

Barbara Florikowska, Jan Zaleski

BADANIA WYLADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH W KONDENSATORACH O DIELEKTRYKU  
MIESZANYM PAPIEROWO-POLIPROPYLENOWYM PRZY ZASTOSOWANIU  
ANALIZATORA WIELOKANALOWEGO

1. Wstęp

Problemy wyladowań niezpełnych w kondensatorach w ogóle, a w równoległych<sup>x)</sup> kondensatorach energetycznych w szczególności, są ważną częścią przy zastosowaniu nowego dielektryku papierowo-polipropylenowego, gdzie napięcie robocze osiąga wartość 30 - 40 V/mm, należą obecnie do najważniejszych prac rozwojowych w kondensatorach. Korzyści gospodarcze, które wynikają z zastosowania niskostatnego dielektryku papierowo-polipropylenowego to przede wszystkim mniejsze zużycie materiałów czynnych (o ok. 40%), a także obniżenie strat energii w eksploatacji (też o ok. 40%) w porównaniu z kondensatorami o dielektryku papierowym klasycznym.

W artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań wyladowań niezpełnych (waz) w modelach odzwierciedlających równoległe kondensatory energetyczne o dielektryku mieszanym papierowo-polipropylenowym (A), nasyconym trójchlorodwufenylem (TCD).

Dla porównania w badaniach zastosowano również modele z dielektry-

---

x) Określenie zgodne z projektem IEC TC33, gdzie zamiast dotychczasowej nazwy tej grupy kondensatorów "Power Capacitors" proponuje się "Shunt Power Capacitors"

---

Dr inż. Barbara Florikowska - Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie,  
Instytut Maszyn i Sterowania Układów Elektroenergetycznych

Dr inż. Jan Zaleski - Zakłady Wytwarzania Aparatury Rozdzielczej  
im. Dymitrowa, Warszawa.

kciem czysto polipropylenowym (B) nasyconym TCD. Po rozwiązaniu problemów impregnacji folii polipropylenowej (PP) dielektryk ten w przyszłości umożliwi dalszą miniaturyzację kondensatorów.

## 2. Współczesna problematyka wyładowań niezupełnych w kondensatorach

W kondensatorach o dielektryku mieszanym papierowo-polipropylenowym występuje układ izolacyjny trójwarstwowy, o znacznej nierównomierności przenikalności dielektrycznej i o silnie zróżnicowanym rozkładzie natężenia pola elektrycznego. Największe naprężenia elektryczne występują w folii PP (ok. 2,5-krotnie większe niż w papierze). Wszelkie polimery syntetyczne w tym i folia PP nie są pozbawione defektów i mikroszczelin wypełnionych gazami po katalizatorach [10], w których mogą występować wnz, jednak o tak małej intensywności, że wykrycie ich metodami konwencjonalnymi jest niemożliwe. Liczne badania koncentrują się nad wpływem zanieczyszczeń powierzchniowych na jakość dielektryku polipropylenowego. Potwierdzają one wniosek, że o jakości omawianego typu kondensatorów decyduje obecność zanieczyszczeń, pochodzących z produkcji samej folii PP jak i dostających się do nich podczas cięcia i zwijania folii, natomiast równowaga cieplna nie jest parametrem krytycznym [12].

Liczne informacje w zakresie wpływu konstrukcji i metod produkcji na jakość kondensatorów energetycznych i poziom wnz w nich, zawiera publikacja [3] opracowana na podstawie materiałów otrzymanych z 22 krajów w ramach grupy roboczej 05, SC 15 CIGRE.

Duże możliwości ulepszenia dielektryku mieszanego papierowo-polipropylenowego tkwią w samym procesie technologicznym impregnacji [17], głównie dlatego, że folia PP, zresztą jak wszystkie folie syntetyczne jest trudno zwilżalna.

W konstrukcji kondensatorów o dielektryku mieszanym dąży się do dalszego podwyższenia napięcia początkowego wnz. Wynika to z faktu, że naprężenia robocze w tych kondensatorach, ze względu na straty jak

i na wytrzymałość elektryczną doczołną, można podnieść prawie o 100%, tymczasem poziom napięć początkowych wzn pozostał zbliżony do występującego w dielektryku papierowym nasyconym TCD.

Wyładowania niespełne wewnętrzne o małej intensywności mogą mieć bardziej destrukcyjny charakter niż wzn o znacznej intensywności skomalizowane w ciekłej części dielektryku [14].

Problematyka wzn w kondensatorach wynika również na tle prac normalizacyjnych [4], w których usiłuje się ustalić dopuszczalną wartość intensywności wzn w skomalizowanym cyklu probierowym.

### 3. Opis badanych kondensatorów o dielektryku mieszany papierowo-polipropylenowy i oksydo polipropylenowy

Kondensatory do badań stanowiły swijki o pojemności 0,22 do 0,28  $\mu\text{F}$ , o danych technicznych przedstawionych w tabelicy.

Grupa	Rodzaj dielektryku	$\text{tg } \delta$ $\times 10^{-2}$	Przyjęte napięcie znamionowe [V]
A	Papierowo-polipropylenowy, trójwarstwowy, mieszany, o 2/3 PP, impregnowany TCD	0,13	1140
B	Polipropylenowy, trójwarstwowy, impregnowany TCD	0,10	1440
A'	Dielektryk jak w grupie A lecz o krańcowo uproszczonej technologii suszenia i impregnacji	0,50	1140

Dane znamionowe kondensatorów tak dobrane, aby spełnione zostały pod tym względem wymagania projektu normy [13].

Szerokość swijek wynosiła 80 mm a folii aluminiowej 55 mm. Grubość dielektryku, składającego się z trzech warstw, w każdym przypadku wynosiła 36  $\mu\text{m}$ . W jednej obudowie stalowej, cienkościennej, hermetycznie zamkniętej zamieszkiwały się 2 swijki.

