstępny<br>1 kHz 1 V | $R_{izol} \times 10^6$ [M $\Omega$ ]<br>Pomiar wstępny<br>przy 100 V | $\Delta C/C$ [%]<br>po 1000 h | $\Delta C/C$ [%]<br>po 2000 h | $\Delta C/C$ [%]<br>po 3000 h | $\Delta C/C$ [%]<br>po 4500 h |
|----|---|--|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1  | 455,99                                      | 1,3  | -0,52                         | -1,26                         | -1,71                         | -2,34                         |
| 2  | 456,22                                      | 1,2  | -4,64                         | -13,12                        | -17,51                        | -18,21                        |
| 3  | 455,61                                      | 1,5  | -0,70                         | -1,39                         | -1,87                         | -2,38                         |
| 4  | 459,34                                      | 1,1  | -3,92                         | -7,78                         | -9,65                         | -10,31                        |
| 5  | 460,83                                      | 1,7  | -4,53                         | -8,37                         | -9,98                         | -10,56                        |
| 6  | 461,91                                      | 2,0  | -0,64                         | -0,79                         | -0,98                         | -1,43                         |
| 7  | 457,60                                      | 3,2  | -0,56                         | -0,69                         | -0,90                         | -1,32                         |
| 8  | 466,29                                      | 1,4  | -3,29                         | -8,52                         | -13,43                        | -16,39                        |
| 9  | 458,74                                      | 0,5  | -0,32                         | -0,37                         | -0,45                         | -0,99                         |
| 10 | 461,31                                      | 0,9  | -0,43                         | -0,88                         | -1,27                         | -1,73                         |
| 11 | 451,89                                      | 1,2  | -1,02                         | -1,46                         | -1,81                         | -2,29                         |
| 12 | 466,33                                      | 1,4  | -0,55                         | -0,69                         | -0,88                         | -1,28                         |
| 13 | 456,05                                      | 2,2  | -1,38                         | -2,01                         | -2,36                         | -2,92                         |
| 14 | 466,30                                      | 1,7  | -1,58                         | -2,95                         | -4,91                         | -6,02                         |
| 15 | 460,36                                      | 1,0  | -3,89                         | -6,43                         | -7,46                         | -8,12                         |
| 16 | 456,22                                      | 2,0  | -0,33                         | -2,51                         | -3,59                         | -4,11                         |
| 17 | 457,37                                      | 5,5  | -1,59                         | -2,25                         | -2,75                         | -3,22                         |
| 18 | 468,61                                      | 1,0  | -0,45                         | -0,57                         | -0,68                         | -1,07                         |
| 19 | 465,09                                      | 1,2  | -5,04                         | -9,18                         | -11,04                        | -11,61                        |
| 20 | 460,55                                      | 1,1  | -0,69                         | -0,95                         | -1,26                         | -1,74                         |
| 21 | 456,72                                      | 1,4  | -1,76                         | -2,71                         | -3,10                         | -3,60                         |
| 22 | 458,77                                      | 1,1  | -3,91                         | -6,74                         | -7,93                         | -8,45                         |
| 23 | 466,58                                      | 1,3  | -1,76                         | -2,78                         | -3,95                         | -4,45                         |
| 24 | 473,46                                      | 2,0  | -1,15                         | -2,44                         | -3,27                         | -3,76                         |
| 25 | 455,49                                      | 1,1  | -0,21                         | -0,25                         | -0,39                         | -0,86                         |
| 26 | 457,23                                      | 1,2  | -0,94                         | -4,16                         | -6,28                         | -6,87                         |
| 27 | 459,93                                      | 1,8  | -0,39                         | -0,57                         | -0,77                         | -1,23                         |
| 28 | 455,10                                      | 1,1  | -1,06                         | -2,11                         | -2,69                         | -3,20                         |
| 29 | 461,19                                      | 2,0  | -0,33                         | -0,39                         | -0,54                         | -0,96                         |
| 30 | 461,18                                      | 1,6  | -2,36                         | -3,24                         | -3,91                         | -4,45                         |
| 31 | 454,20                                      | 1,2  | -4,82                         | -9,83                         | -12,87                        | -14,08                        |
| 32 | 475,22                                      | 1,4  | -1,45                         | -2,57                         | -3,48                         | -4,07                         |
| 33 | 457,77                                      | 1,6  | -0,51                         | -2,11                         | -3,55                         | -4,10                         |
| 34 | 471,27                                      | 1,7  | -0,30                         | -0,40                         | -0,51                         | -1,19                         |
| 35 | 457,98                                      | 2,2  | -1,98                         | -3,86                         | -5,17                         | -5,72                         |
| 36 | 470,59                                      | 1,2  | -0,84                         | -1,33                         | -1,86                         | -2,53                         |
| 37 | 454,50                                      | 1,0  | -0,19                         | -2,13                         | -3,31                         | -3,85                         |
| 38 | 455,04                                      | 1,2  | -0,79                         | -1,38                         | -1,77                         | -2,32                         |
| 39 | 474,99                                      | 1,0  | -1,05                         | -1,36                         | -1,66                         | -2,12                         |
| 40 | 456,19                                      | 1,1  | -0,58                         | -1,24                         | -1,65                         | -2,25                         |
| 41 | 457,80                                      | 0,7  | -2,94                         | -4,73                         | -5,61                         | -6,14                         |
| 42 | 459,63                                      | 1,5  | -1,97                         | -3,19                         | -3,77                         | -4,21                         |
| 43 | 463,10                                      | 1,1  | -0,66                         | -0,76                         | -0,94                         | -1,39                         |
| 44 | 461,99                                      | 0,8  | -1,79                         | -3,79                         | -6,16                         | -7,20                         |
| 45 | 464,44                                      | 1,2  | -1,86                         | -4,12                         | -6,86                         | -7,83                         |
| 46 | 470,19                                      | 1,1  | -0,53                         | -0,65                         | -0,84                         | -1,35                         |
| 47 | 467,32                                      | 1,2  | -0,43                         | -0,55                         | -0,80                         | -1,66                         |
| 48 | 469,91                                      | 1,0  | -1,34                         | -5,28                         | -8,10                         | -8,79                         |
| 49 | 470,81                                      | 1,2  | -2,25                         | -7,41                         | -10,59                        | -13,54                        |
| 50 | 454,57                                      | 1,4  | -0,34                         | -0,38                         | -0,58                         | -1,01                         |
| 51 | 470,07                                      | 0,9  | -5,29                         | -12,13                        | -16,31                        | -17,68                        |
| 52 | 457,03                                      | 1,0  | -9,85                         | -17,89                        | -21,19                        | -21,79                        |
| 53 | 455,45                                      | 1,0  | -1,13                         | -1,61                         | -1,96                         | -2,38                         |
| 54 | 475,36                                      | 0,9  | -0,37                         | -1,14                         | -1,75                         | -2,27                         |
| 55 | 458,98                                      | 1,0  | -1,40                         | -2,10                         | -2,58                         | -3,07                         |
| 56 | 467,87                                      | 1,0  | -1,22                         | -3,58                         | -5,98                         | -7,10                         |
| 57 | 466,98                                      | 1,4  | -2,76                         | -5,64                         | -7,45                         | -8,28                         |
| 58 | 472,47                                      | 1,2  | -1,37                         | -1,99                         | -2,45                         | -3,08                         |
| 59 | 475,41                                      | 1,5  | -1,59                         | -2,37                         | -2,87                         | -3,40                         |
| 60 | 471,23                                      | 1,2  | -0,66                         | -0,97                         | -1,91                         | -2,69                         |

