

Wacław Jezierski, S. Jerzy Dymowski

PROBLEMATYKA BADAŃ WYLADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH PRZY NAPIĘCIACH  
PIORUNOWYCH W MODELACH IZOLACJI WZDŁUŻNEJ TRANSFORMATORÓW  
ENERGETYCZNYCH

1. Wstęp

Jednym z najtrudniejszych problemów w budowie transformatorów wielkiej mocy i wysokich napięć są zagadnienia wytrzymałości dielektrycznej. Układ izolacyjny transformatora energetycznego jest bardzo skomplikowany i dla jego zaprojektowania jest konieczna znajomość kryteriów wytrzymałości elementów wchodzących w jego skład. Jednym z tych elementów jest izolacja wzdluzna, która jest najbardziej zagrożona przy napięciach impulsowych.

Aby uzyskać informacje o wytrzymałości interesujących nas fragmentów układu izolacyjnego, konieczne są badania modelowe, na których podstawie istnieje możliwość dostarczenia danych potrzebnych projektantowi transformatora.

Badania takie prowadzone są na świecie od dawna i w literaturze spotyka się obszerne nawet wyniki, przedstawiane przez różnych badaczy. Jak zwykle, istnieją też w niektórych przypadkach różnice odnośnie interpretacji uzyskanych rezultatów badań.

Jednym z zasadniczych problemów jest ustalenie kryterium wytrzymałości układu izolacji wzdluznej dużych transformatorów energetycznych.

---

Doc.dr inż. Wacław Jezierski, mgr inż. St. Jerzy Dymowski -  
Instytut Elektrotechniki Oddział w Łodzi

Można się tu spotkać z dwoma poglądami: jedni autorzy za kryterium wytrzymałości przyjmują przebicie zupełne od elektrody do elektrody, inni - pojawienie się wyładowań niezupełnych w kanale olejowym /o nie-  
zbyt dokładnie określonej intensywności/.

Wydaje się, że nie jest celowe rozstrzygnięcie kwestii, co jest ważniejsze, gdyż zarówno znajomość wytrzymałości ze względu na przebicie, jak i na wyładowania niezupełne jest potrzebna przy projektowaniu układu izolacyjnego transformatora.

Układ ten jest na tyle skomplikowany, a zachodzące w nim zjawiska tak mało rozeznane, że na podstawie badań modelowych powinno się podawać maksymalną możliwą ilość informacji, a wyniki pomiarów wyładowań niezupełnych przy napięciach impulsowych są na pewno jedną z ważniejszych.

## 2. Wyładowania niezupełne przy napięciach impulsowych

Pomiary intensywności wyładowań niezupełnych przy napięciach impulsowych próbowano przeprowadzać już dość dawno. W 1952 roku autorzy [6] przedstawili układ do pomiaru wyładowań w modelach układów izolacyjnych oraz uzyskane wyniki badań. W latach następnych w Polsce podejmowano próby dopracowania się metody wykrywania wyładowań niezupełnych na gotowych transformatorach [2, 5]. Wadą tych metod była zbyt mała czułość oraz niemożliwość dobrego odfiltrowania zakłóceń. Z czasem do pomiaru wyładowań niezupełnych zaczęto przykładać coraz większą wagę i w wielu publikacjach [4,7,8] wyniki pomiarów intensywności wyładowań niezupełnych są podane w dość obszerny sposób, a w niektórych, np. [1], pojawienie się intensywnych wyładowań niezupełnych w modelu uważano za kryterium wytrzymałości układu izolacyjnego.

Kwestia dopuszczalności wyładowań niezupełnych przy napięciach impulsowych jest w zasadzie otwarta i można spotkać się z dość różnymi poglądami na ten temat. Autorzy radzieccy [1,8] prezentują pogląd, że intensywne wyładowania niezupełne w izolacji są niedopuszczalne i uza-

sadniają to faktem, że powstają one widoczne ślady na papierze, co może prowadzić do obniżenia wytrzymałości. Inni badacze [4,7] podają oba rozpatrywane kryteria, nie rozstrzygając kwestii, które z nich są decydujące. Zdaniem autorów niniejszej pracy, poglądy przedstawione w [4,7] są bardziej uzasadnione. Przeprowadzając pomiary wytrzymałości dielektrycznej modeli izolacji wniknącej dużą liczbą udarów /rzędu 500, przy których pojawiły się intensywne wyładowania niezupełne, nie stwierdzono wyraźnego obniżenia się napięcia przebicia. Na tej podstawie można wyciągnąć wniosek, że nawet intensywne wyładowania niezupełne nie mają charakteru niszczącego. W przypadku układu izolacyjnego transformatora /ze względu na jego złożoność/ problem ten może wyglądać inaczej i pojawienie się intensywnych wyładowań niezupełnych w określonym fragmencie izolacji może spowodować przebicie układu izolacyjnego.