Kondensatory te zostały wykonane w normalnych warunkach produkcyjnych w Zakładach Wytwórczych Aparatury Rozdzielczej im. Dymitrowa, zgodnie z technologią przyjętą dla kondensatorów o dielektryku mieszanym (próżnia końcowa  $10^{-3}$  Tr). Jako kryterium wysuszenia i odgazowania kondensatorów grupy A i B przyjęto dopuszczalny spadek próżni w kotle po odcięciu pomp próżniowych ustalony w wieloletniej praktyce ( $\leq 15 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Tr}}{\text{s}}$ ).

Kondensatory grupy A' nie suszone zalano trójchlorodwufenylem przy ciśnieniu atmosferycznym, zachowując warunki czystości jak dla grup pozostałych.

Do impregnacji wymienionych kondensatorów zastosowano TCD produkcji Zakładów Azotowych w Tarnowie. Przed użyciem został on poddany preparacji ziemią okrzemkową, a następnie po odfiltrowaniu w urządzeniu f-my Leybold z kolumną odgazowania wypełnioną pierścieniami Rashiga, przeprowadzono typowe suszenie i odgazowanie. Współczynnik stratności dielektrycznej przygotowanego syciwa był w temp.  $100^{\circ}\text{C}$  mniejszy od 0,01.

W układzie izolacyjnym kondensatorów zastosowano papier "standard" produkcji Żywieckiej Fabryki Papieru, o gęstości  $1,1 \text{ g/cm}^3$  i grubości  $12 \mu\text{m}$  oraz folię polipropylenową o grubości  $12 \mu\text{m}$  produkcji f-my Bollore (Francja). Elektrody stanowiła folia aluminiowa o grubości  $6 \mu\text{m}$  produkcji walcowni Metali Lekkich w Kętach.

#### 4. Zakres badań

- Badania w wymienionych grupach kondensatorów (A, B, A') miały na celu:
- uzyskanie większej ilości informacji o wylądowaniach niezpełnych w nowych dielektrykach kondensatorowych,
  - zbadanie wpływu procesu technologicznego suszenia i impregnacji na intensywność wnz,
  - rozpoznanie zmian intensywności wnz w funkcji czasu dla obu rodzajów dielektryków.

Podstawą wnioskowania o przebiegach zmian wnz w badanych układach

izolacyjnych kondensatorów, są rozkłady empiryczne ładunków wyładowań  $n = f(Q)$  i ich parametry opisowe.

W badaniach zastosowano wielokanałowy analizator amplitudy [6] typu NTA-512 co umożliwiło skrócenie czasu analizy i tym samym rozpoznanie dynamiki zmian wzn w badanych kondensatorach. W przyjętym czasie analizy równym 1s rejestrowano rozkład empiryczny ładunków wyładowań w pamięci analizatora i na ekranie lampy oscyloskopowej, a następnie odtwarzano w sposób cyfrowy. Układ pomiarowy, wykonany dla celów detekcji wyładowań niezupełnych w kondensatorach, posiadał czułość 1,38 pC. Rozkłady empiryczne ładunków wyznaczano przy szerokości kanału 0,24 pC.

## 5. Wyniki badań

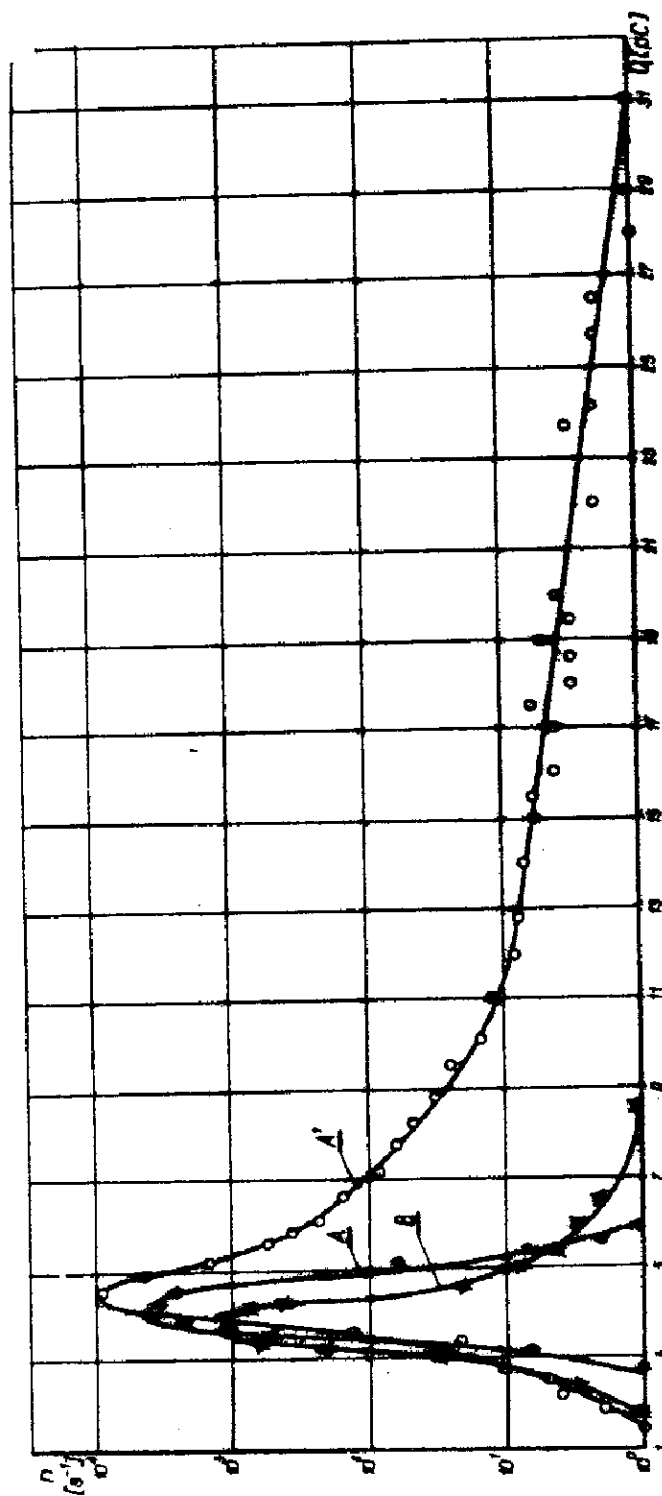
### a) Badania porównawcze przy stałej wartości napięcia