## **Dodatek B**

### **Instrukcja badania jakości kondensatorów foliowych**

#### **B.1. Cel instrukcji**

Celem instrukcji jest zestawienie procedur oceny jakości kondensatorów foliowych na podstawie pomiarów ich parametrów. Instrukcja powstała w wyniku badań i analiz prowadzonych na przestrzeni kilku lat, podczas oceny jakości wytwarzanych oraz prototypowych konstrukcji kondensatorów. Instrukcja może być stosowana do oceny jakości różnych typów kondensatorów foliowych, w tym na etapie ich projektowania lub podczas zmian stosowanych materiałów i technologii we wcześniej opracowanych konstrukcjach. Pomaga wybrać racjonalnie rozwiązania technologiczne, które mogą być następnie badane bardziej szczegółowo podczas prób trwałości. Dzięki opracowanym procedurom można uzyskać znaczące korzyści ekonomiczne przez oszczędność energii elektrycznej podczas badań długotrwałych oraz eliminację materiałów, które nie gwarantują wyprodukowania kondensatorów o odpowiednio wysokiej jakości.

#### **B.2. Zakres instrukcji**

Instrukcja obejmuje szczegółowy opis postępowania dla kondensatorów foliowych następujących typów:

- kondensatorów silnikowych prądu przemiennego,
- kondensatorów przeciwzakłóceniovych klasy X lub Y.

#### **B.3. Opis sposobu badań**

Kondensatory wykonywane z folii metalizowanej, pomimo różnic w procesie ich produkcji oraz przeznaczeniu, mają szereg wspólnych cech wynikających z podobnej budowy oraz stosowanych materiałów. Kondensator foliowy wykonywany jest z cienkiej folii dielektrycznej z napyłoną elektrodą (metalizacją). Parametry takiego kondensatora zależą głównie od zjawisk zachodzących w:

- dielektryku,
- warstwie metalizacji, a głównie jej połączeniu z napyłonym czołem zwijki.

Wybór odpowiednich metod pomiarów zjawisk zachodzących w tych obszarach pozwala na skuteczną predykcję jakości kondensatora jako gotowego wyrobu.

## B.4. Badania kondensatorów silnikowych prądu przemiennego

Do badań należy wybrać losowo próbę kondensatorów z danej partii w liczbie 20 egzemplarzy. Kondensatory należy poddać wymienionym w tab. B1 badaniom wg. podanej kolejności. Czas przerw między poszczególnymi etapami badań nie powinien być krótszy niż 2 h.

**Tab. B.1** Procedury badawcze przyjęte dla kondensatorów silnikowych

| Lp. | Rodzaj badań i pomiarów                            | Opis szczegółowy |
|-----|--|------------------|
| 1   | Pomiary w funkcji częstotliwości                   | p. B.4.1         |
| 2   | Próba prądowa                                      | p. B.4.2         |
| 3   | Pomiary po próbie prądowej                         | p. B.4.3         |
| 4   | Pomiary $C$ , $\text{tg}\delta$ w funkcji napięcia | p. B.4.4         |
| 5   | Pomiary $R_{\text{izol}}$ w funkcji napięcia       | p. B.4.5         |

### B.4.1. Pomiary w funkcji częstotliwości

Należy wykonać pomiary parametrów  $\text{tg}\delta$  oraz zastępczej rezystancji szeregowej ESR dla każdego kondensatora w funkcji częstotliwości. Po wyborze wymaganej częstotliwości i napięcia pomiarowego 1 V na mostku pomiarowym należy przeprowadzić procedurę zerowania mostka zgodnie z instrukcją obsługi i wykonać pomiary wszystkich egzemplarzy. Po zmianie częstotliwości pomiarowej należy przeprowadzić ponowne zerowanie mostka pomiarowego i wykonać pomiary wszystkich kondensatorów. Pomiary powinny być wykonane dla następujących częstotliwości: 50 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 5 kHz, 10 kHz.

Wyniki pomiarów należy porównać z wartościami, wyznaczonymi ze wzorów:

$$ESR = \frac{4l}{\gamma\pi\varphi_w^2} + \frac{R_v \cdot a + R_f \cdot (b - (m + a))}{\frac{C \cdot 56500 \cdot d}{\varepsilon(b - (2m + k))}} + \frac{R_{\text{izol}} \cdot 10^6}{R_{\text{izol}}^2 \omega^2 C^2 + 1}, \quad (\text{B1})$$

$$\text{tg}\delta = \omega \cdot C \cdot ESR, \quad (\text{B2})$$

$$\omega = 2\pi f, \quad (\text{B3})$$

gdzie:

$a$  – szerokość wzmocnionej warstwy metalizacji folii [mm],

$b$  – szerokość całkowita folii [mm],

$d$  – grubość folii [μm],

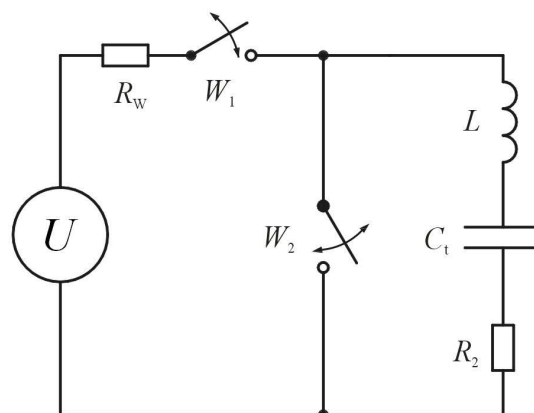


- $m$  – szerokość marginesu folii [mm],  
 $\varepsilon$  – względna przenikalność dielektryczna,  
 $k$  – przesunięcie między foliami zwijki [mm],  
 $l$  – długość wyprowadzeń kondensatora [m],  
 $\gamma$  – konduktywność materiału z którego wykonano wyprowadzenia (dla miedzi  $56 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ ),  
 $\phi_w$  – średnica drutu z którego wykonano wyprowadzenia [mm],  
 $R_v$  – rezystancja powierzchniowa warstwy metalizacji w obszarze wzmocnionym [ $\Omega/$  ],  
 $R_f$  – rezystancja powierzchniowa warstwy metalizacji poza obszarem wzmocnionym [ $\Omega/$  ],  
 $C$  – pojemność kondensatora (zmierzona przy danej częstotliwości  $f$  lub wyznaczona z zależności) [ $\mu\text{F}$ ],  
 $f$  – częstotliwość napięcia polaryzującego kondensator podczas pomiaru [Hz],  
 $R_{\text{izol}}$  – rezystancja izolacji kondensatora (zmierzona lub katalogowa rezystancja skrośna folii dielektrycznej) [ $\text{M}\Omega$ ].