Ponieważ konieczne są badania modelowe zarówno ze względu na wyładowania niezupełne, jak i na przebicie, ogromnej wagi nabiera problem metodyki pomiaru wyładowań niezupełnych przy napięciach impulsowych oraz wskaźników ich intensywności. Najczęściej spotyka się przyjmowanie jako wskaźnika intensywności wartości maksymalnej ładunku pozornego wyładowań niezupełnych. Stosuje się wiele metod pomiaru tej wielkości i przykładowo można wymienić:

1. Metoda pomiaru ładunku pozostającego w układzie na skutek wyładowań niezupełnych /pomiar odbywa się po stosunkowo długim czasie od momentu przyłożenia udaru/.

2. Metody pomiaru sygnału na impedancji detekcyjnej w czasie trwania udaru.

Pierwsza z przedstawionych metod jest stosowana przez autorów japońskich [7]. Jej zaletą jest mała wrażliwość na zakłócenia zewnętrzne. Wydaje się jednak, że w przypadku tej metody jest możliwe kumulowanie się ładunków powstałych przy poszczególnych udarach, wynikające z dużej stałej czasu rozładowania izolacji papierowo-olejowej. Metodą

tą można dość jednoznacznie ocenić napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych /pierwsze pojawienie się wyładowań/.

Wyniki pomiarów intensywności wyładowań na stopniach napięciowych wyższych niż stopień, na którym pojawiły się wyładowania po raz pierwszy, wydają się mniej godne zaufania. Badacze japońscy nie obserwują zjawiska "zanikania" i "pojawiania się" wyładowań na kolejnych stopniach napięciowych, które to zjawisko widać wyraźnie przy zastosowaniu metod bezpośredniego pomiaru sygnału na impedancji detekcyjnej w czasie trwania udaru.

Przeskok iskrowy jest, jak wiadomo, zjawiskiem stochastycznym, w związku z tym wyładowanie niezupełne będące przeskokiem iskrowym na fragmencie układu izolacyjnego powinno się pojawiać z pewnym prawdopodobieństwem. Zaobserwowano to w czasie badań przedstawionych w [3].

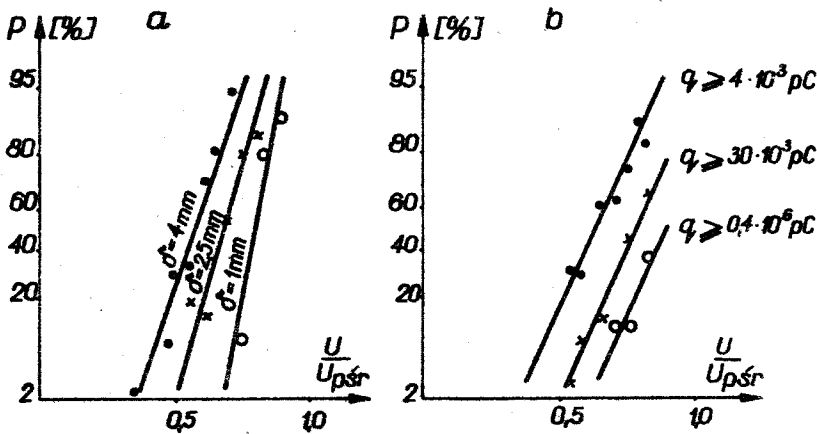
Możliwość obserwacji statystyki zjawiska należy uznać za istotną zaletę metody bezpośredniego pomiaru sygnału z impedancji detekcyjnej. Metoda ta jest stosowana w wielu wariantach, ale wadą jej jest wrażliwość na zakłócenia pojawiające się w czasie trwania czoła i szczytu udaru.

Autorzy radzieccy [1] stosują do obserwacji przebiegu detekcyjnego oscyloskop z pamięcią. Istnieje wtedy możliwość wzrokowego rozróżnienia zakłóceń od wyładowań, a amplituda impulsów jest proporcjonalna do ładunku pozornego. Czulości jakie uzyskuje się w tej metodzie są rzędu 3000 pC.

W pracy [3] stosowano metodę podobną - z tym, że sygnał z impedancji detekcyjnej był doprowadzany do specjalnie skonstruowanego miernika. Aby nie mierzyć zakłóceń, które są wielokrotnie większe od impulsów wywołanych przez wyładowania niezupełne, wspomniany miernik został wykonany tak, że pozwalał na ustawienie odpowiedniego czasu opóźnienia pomiaru w stosunku do impulsu wyzwalającego  $t_{op} = 1 - 20 \mu s$  / oraz ustawienie czasu włączenia układu pomiarowego. Układ był skalowany za pomocą generatora impulsów typu ERA i czułość, jaką uzyskano, była rzędu 4000 pC.