Napięcie początkowe wzn w badanych grupach kondensatorów posiadało wartość:

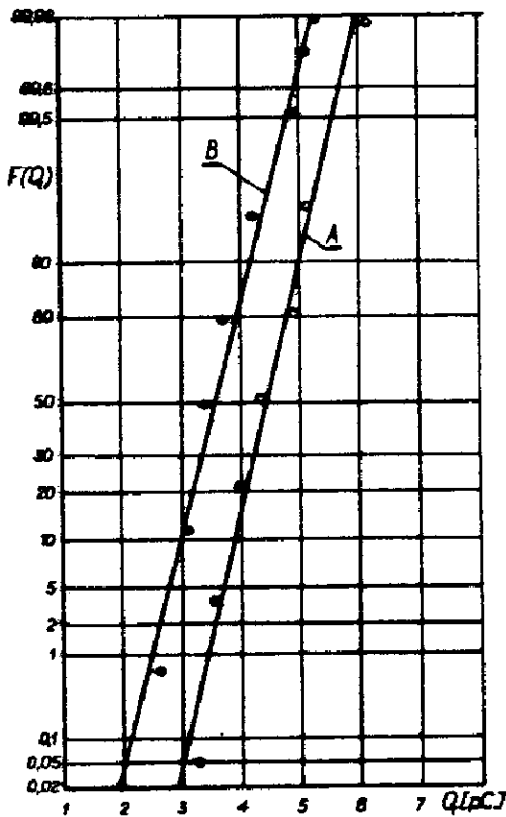
$U_0 = (1,6 - 1,8) U_N$	w izolacji z dielektrykiem mieszanym papierowo-polipropylenowym (A)
$U_0 = (1,3 - 1,4) U_N$	w izolacji czysto polipropylenowej (B)
$U_0 = (0,5 - 0,7) U_N$	w izolacji z dielektrykiem mieszanym papierowo-polipropylenowym niesuszonym (A')

Porównanie rozkładów empirycznych ładunków wyładowań przy napięciu  $1,3 U_0$  w kondensatorach grupy A i B wskazuje na zbliżony mechanizm inicjowania wyładowań niezupełnych (rys. 1). Charakteryzują je bowiem mało zróżnicowane ładunki o wartości przeciętnej ok. 4 pC przy częstotliwości  $10^3 - 4 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$  oraz rozstępie od 2,5 do 6 pC w grupie A i 1,5 - 9 pC w grupie B. Kształt rozkładów pozostaje zbliżonym do normalnego, na co wskazują wykresy częstości skumulowanych w funkcji ładunku pozornego na siatce laplaso-normalnej (rys. 2).

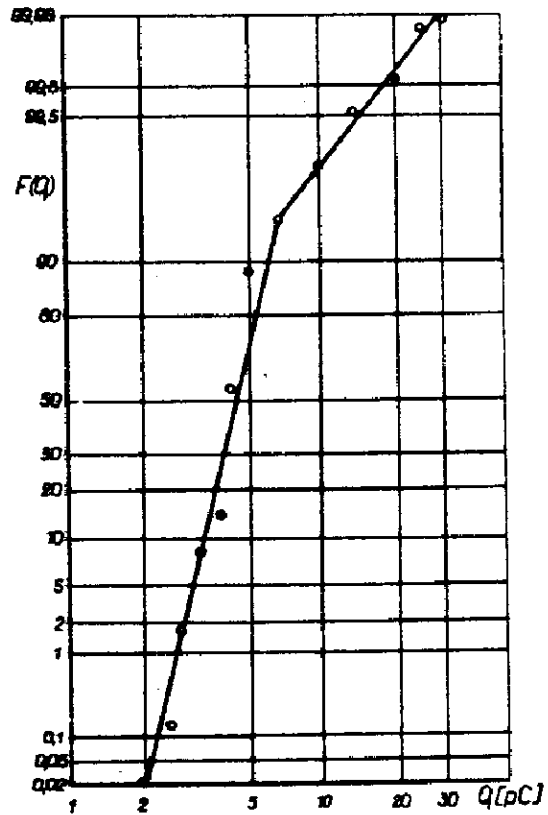
Całkowicie odmienny pod względem ilościowym i jakościowym rozkład empiryczny, charakteryzuje izolację grupy A' co wskazuje na obecność licznych źródeł wyładowań [15] o zróżnicowanym ładunku pozornym, o war-



Rys. 1. Rozkłady empiryczne ładunków wyladowań w kondensatorach grupy A, B 1 A°



Rys. 2. Częstość skumulowana rozkładów ładunków wyładowań dla kondensatorów grupy A i B