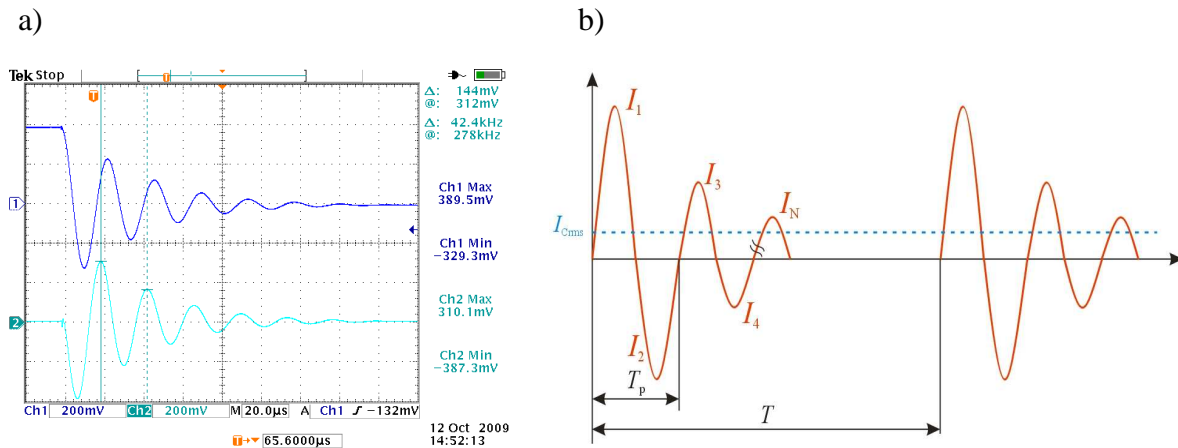
Jeżeli wynik pomiarów różni się od wyniku wyznaczonego według podanych zależności o wartość większą niż podwojona wartość błędu mostka pomiarowego dla danej wielkości, to kondensator należy uznać za potencjalnie wadliwy.

#### B.4.2. Próba prądowa

Po wykonaniu pomiarów z punktu B.4.1. należy każdy kondensator indywidualnie poddać próbie prądowej w układzie jak na rys. B.1. Czas próby nie powinien być krótszy niż 60 s oraz dłuższy niż 30 min. Badania starzeniowe udowodniły, że dla dobrych kondensatorów próba ta nie wpływa w istotny sposób na zmianę ich właściwości. Czas próby należy uzależnić od rodzaju obciążenia kondensatora jakie wystąpi podczas jego pracy. Dłuższe czasy należy stosować dla kondensatorów które podczas eksploatacji będą narażone na częstsze występowanie impulsów zakłócających. W trakcie pomiarów obserwuje się na zaciskach kondensatora tłumione oscylacje (rys. B.2a), o zadanej intensywności (rys. B.2b).



**Rys. B.1.** Schemat układu do badania odporności kondensatora na impulsy prądowe;  $U$  – źródło napięcia stałego,  $R_w$  – rezystancja wewnętrzna źródła,  $W_1$ ,  $W_2$  – przełączniki (elementy półprzewodnikowe),  $L$  – indukcyjność,  $C_1$  – badany kondensator,  $R_2$  – rezystancja bocznika



**Rys. B.2.** Przykładowe przebiegi: a) napięcia na zaciskach kondensatora, b) prądu płynącego przez badany kondensator z wyróżnionymi podstawowymi parametrami;  $I_1, I_2, I_3$  – kolejne wartości szczytowe prądu,  $T_p$  – okres podstawowy oscylacji,  $T$  – czas między wystąpieniem kolejnych impulsów prądowych

Charakterystyczne wartości prądu (rys. B.2b) można wyznaczyć na podstawie poniższych zależności:

– wartość szczytowa prądu gasnących oscylacji:

$$I_{\max} = I_1 = J_{\max} \cdot l \text{ [A]} \quad (\text{B.4})$$

gdzie:  $l$  – długość okładziny kondensatora [cm],  $J_{\max} = 0,15 \text{ A/cm}$ .

– dopuszczalna wartość skuteczna prądu kondensatora:

$$I_{\text{Crms}} = J_{\text{rms}} \cdot l \text{ [A]} \quad (\text{B.5})$$

gdzie:  $l$  – długość okładziny kondensatora [cm],  $J_{\text{rms}} = 5 \text{ mA/cm}$ .

Podane wartości zostały wyznaczone na podstawie badań eksperymentalnych większej liczby kondensatorów. Dla kondensatorów wykonanych z materiałów o odpowiedniej jakości i z zachowaniem procesu technologicznego, takie wartości nie powodują istotnych zmian w prawidłowo wykonanych kondensatorach.

Kondensatory podczas badań należy ładować do napięcia nie przekraczającego wartości  $\sqrt{2}U_N$ , gdzie  $U_N$  oznacza napięcie znamionowe. Wartość maksymalną prądu kondensatora określa się przez dobranie wartości indukcyjności  $L$  według zależności:

$$L = C_x \cdot \frac{(\sqrt{2}U_N)^2}{I_1^2}. \quad (\text{B.6})$$

Wartość skuteczną prądu płynącego przez kondensator określa się zmieniając częstotliwość powtarzania impulsów oscylacyjnych. Wartość tej częstotliwości wyznacza się z zależności:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{(I_{C_{rms}})^2}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{I_i}{\sqrt{2}}\right)^2 \cdot \frac{T_p}{2}}, \quad (\text{B.7})$$

gdzie:

$I_{C_{rms}}$  – dopuszczalna wartość skuteczna prądu płynącego przez kondensator [A],

$N$  – liczba wartości szczytowych prądu w przebiegu tłumionych oscylacji,

$I_i$  – kolejne wartości szczytowe prądu [A],

$T$  – okres powtarzania impulsu prądowego [s],

$T_p$  – okres drgań oscylacji [s].

### B.4.3. Pomiary po próbie prądowej

Po przeprowadzeniu próby prądowej oraz niezbędnej przerwie (tzw. reklimatyzacji) wynoszącej min. 2 h, należy wykonać ponownie pomiary  $C$ ,  $\text{tg}\delta$ ,  $R_S$  przy częstotliwości 1 kHz i napięciu polaryzacji 1 V. Dopuszczalne zmiany parametrów po próbie prądowej powinny spełniać warunki:  $|\Delta C/C| < 0,1\%$ ,  $|\Delta \text{tg}\delta/\text{tg}\delta| < 20\%$ ,  $|\Delta R_S/R_S| < 20\%$ .