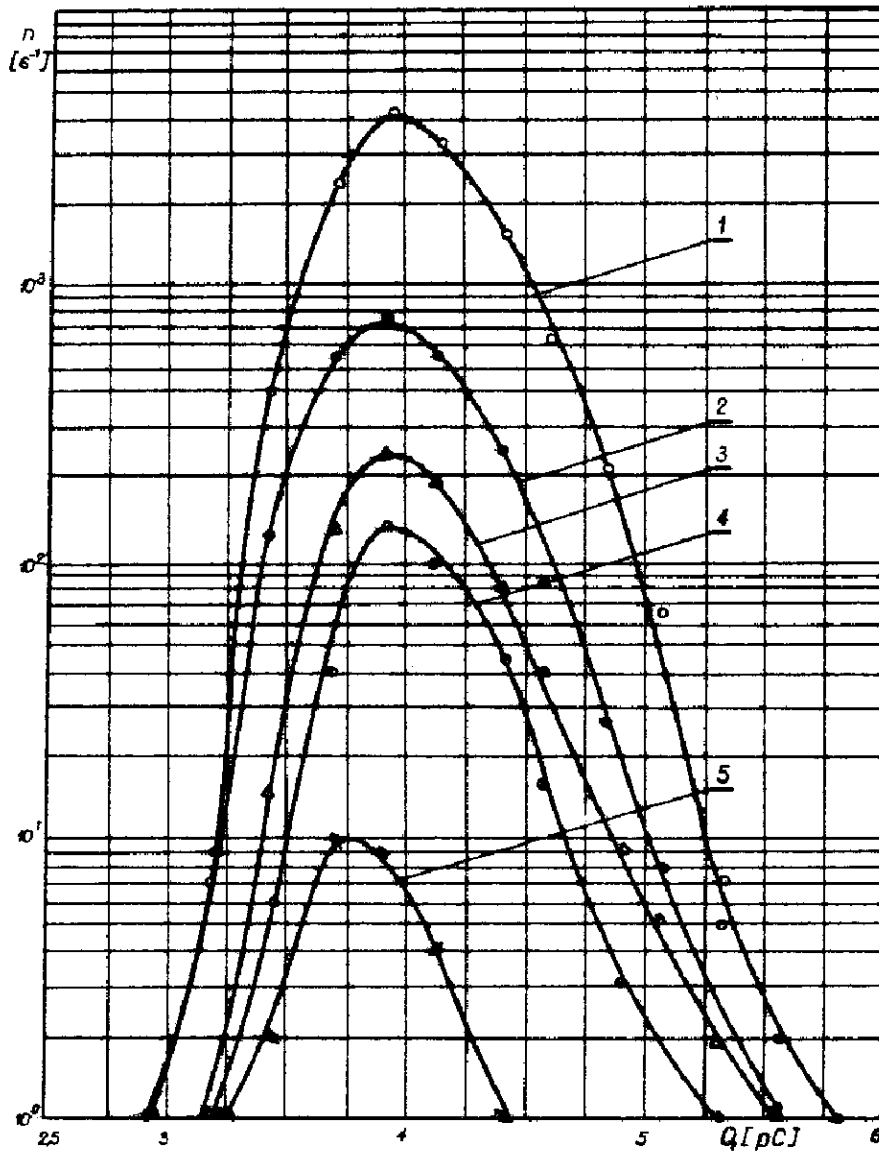
Rys. 3. Częstość skumulowana rozkładu ładunków wyładowań dla kondensatorów grupy A'

tości maksymalnej ponad 30 pC. Wykres częstości skumulowanych rozkładów ładunków na siatce logarytmico-normalnej wykazuje w tym przypadku dwa zakresy o różnych nachyleniach (rys. 3).

#### b) Badania zmian rozkładów empirycznych wyładowań w czasie

Stwierdzono całkowicie odmienny charakter zmian intensywności wyładowań niezupełnych w kondensatorach z dielektrykiem mieszanym papierowo-polipropylenowym i czysto polipropylenowym.

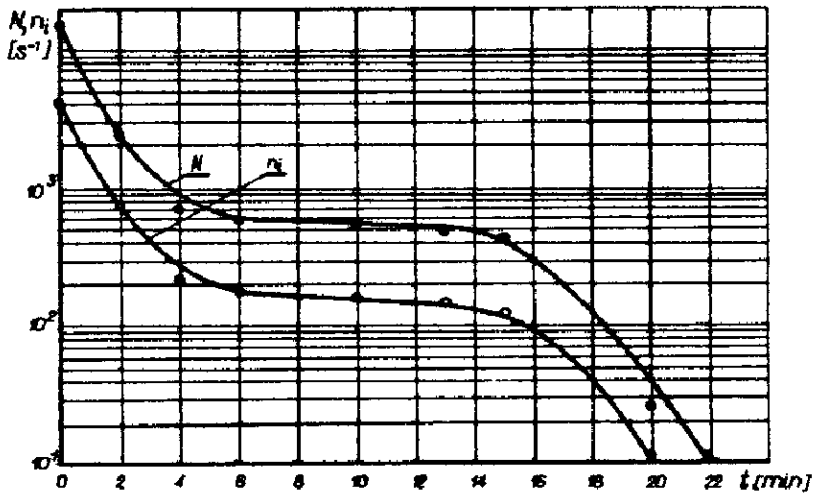
W pierwszym przypadku bowiem występuje przy napięciu  $1,3 U_0$  w kondensatorach grupy A zmniejszanie się intensywności wyładowań, przy czym



Rys. 4. Zanikanie wykładowań w kondensatorze z dielektrykiem mieszanym ( $\Delta$ ), 1 - początek próby, 2 - po 2 min, 3 - po 4 min, 4 - po 15 min, 5 - po 20 min.

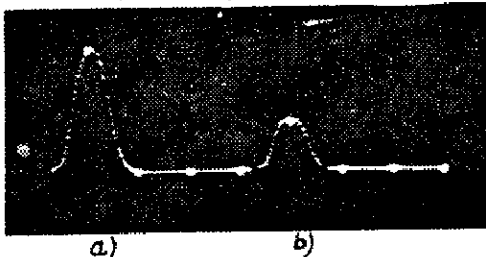


maleje zarówno częstość impulsów odpowiadająca wartości modalnej ładunku jak i rozstęp (rys. 4). Zobserwowano całkowity zanik wyładowań po czasie 20 - 90 min. Największa dynamika zmian występuje w ciągu pierwszych kilkunastu sekund i minut działania napięcia. (rys. 5). Tak

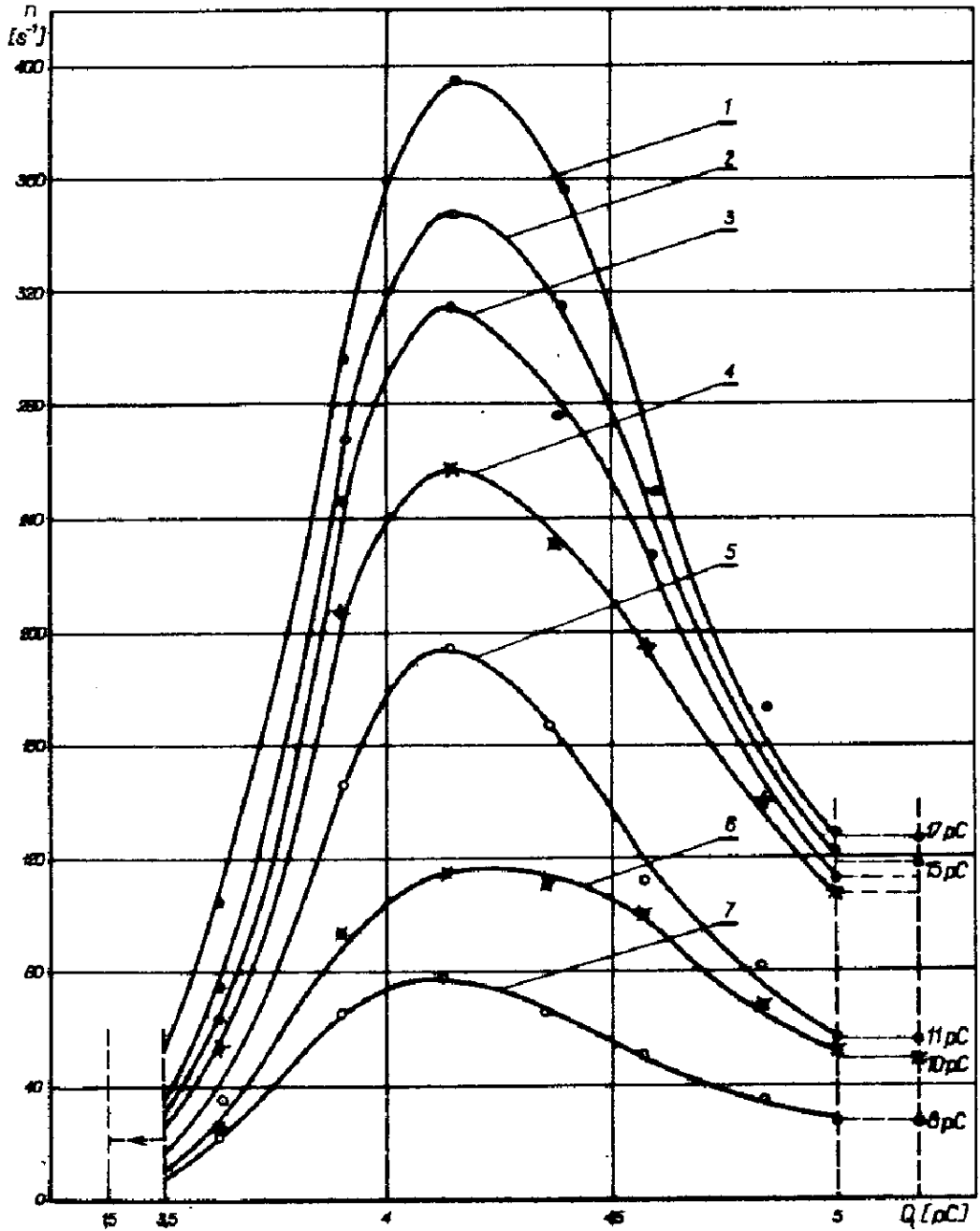


Rys. 5. Zmniejszanie się całkowitej liczby wyładowań  $N$  i wyładowań o ładunku największej częstości  $n_1$  ( $3,9 \text{ pC}$ ) w kondensatorze z dielektrykiem mieszanym (A)

np. całkowita liczba wyładowań w ciągu pierwszych 2 min. zmalała od wartości początkowej  $1,6 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$  do  $2,4 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ , a w ciągu następnych 20 min do wartości  $28 \text{ s}^{-1}$ . W kondensatorach z dielektrykiem mieszanym A' badania stabilności przeprowadzono przy napięciu  $U_N$ . ( $U_0 = 0,7 U_N$ ). W tym przypadku wyładowania również zmniejszały się intensywność w czasie, z tym że po upływie kilkadziesiątu minut następowała ich stabilizacja (rys. 6). Oscylogram zmian rozkładów wyładowań w dielektryku mieszanym (A) przedstawiono na fot. 1.

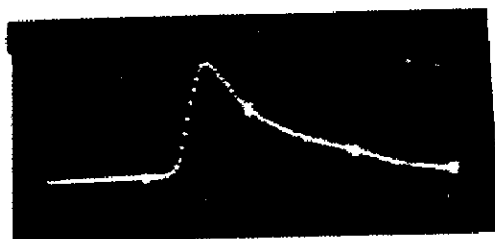


Fot. 1  
Zmiany rozkładów wyładowań w dielektryku mieszanym (A)  
a) początek próby, b) po 1 min

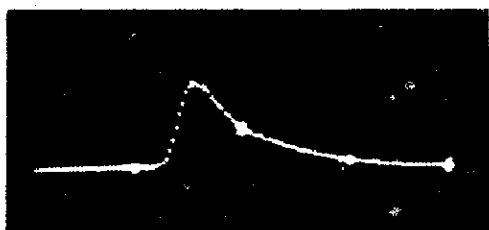


Rys. 6. Wybadowania quasistabilne w kondensatorze z dielektrykiem mieszanym ( $\Delta^*$ ) przy napięciu konstantowym. 1 - początek próby, 2 - po 2 s, 3 - po 4 s, 4 - po 6 s, 5 - po 4 min, 6 - po 50 min, 7 - po 90 min

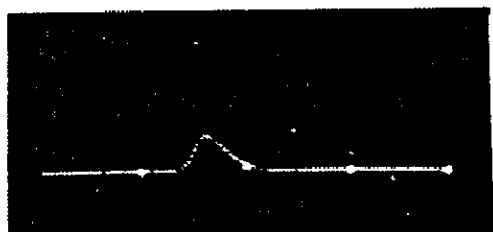
Oscylogramy zmian rozkładów wyładowań w dielektryku A' przedstawiono na fot. 2.



a)



b)