### B.4.4. Pomiary charakterystyk $C$ , $\text{tg}\delta$ w funkcji napięcia

Pomiary wartości  $C$  i  $\text{tg}\delta$  w funkcji napięcia polaryzującego kondensator mogą wykryć wewnętrzne wady dielektryka. Te pomiary należy wykonać w zakresie napięć do  $2U_N$  skracając czas pomiarów dla napięć powyżej  $U_N$  do 1 min. Wartości napięć polaryzacji podczas pomiarów należy dobrać stosownie do wartości  $U_N$ , określonej dla danego typu kondensatorów według reguły:

$\sim 0,2U_N \div U_N$  z krokiem  $\sim 0,2U_N$ ,

$\sim U_N \div 2U_N$  z krokiem  $\sim 0,3U_N$

Przykładowo, dla kondensatora o napięciu znamionowym z zakresu  $U_N = 425 \div 500$  V wartości napięć pomiarowych  $U_P$  ustalono jako 100 V, 200 V, 300 V,  $U_N$ , 600 V, 850 V. Natomiast dla kondensatora o napięciu znamionowym z zakresu  $U_N = 250 \div 275$  V ustalono wartości  $U_P$  równe 50 V, 100 V, 200 V,  $U_N$ , 300 V, 400 V, 500 V.

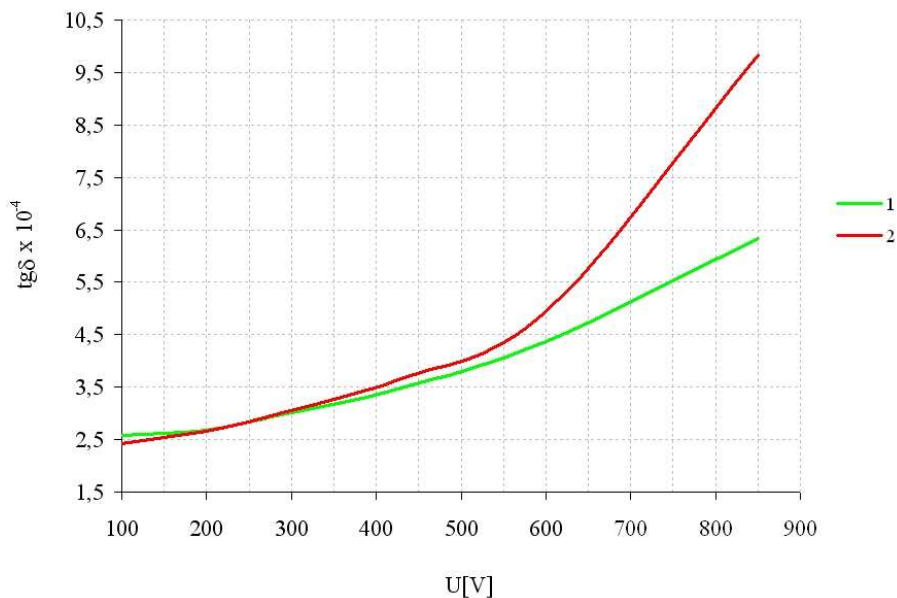
Kondensatory, które wykazują znaczny wzrost wartości  $\text{tg}\delta$  przy względnie wyższych napięciach polaryzacji w stosunku do wartości mierzonej przy napięciu  $U_N$  posiadają w zastosowanym dielektryku wady w formie wtrąceń lub nieciągłości (rys. B.3), co prowadzi do powstawania wyładowań niezupełnych i degradacji dielektryka.

Pomiary  $\text{tg}\delta$  w funkcji napięcia dają istotną informację o zmianach zachodzących w kondensatorach podczas ich eksploatacji. Wykonanie takich pomiarów pozwala na selekcję grupy kondensatorów na spełniające wymogi jedynie w zakresie wymogów stawianych normą lub na grupę kondensatorów o podwyższonej jakości. Jako kryterium kwalifikowania

do obu wyróżnionych grup należy przyjąć różnicę w wartościach  $\text{tg}\delta$ . Jeżeli wzrost wartości  $\text{tg}\delta$  przy wzroście napięcia pomiarowego od  $U_N$  do  $2U_N$  nie przekracza 100% początkowej wartości to taki kondensator kwalifikuje się do grupy o podwyższonej jakości.

#### B.4.5. Pomiary rezystancji izolacji w funkcji napięcia

Charakterystyka rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  w funkcji napięcia polaryzacji może także wskazać kondensatory, w których dielektryk posiada wady. Napięcia polaryzacji podczas pomiarów należy wybrać z zakresu:  $\sim 0,1U_N \div U_N$  z krokiem  $0,2U_N$  i  $\sim U_N \div 2\sqrt{2}U_N$  z krokiem  $0,3U_N$ . Przykładowo, dla kondensatora o napięciu znamionowym z zakresu  $U_N = 425 \div 500$  V ustalono wartości napięć pomiarowych  $U_P$  równe 50 V, 100 V, 200 V, 300 V, 400 V, 600 V, 800 V. Natomiast dla kondensatora o napięciu znamionowym z zakresu  $U_N = 250 \div 275$  V ustalono następujące wartości napięć pomiarowych 50 V, 100 V, 200 V, 300 V, 400 V, 500 V.



**Rys. B.3.** Przykładowe wyniki pomiarów wartości  $\text{tg}\delta$  dla kondensatora silnikowego  $7,5 \mu\text{F}$ : 1 – wykonanego prawidłowo, 2 – posiadającego dielektryk z wadami wpływającymi istotnie na szybkość wzrostu  $\text{tg}\delta$  powyżej wartości  $U_P = 500$  V

Pomiary  $R_{\text{izol}}$  dla poszczególnych typów kondensatorów (o zadanych wymiarach, rodzaju dielektryka, sposobie wytwarzania) przy napięciu  $2\sqrt{2}U_N$  można wykorzystać (podobnie jak pomiary  $\text{tg}\delta$ ) do kwalifikowania poszczególnych egzemplarzy do grupy spełniającej jedynie wymogi normy lub grupy o podwyższonej jakości na podstawie różnic od wartości średniej  $R_{\text{izol}}$  obserwowanej w badanej grupie. Stąd, wartość progowa klasyfikacji do grup jest ustalana indywidualnie dla każdego badanego typu kondensatorów.

## B.5. Badania kondensatorów foliowych przeciwzakłóceniovych

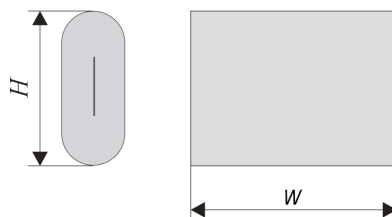
Do badań należy zastosować próbę statystyczną kondensatorów z danej partii w liczbie 20 egzemplarzy oraz 5 zwiłek po przeprowadzeniu operacji ich termicznej obróbki. Kondensatory należy poddawać badaniom w kolejności według tab. B.2, z wyjątkiem badania według p. B.5.1, któremu podlegają tylko zwiłki. Czas przerwy (reklimatyzacji) między kolejnymi badaniami nie powinien być krótszy niż 2 h.