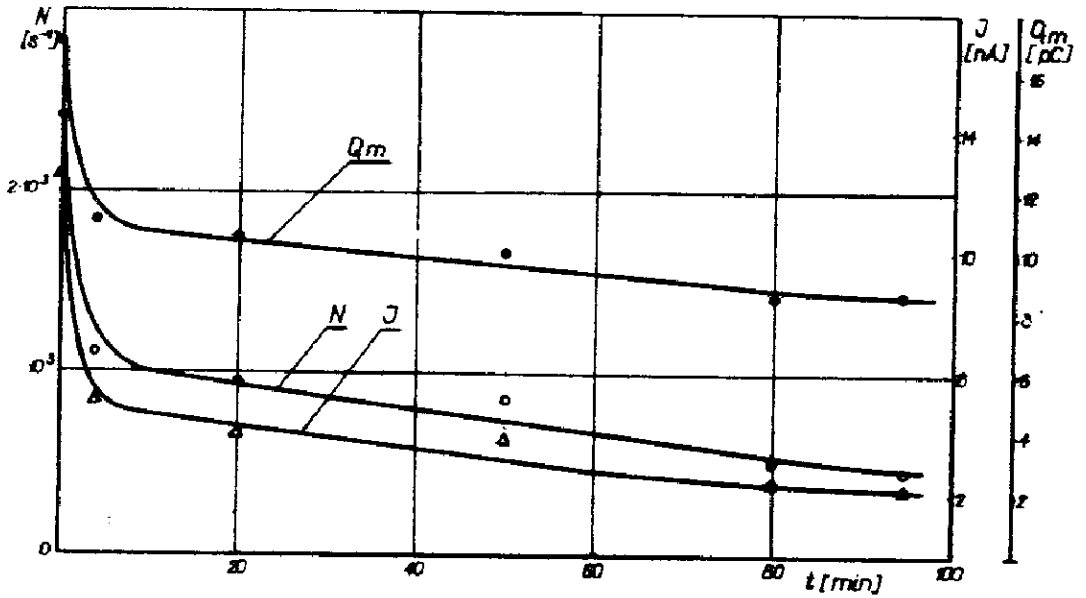
c)

Fot. 2.

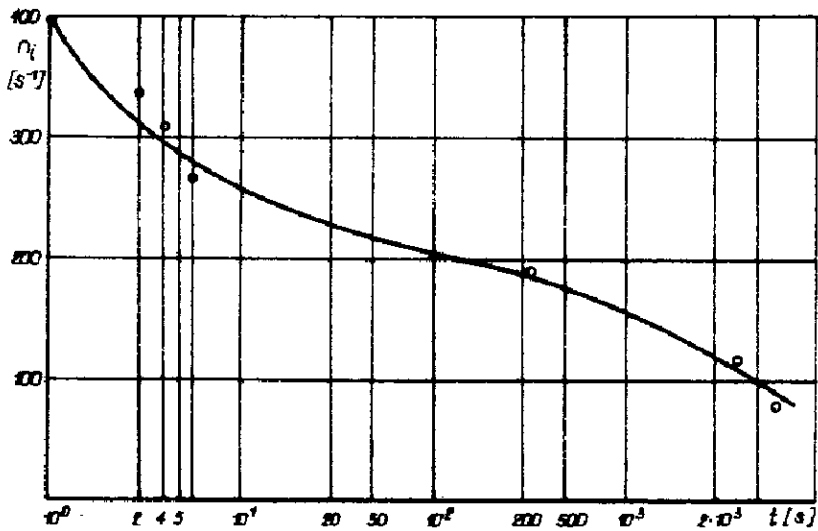
Zmiany rozkładów wyładowań w dielektryku A', a) początek próby, b) po 2 s, c) po 4 min

Zanikają wyładowania towarzyszące; zmniejszenie się całkowitej liczby wyładowań  $N$  od wartości początkowej  $2,4 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$  do ustalonej ok.  $500 \text{ s}^{-1}$ , średniego prądu wyładowań  $I$  od  $12 \text{ nA}$  do ok.  $2 \text{ nA}$ , ładunku maksymalnego  $Q_m$  z  $17 \text{ pC}$  do  $8 \text{ pC}$  i ładunku przeciętnego  $\bar{Q}$  z  $5$  do  $4,3 \text{ pC}$  (rys. 7). Największe zmiany w czasie dotyczyły ładunku o największej częstotliwości równego  $4,1 \text{ pC}$  (rys. 8).