**Tab. B.2.** Procedury badawcze dla kondensatorów przeciwzakłóceniovych

| Lp. | Opis badań i pomiarów                                 | Opis szczegółowy |
|-----|---|------------------|
| 1   | Badanie emisji akustycznej w funkcji siły ściskającej | p. B.5.1.        |
| 2   | Pomiary w funkcji częstotliwości                      | p. B.4.1.        |
| 3   | Próba prądowa   | p. B.4.2.        |
| 4   | Pomiary po próbie prądowej                            | p. B.4.3.        |
| 5   | Pomiary $C$ , $\text{tg}\delta$ w funkcji napięcia    | p. B.4.4.        |
| 6   | Pomiar $R_{\text{izol}}$ w funkcji napięcia           | p. B.4.5.        |
| 7   | Próba udaru napięciowego                              | p. B.5.2.        |
| 8   | Pomiar $C$ i $\text{tg}\delta$ po udarze napięciowym  | p. B.5.3.        |

### B.5.1. Pomiar sygnałów emisji akustycznej podczas ściskania zwiłek

Każdą zwiłkę należy indywidualnie poddać liniowo narastającemu obciążeniu mechanicznemu z zakresu od zera do wartości maksymalnej  $F_Z$  [kG]. Obciążenie należy przykładać równomiernie do powierzchni zwiłki (rys. B.4). Podczas narażenia należy wykonywać pomiary sygnałów emisji akustycznej. Jako miarę intensywności sygnału emisji akustycznej należy przyjąć energię rejestrowanego sygnału od momentu rozpoczęcia pomiaru (sumę kwadratów wszystkich zarejestrowanych próbek).



**Rys. B.4.** Wymiary zwiłki pozwalające wyznaczyć powierzchnię  $S$  poddawaną naciskowi podczas badania

Intensywność emisji akustycznej dla poprawnie wykonanych zwiłek powinna być niezależna w dużym zakresie od wartości naprężenia (rys. B.5). W przeciwnym wypadku taką zwiłkę należy traktować jako wykonaną nieprawidłowo (rys. B.6). Gdy w badanej próbce 5 sztuk występuje przynajmniej jedna zwiłka, dla której energia rejestrowanego sygnału

akustycznego od momentu rozpoczęcia próby do osiągnięcia naprężenia równego 60% maksymalnej wartości przekracza 20% całkowitej energii sygnału akustycznego rejestrowanego podczas próby to uznaje się całą partię wytworzonych zwijek za wadliwą (rys. B.6).

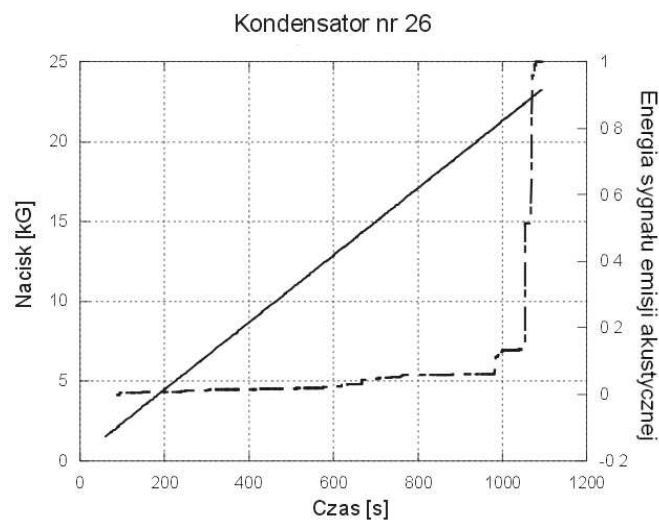
Wartość obciążenia na jednostkę powierzchni zwijki należy przyjąć jako równą:

$$P = 3 \text{ kG/cm}^2 \quad (\text{B.8})$$

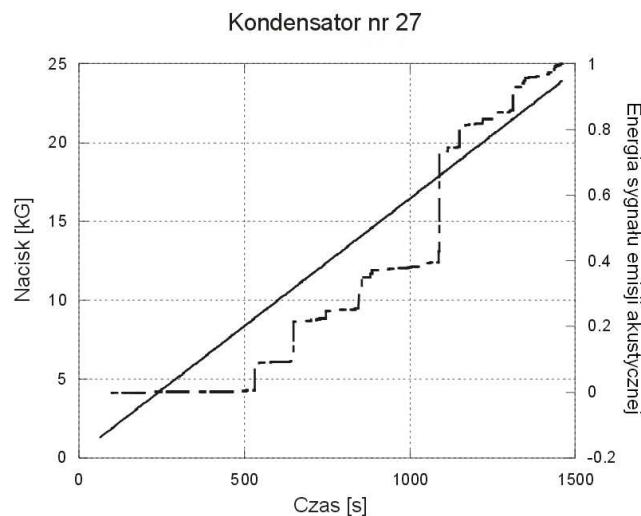
Powierzchnię zwijki, na którą jest wywierany nacisk, wyznacza się z zależności:

$$S = H \cdot W [\text{cm}^2] \quad (\text{B.9})$$

gdzie  $H$  jest wysokością zwijki, a  $W$  jej szerokością (rys. B.4).



**Rys. B.5.** Energia rejestrowanego sygnału emisji akustycznej (linia przerywana) podczas liniowo (linia ciągła) narastającego naprężenia sztywnej zwijki



**Rys. B.6.** Energia rejestrowanego sygnału emisji akustycznej (linia przerywana) podczas liniowo narastającego naprężenia (linia ciągła) zwijki posiadającej wady

Maksymalny nacisk  $N_Z$  dla danej zwijki należy wyznaczyć z zależności:

$$F_Z = P \cdot S \text{ [kG]} \quad (\text{B.10})$$

Szybkość zmian stosowanej siły nacisku nie powinna przekraczać:

$$V = 1,3 \text{ kG/min} \quad (\text{B.11})$$

Czas trwania próby można wyznaczyć z zależności:

$$T = F_Z/V \text{ [min]} \quad (\text{B.12})$$

Podane wielkości wyznaczono doświadczalnie przeprowadzając pomiary emisji akustycznej podczas mechanicznego obciążania zwijek różnymi wartościami siły, a wyniki skorelowano z wynikami prób trwałości.

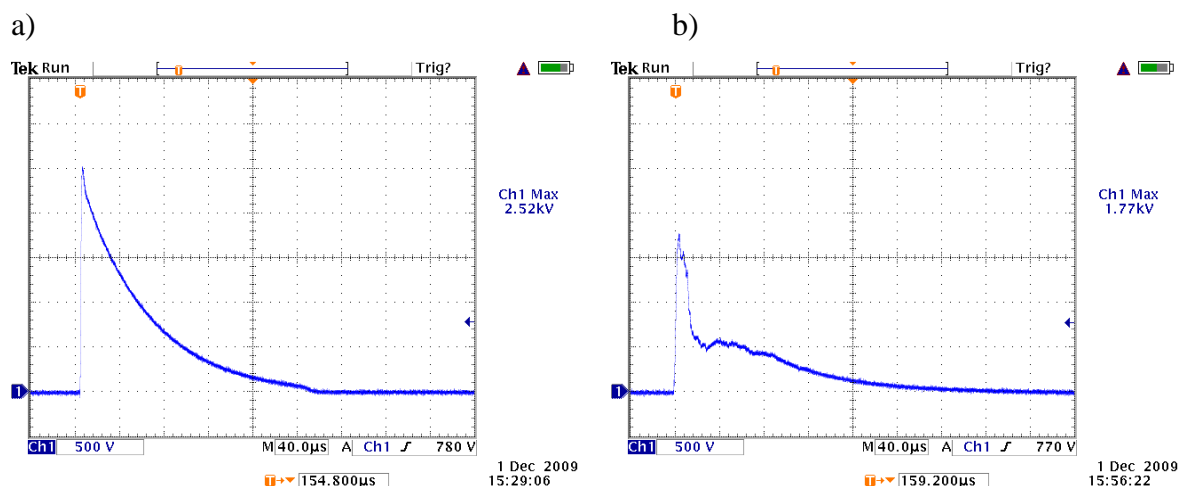
Przykładowo, dla kondensatora o pojemności  $2,2 \mu\text{F}$  przyjęto następujące parametry:  $H = 2,17 \text{ cm}$ ,  $W = 3,66 \text{ cm}$ ,  $S = H \cdot W = 7,94 \text{ cm}^2$ ,  $F_Z = P \cdot S = 23,82 \text{ kG}$ ,  $V = 1,3 \text{ kG/min}$ ,  $T = F_Z/V = 18,37 \text{ min}$ .

### B.5.2. Próba udaru napięciowego

Podczas próby należy każdy kondensator indywidualnie spolaryzować pojedynczym impulsem napięciowym o wartości szczytowej wynikającej z klasy kondensatora (tab. B.3). Podczas próby ocenie podlega kształt krzywej napięcia na kondensatorze (rys. B.4) pobudzonym ustalonym impulsem. Do próby należy użyć generatora impulsów napięciowych  $1,2/50 \mu\text{s}$  wraz z sondą wysokonapięciową i oscyloskopu z pamięcią.

**Tab. B.3.** Wartości szczytowe napięć udaru dla poszczególnych klas kondensatorów

| Klasa kondensatora | Wartość szczytowa napięcia impulsowego $U_1$ przed próbą trwałości                                  |
|--------------------|---|
| X1                 | $U_1 = 4 \text{ kV}$ dla $C \leq 1 \mu\text{F}$   |
|                    | $U_1 = \frac{4}{\sqrt{\frac{C[\text{F}]}{10^{-6} \text{ F}}}} \text{ kV}$ dla $C > 1 \mu\text{F}$   |
| X2                 | $U_1 = 2,5 \text{ kV}$ dla $C \leq 1 \mu\text{F}$   |
|                    | $U_1 = \frac{2,5}{\sqrt{\frac{C[\text{F}]}{10^{-6} \text{ F}}}} \text{ kV}$ dla $C > 1 \mu\text{F}$ |
| Y2                 | 5 kV  |



**Rys. B.4** Przykładowe przebiegi impulsu udarowego: a) o kształcie obserwowanym na zaciskach poprawnie wykonanego kondensatora, b) o kształcie wskazującym na występowanie wad w badanym egzemplarzu

### B. 5.3. Pomiar pojemności $C$ i kąta stratności $\text{tg}\delta$ po próbie udarem napięciowym

Po badaniu oraz przerwie min. 1 h dla kondensatorów nieimpregnowanych i 0,5 h dla kondensatorów impregnowanych należy ponownie wykonać pomiary pojemności  $C$  oraz  $\text{tg}\delta$  przy częstotliwości 1 kHz i napięciu polaryzacji 1 V oraz rezystancji izolacji  $R_{\text{izol}}$  przy napięciu 100 V i czasie 60 s. Dopuszczalne zmiany parametrów po próbie wynoszą  $|\Delta C/C| < 0,1\%$ ,  $|\Delta \text{tg}\delta/\text{tg}\delta| < 10\%$ ,  $|\Delta R_{\text{izol}}/R_{\text{izol}}| < 20\%$  początkowej wartości.



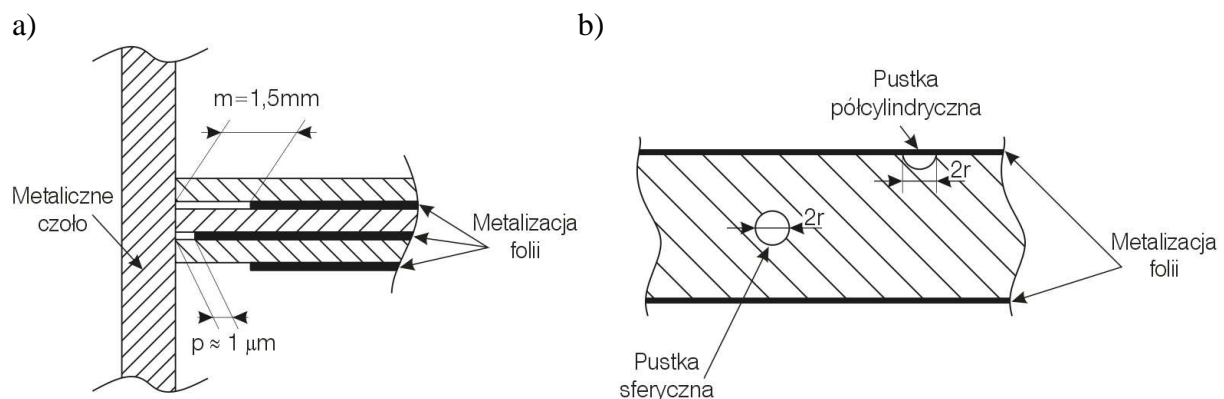
## Dodatek C

### Badania rozkładu natężenia pola elektrycznego w kondensatorach foliowych

W strukturze kondensatorów foliowych można wyróżnić wady, których istnienie prowadzi do powstania lokalnie obszarów o podwyższonych wartościach pola elektrycznego. Takie obszary są miejscem występowania zjawisk wyładowań niezupełnych, prowadzących do degradacji folii. Do najczęstszych wad powodujących występowanie wyładowań niezupełnych należy zaliczyć (rys. C.1):

- pęcherzyki powietrza w objętości dielektryka oraz przy powierzchni metalizacji folii,
- szczeliny powietrzne między kolejnymi warstwami folii,
- przerwy między metalizacją folii a metalizacją czoła zwijki.

Wpływ podanych wad na wielkość natężenia pola elektrycznego został określony za pomocą modułu *elektrostatyka* w ogólnodostępnym programie *FEMM 2D* ver. 4.2 [93], stosowanym do analizy układów warstwowych za pomocą metody elementów skończonych. W programie przyjęto siatkę elementów skończonych generowaną automatycznie, ustalając kąt trójkątów w siatce na wartość równą minimalnie  $33^\circ$ . Dla pozostałych ustawień programu przyjęto wartości domyślne. Przyjęto, że ustalone parametry obliczeń nie powinny wpływać znacząco na ich dokładność, co jest przedmiotem szeregu szczegółowych analiz dla przypadków gdy wielkość mierzona jest funkcją wielkości określonej [48].