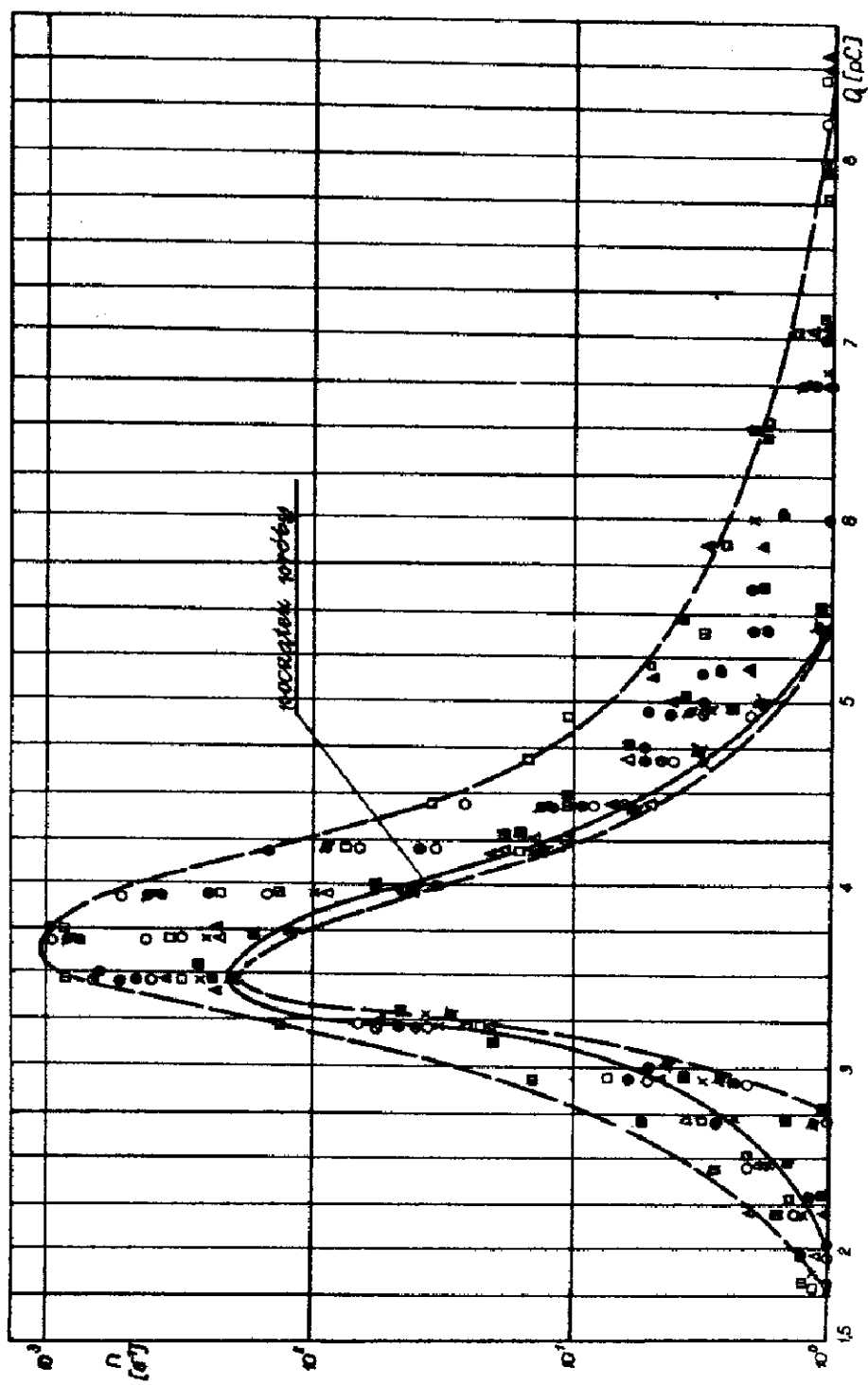
Kondensatory z dielektrykiem czysto polipropylenowym (B) wykazują przy napięciu probierczym  $1,3 U_0$  wyładowania wyłącznie stabilne z tendencją do zmian w czasie lecz tylko w obszarze rozrzutu zaznaczonym na rys. 9. Całkowita liczba wyładowań  $N$  wykazuje niewielkie wahania w czasie, dla większości kondensatorów wokół wartości  $10^4 \text{ s}^{-1}$  (rys. 10).



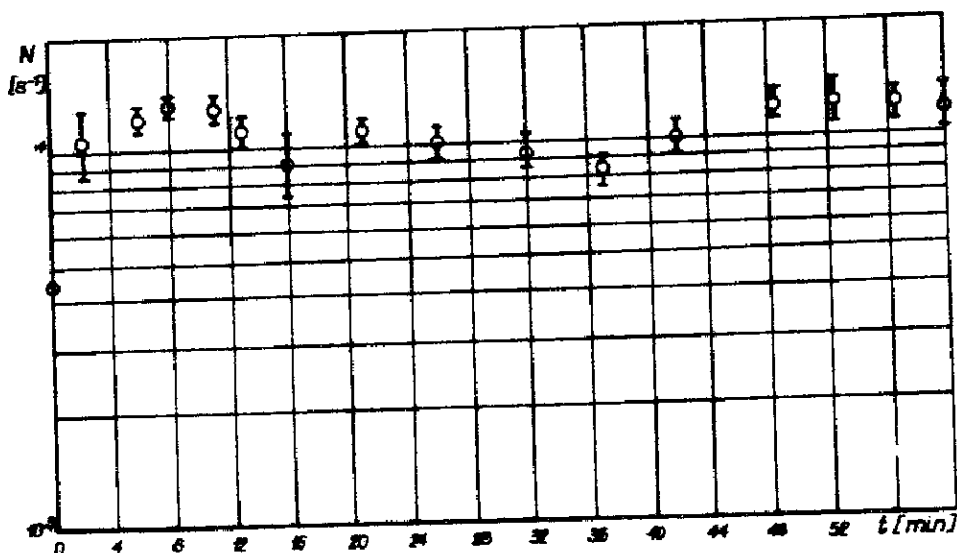
Rys. 7. Zmniejszanie się  $N$ ,  $I$  i  $Q_m$  dla wyładowań quasi-stabilnych (A')



Rys. 8. Zmniejszanie się liczby wyładowań o ładunku największej częstotliwości ( $4,1$  pC) w kondensatorze z dielektrykiem mieszanym (A')



Rys. 9. Obszar rozrzutu rozkładów empirycznych wyliczonych w dielektryku czysto polipropylenowym (B)



Rys. 10. Zależność całkowitej liczby wyładowań  $N$  od czasu w dielektryku czysto polipropylenowym (B)

## 6. Wnioski

1/ Stwierdzono odmienny charakter zmian intensywności wyładowań niesupełnych w funkcji czasu w kondensatorach z dielektrykiem mieszanym papierowo-polipropylenowym (wyładowania zanikające) i czysto polipropylenowym (wyładowanie stabilne) przy stałym napięciu probierczym i jednakowej technologii oraz rodzaju syciwa. Fakt ten ma bezpośredni związek ze strukturą obydwu dielektryków. W kondensatorach z dielektrykiem czysto polipropylenowym w wyniku małej zwilżalności folii PP występują gorsze warunki dla przesycenia izolacji cieczą impregnacyjną. Wyładowania niesupełne mogą zatem występować we wtrącinach gazowych między warstwami folii i posiadają charakter stabilny.