**Rys. C.1.** Analizowane rodzaje wad występujących w strukturze kondensatora i prowadzących do powstawania obszarów wyładowań niezupełnych: a) przerwa między metalizacją folii a metalizacją czoła zwijki, b) pustki powietrzne i szczeliny w objętości zwijki (dielektryka)

Analizę rozkładu pola przeprowadzono przy występowaniu wymienionych wad wyznaczając maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego w kuli o promieniu  $r$  znajdującej się w objętości dielektryka, półwalca o promieniu podstawy  $r$ , który przylega swoim przekrojem do metalizacji folii (rys. C.1b) oraz szczeliny powietrznej o grubości  $x$  między kolejnymi warstwami folii. W przypadku kuli o relatywnie małym promieniu  $r$ , maksymalną wartość natężenia pola elektrycznego  $E_{\max}$  wyznaczono na podstawie zależności analitycznej [37]:

$$E_{\max} = E_o \cdot \frac{3\varepsilon_{pp}}{\varepsilon_p + 2\varepsilon_{pp}} \quad (\text{C.1})$$

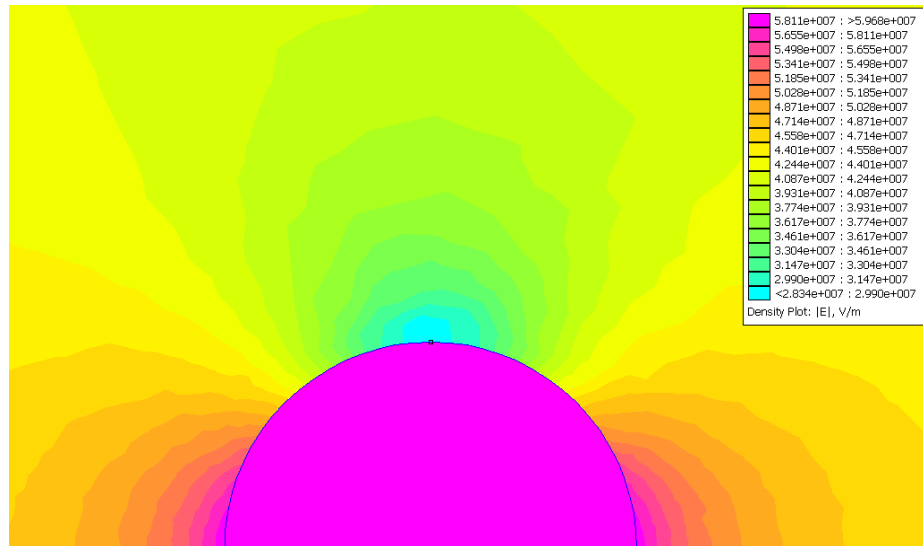
gdzie  $\varepsilon_{pp} = 2,2$  względna przenikalność dielektryczna polipropylenu,  $\varepsilon_p = 1$  względna przenikalność dielektryczna powietrza. Wartość  $E_o$  oznacza wartość pola elektrycznego doprowadzonego do układu płaskiego dielektryka przez jego zewnętrzną polaryzację stałym napięciem  $U$ . W przypadku analizowanych kondensatorów przyjęto grubość dielektryka jako równą  $7,5 \mu\text{m}$  oraz napięcie polaryzacji  $U = 324,2 \text{ V}$ , co odpowiada amplitudzie napięcia zmiennego w sieci zasilania. Przy tych parametrach wartość natężenia pola elektrycznego w polipropylenie wynosi  $E_o = 43,2 \text{ kV/mm}$ . Dla kulistej wtrąciny gazowej o wymiarach ( $\sim 1 \mu\text{m}$ ) znacznie mniejszych niż odstęp między elektrodami kondensatora ( $7,5 \mu\text{m}$ ) podana zależność oznacza wzrost natężenia pola elektrycznego do wartości  $E_{\max} = 1,22E_o$ .

W przypadku półwalca nie jest znana zależność analityczna, pozwalająca wyznaczyć wartość  $E_{\max}$  w jego obszarze. Stąd, do wyznaczenia wartości  $E_{\max}$  posłużono się modelem symulacyjnym w programie *FEMM v.4.2*. Wynikiem działania programu jest wyznaczenie dwuwymiarowego rozkładu pola elektrostatycznego (rys. C.2). Największa wartość pola elektrostatycznego występuje w obszarze powietrznej wtrąciny i wynosi  $E_{\max} = 1,34E_o$ . Oznacza to, że w przypadku wtrąciny o kształcie półwalca występuje nieco większe natężenie pola elektrycznego, niż dla wcześniej rozpatrywanej wtrąciny w kształcie kuli.

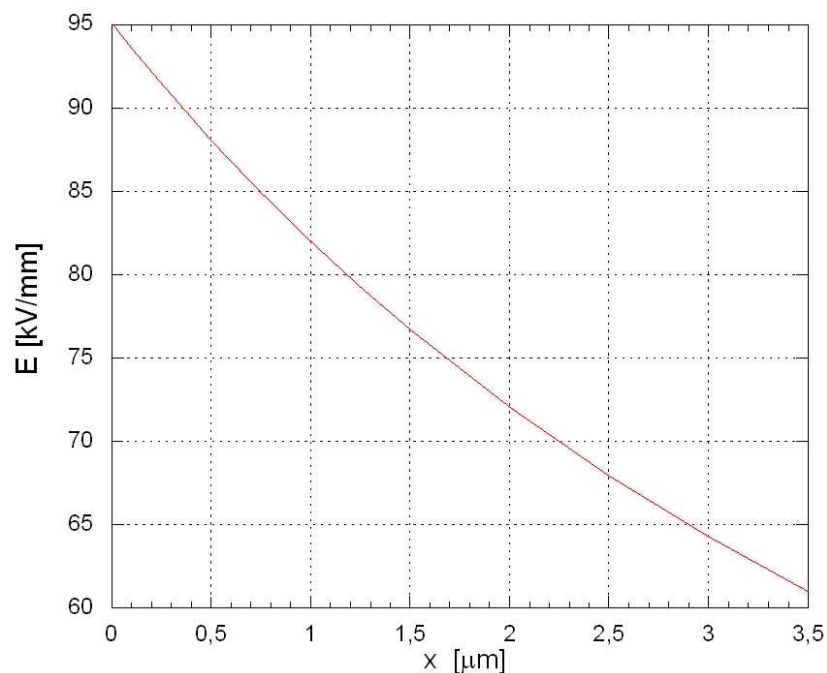
Kolejnym, analizowanym przypadkiem wady występującej w zwijce folii jest płaska szczelina powietrzna między warstwami folii. Korzystając z programu *FEMM*, wyznaczono wartości natężenia pola elektrycznego panującego w szczelinie powietrznej w zależności od jej grubości. Na rys. C.3 przedstawiono przebieg uzyskanej zależności. W tym przypadku obserwuje się największy wzrost wartości pola elektrycznego wśród wtrącin o analizowanych dotychczas kształtach, sięgający nawet  $E_{\max} = 2,2E_o$ .

Podsumowując uzyskane wyniki dla trzech analizowanych rodzajów wtrącin można stwierdzić, że najbardziej niebezpieczne ze względu na możliwość wystąpienia wyładowań niezupełnych są płaskie szczeliny powietrzne, zwiększające natężenie pola elektrycznego

w obszarach zwiłki folii nawet dwukrotnie. Ze względu na konstrukcję kondensatora i występowanie w jego strukturze pola o wartości natężenia  $E_0 = 43,2$  kV/mm, dla każdego z podanych przypadków wtrącin będą występowały procesy starzenia dielektryka i ewentualnie wyładowań niezupełnych, chociaż z różnym prawdopodobieństwem [46].



**Rys. C.2.** Rozkład pola elektrycznego w otoczeniu wtrąciny powietrznej o kształcie półwalca o promieniu  $1 \mu\text{m}$ ; wykres uzyskany z programu *FEMM v. 4.2*; w obliczeniach przyjęto  $E_0 = 43,2$  kV/mm

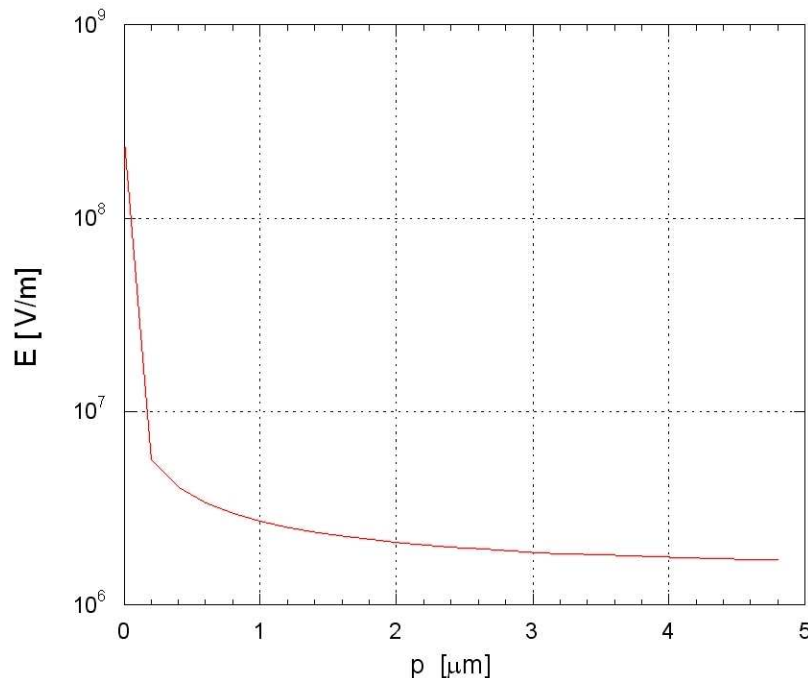


**Rys. C.3.** Rozkład pola elektrycznego występujący w przekroju poprzecznym płaszczyzny szczeliny powietrznej o grubości  $x$  przylegającej do warstwy dielektryka w którym występuje natężenie pola elektrycznego  $E_0 = 43,2$  kV/mm

Kolejną, rozpatrywaną wadą, jaka może wystąpić w strukturze kondensatora, jest brak kontaktu między metalizacją czoła zwiłki a metalizacją folii dielektryka (rys. C.1a). W tym

przypadku analiza rozkładu pola elektrycznego jest znacznie trudniejsza, ponieważ nie wiadomo jaka jest różnica napięć między metalizacją czoła zwijki a odłączoną warstwą metalizacji folii. Przykładowe wyniki obliczeń w programie *FEMM* rozkładu natężenia pola elektrycznego przedstawiono na rys. C.4. Największe natężenie występuje w otoczeniu warstwy metalizacji kontaktu i dla przyjętej arbitralnie różnicy napięć 324,2 V między metalizacjami wynosi 264 kV/mm. Tak duża wartość pola elektrycznego oznacza, że ewentualne wyładowania niezupełne przejdą w wyładowania ciągłe w tym obszarze.

W rzeczywistości, przy polaryzacji kondensatora stałym napięciem różnica potencjałów zależy od długości folii na której występuje wada kontaktu z metalizacją czoła. Ze względu na dużą rezystancję cienkiej warstwy metalizacji folii można przyjąć, że w przypadku braku kontaktu na długości folii rzędu 10%, różnica potencjałów między metalizacjami wyniesie najwyżej kilkanaście volt. Wówczas natężenie pola elektrycznego będzie wielokrotnie mniejsze niż wyznaczone z obliczeń i nie wystąpią wyładowania ciągłe.



**Rys. C.4** Rozkład pola elektrycznego występujący w odległości  $p$  od metalizacji czoła zwijki w kierunku metalizacji folii dielektryka; (przerwa między metalizacjami wynosi  $200 \mu\text{m}$ ); w obliczeniach przyjęto że różnica potencjałów między wyróżnionymi elementami metalowymi wynosi 324,2 V

Jeszcze bardziej złożonym przypadkiem jest sytuacja, gdy kondensator jest zasilany napięciem zmiennym lub impulsem napięciowym. Pojemność układu szczeliny między warstwą metalizacji a metalizacją folii będzie wielokrotnie mniejsza niż pojemność jaka występuje między kolejnymi warstwami dielektryka. Wartość pojemności szczeliny można

oszacować jako pojemność elektrody o kształcie półwalca o średnicy  $r$  i umieszczonego w odległości  $p$  od powierzchni metalizacji czoła [37]:

$$C(p) = \frac{2\pi\epsilon_p l}{\ln\left(\frac{2p}{r}\right)} \quad (\text{C.2})$$

Przyjmując, że długość odseparowanej metalizacji folii od metalizacji czoła wynosi  $l = 1$  cm, promień walca  $r = 0,003$   $\mu\text{m}$ , to uzyskuje się wartość  $C = 0,06$  pF dla odstępów  $p = 10$   $\mu\text{m}$ . Wartość tej pojemności rośnie do 0,05 pF, gdy  $p = 1$  mm. Natomiast pojemność warstwy dielektryka odpowiadającej jednemu zwojowi w przykładowym kondensatorze o pojemności całkowitej 470 nF i liczbie 270 nawiniętych zwojów folii wynosi aż 1,7 nF.

W opisanej sytuacji dla przykładowych typowych wymiarów szczeliny między metalizacjami większość napięcia zmiennego wystąpi na mniejszej pojemności wśród dwóch wyróżnionych pojemności połączonych szeregowo. Stąd, w przypadku zmiennej polaryzacji mogą wystąpić w otoczeniu metalizacji kontaktu czoła wartości natężenia pola elektrycznego odpowiadające warunkom przy których występują wyładowania ciągłe. Takie zjawisko doprowadzi szybko do degradacji tego połączenia (wyparowania metalizacji folii przy krawędzi z metalizacją czoła) i utraty znacznej części pojemności kondensatora.