W kondensatorach z dielektrykiem mieszanym obecność papieru między warstwami folii poprawia warunki nasycania. Należy sądzić, że ośrodkiem wyładowań w tym przypadku są pęcherzyki gazowe powstałe z rozkładu w polu elektrycznym cząsteczek wody zawartej w izolacji [1]. Dalszy proces zanikania wyładowań, charakterystyczny dla izolacji papierowo-olejowej [8] ma najczęściej związek z rozpuszczeniem się pęcherzyków gazu w syciwie lub katforetycznym oczyszczaniem syciwa z drobnych przewodzących zawiesin.

2/ Odmienny charakter zmian intensywności wzn w kondensatorach z dielektrykiem mieszanym i czysto polipropylenowym pozwala przypuszczać, że wyładowania w obydwu konstrukcjach występują między warstwami izolacji w części wewnętrznej zwijki. W miejscach tych oprócz wtrącin gazowych mogą również znajdować się na powierzchni folii inne zanieczyszczenia i słabe punkty, pochodzące z procesu produkcji folii lub samych kondensatorów. Powyższe potwierdzają oględziny zwijek, które uległy przebiciu podczas badań, posiadających ślady przebicia w wewnętrznej części zwijki w miejscu jej zgięcia.

3/ Wyładowania niezupełne w kondensatorach z dielektrykiem mieszanym papierowo-polipropylenowym występują przy napięciu ok.  $1,7 U_N$  co można uznać za dopuszczalne dla tej konstrukcji, szczególnie wobec ich zanikającego charakteru.

Pozostaje natomiast do rozważenia wartość  $U_0 = 1,4 U_N$  w kondensatorach z dielektrykiem czysto polipropylenowym przy ich prawie stabilnym przebiegu.

4/ Wyniki badań wskazują na potrzebę poprawienia procesu nasycania kondensatorów z folią PP przez stworzenie warunków dla lepszej penetracji syciwa w głąb izolacji uwarstwionej.

5/ Przekład rozkładów empirycznych ładunków wyładowań i ich zmienność w czasie pozwalają oszczędzić proces technologiczny suszenia i nasycania izolacji.

Wyniki badań wskazują na możliwość ulepszenia metod osuszenia i impregnacji kondensatorów i optymalizację procesu technologicznego. Sprecyzowanie dokładnych wniosków wymaga dalszych badań z uwzględnieniem wpływu parametrów technologicznych suszenia i impregnacji oraz rodzaju materiałów na intensywność wzn.

6/ Przedstawione wyniki badań wskazują na dużą przydatność analizatorów wielokanałowych w badaniach wzn, bowiem skrócenie czasu pomiaru pozwala na stwierdzenie zmian największych w pierwszych kilku lub kilkunastu sekundach działania napięcia. Ponadto znajomość całego rozkładu empirycznego ładunków wyładowań umożliwia wyeliminowanie błędów wnioskowania opartego tylko na zmianach wartości jednego parametru charakteryzującego intensywność wzn. (np. ładunek maksymalny lub średni).

#### Literatura

1. Bossini C.A.: General Report of Group 15 (Insulating Materials)  
Electra 1974 nr 37, s. 97.
2. Cesul T., Soliński J., Zalewski J.: Badania wyładowań niespełnych w kondensatorach energetycznych. Przegląd Elektrotechniczny  
1972 nr 10, s. 459.
3. Church H.F.: Partial Discharge Phenomena in Power Capacitors.  
Electra 1972, nr 21, s. 30.
4. Draft Revision IEC Publication 70 Power Capacitors. 33 (Secr 58)  
January 1974.



5. Florkowska B., Gacek R., Włodak R.: Półautomatyczny zestaw aparatury do badań wyładowań niespełnych metodą analizy impulsów. *Elektrotechnika, Biuletyn Informacyjny IEL* 1973, nr 4, s. 43.
6. Florkowska B., Gacek R., Włodak R.: Technika analizatorów wielokanałowych w badaniach wyładowań niespełnych i zastosowanie ETO do opracowania wyników pomiarów. *Symposium "Problemy wyładowań niespełnych w układach elektroizolacyjnych"*, Zakopane 25 - 27.VI.1975.
7. Florkowska B.: Issledowanije razvitija czasticznych razriadov w polietilennoj izolacii silowych kabliej. III Nacjo-nalna Konferencija po Elektroizolacjonnaja Technika i Kabilnoje Proiswodstwo, Elisot - 74, Warna.
8. Florkowska B., Gacek R.: O stabilności wyładowań niespełnych w izolacji papierowo-olejowej. *Symposium "Wyładowanie niespełne jako czynnik destrukcji izolacji"*. Krościenko 1972, s. 35.
9. Galand J., Morel J.F., Goliński J., Labus-Mawrat K.: Mechanizm powstawania wyładowań niespełnych w izolacji papierowo-olejowej. *Przegląd Elektrotechniczny* 1975, nr 1, s. 14.
10. Krasucki Z.: Polypropylene films and their suitability as dielectric for power - factor correction capacitors. Reference: SC 15 - 72 (WG - 05).
11. Krasucki Z., Church H.F., Garton C.G.: A new explanation of gas evolution in electrically stressed oil - impregnated paper insulation.
12. Lafosse A., Bonille J.B., Bozzini C.A.: Influence of the introduction of plastic dielectrics upon the construction of power capacitors. *SIGRE* 1972, W.G. 15 - 06.
13. Publication No CP-P2-1973. IEC. Official Standards Proposal. Test procedure for measurement of internal partial discharges in capacitors.

14. Sollenbergen B.: General Report of Group t2 (Transformers) Electra 1974, nr 37, s. 70.
15. Włodek R.: Analiza wykładów niezupelných i jej zastosowanie do ich interpretacji w technicznych układach elektroizolacyjnych. Zeszyty Naukowe AGH, 1974, z. 61.
16. Zalewski J.: Problemy kondensatorowe. CIGRE 1970. Przegląd Elektrotechniczny 1971, nr 8 - 9, s. 391.
17. Zalewski J.: Badania zjawisk występujących w procesie impregnacji dwufenylem chlorowanym kondensatorów o dielektryku złożonym z papieru i folii polipropylenowej. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1972.
18. Zalewski J.: Problemy kondensatorowe. CIGRE 1972. Przegląd Elektrotechniczny 1973.