Równolegle z miernikiem włączono oscyloskop wysokonapięciowy, pozwalający na obserwację przebiegu detekcyjnego. Opóźnienie czasu pomiaru /ok.  $10 \mu\text{s}$ / nie powinno wpływać na wyniki pomiarów, ponieważ - jak wynika z [7] i co potwierdzono w badaniach własnych [3] pierwsze wyładowania pojawiają się po długich czasach /rzędu kilkudziesięciu do stu mikrosekund/ i ze wzrostem przykładanego napięcia "przesuwają się" na czasy krótsze. Zjawisko to może wskazywać, że w mechanizmie powstawania wyładowań istotną rolę odgrywa ładunek przestrzenny.

W trakcie badań modeli izolacji międzycewkowej udokumentowano, że pojawienie się wyładowania niezupełnego, o różnej intensywności, jest związane z prawdopodobieństwem, które przedstawiono na rysunku 1b. Podobna zależność ale dla izolacji zwojowej jest pokazana na rysunku 1a, ale rysunek ten dotyczy wyładowań o  $q \geq 4000 \text{ pC}$ .

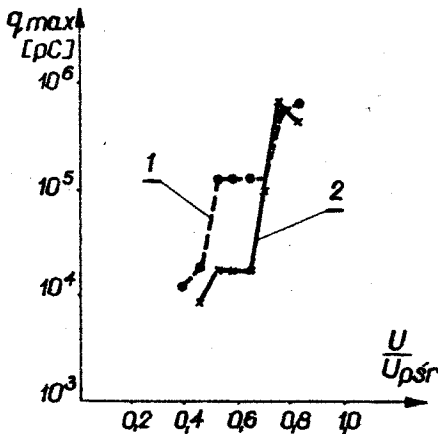


Rys.1. Zależność prawdopodobieństwa pojawienia się wyładowań niezupełnych od wartości maksymalnej przyłożonego udaru /  $1,2/50 \mu\text{s}$ /. a/ dla izolacji zwojowej o różnej grubości b/ dla izolacji międzycewkowej  $\Delta = 3$  i  $\delta = 4 \text{ mm}$  i różnych wielkości mierzonego maksymalnego ładunku pozornego  $q$ .

Na wszystkich zamieszczonych w tekście rysunkach  $U_{p\acute{s}r}$  jest to średnie napięcie przebicia zupełnego badanych modeli.

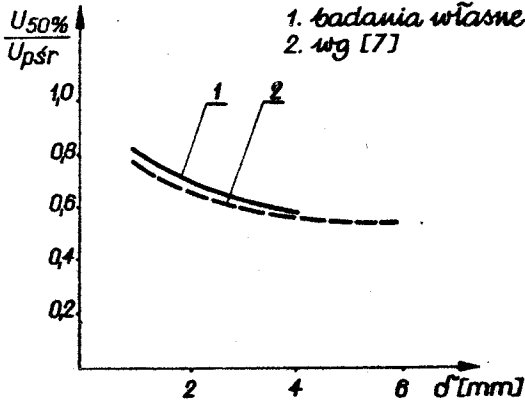
Jak widać z rysunku 1, wyładowania niezupełne mogą pojawiać się przy napięciach mniejszych od 50% średniego napięcia przebicia, a prawdopodobieństwo ich pojawienia się przy określonej wielkości  $U/U_{p\acute{s}r}$  jest w przypadku izolacji zwojowej większa dla izolacji grubej niż dla cienkiej. Prawdopodobieństwo pojawienia się wyładowań o dużej intensywności jest mniejsze niż dla wyładowań o intensywności mniejszej.

W trakcie badań izolacji międzycewkowej zaobserwowano, że wyładowaniom o intensywności rzędu 100 tys. pC towarzyszy widoczna iskra w kanale olejowym. Stwierdzono też wpływ czasu, jaki upłynął od momentu impregnacji modelu do wykonania badań /czasu odstawiania/, na pojawienie się wyładowań. Ilustracją tego zjawiska jest rysunek 2, na którym przedstawiono najwyższą wartość ładunku wyładowań niezupełnych w funkcji wartości szczytowej udaru przy przykładaniu 10 uderzeń na stopień napięciowy.



Rys.2. Zależność maksymalnego ładunku pozornego od napięcia dla dwóch różnych czasów odstawiania: 1/ czas odstawiania mniejszy od 70 h; 2/ czas odstawiania ponad 150 h.

W celu porównania własnych wyników badań izolacji zwojowej z literaturą [7], na rysunku 3 przedstawiono stosunek 50-cio procentowego napięcia zapłonu wyładowań do średniego napięcia przebicia modeli. Widać, że mimo odmienności metodyki badań, różnice są stosunkowo niewielkie.



Rys.3. Zależność napięcia zapłonu wyładowań od grubości izolacji zwojowej

### 3. Podsumowanie

W trakcie badań na modelach izolacji zwojowej i międzycewkowej stwierdzono, że wyładowania niezupełne - nawet bardzo dużej intensywności - nie mają charakteru niszczącego. Nie znaczy to jednak, że za kryterium wytrzymałości można przyjmować przebiecie zupełne izolacji wzdłużnej. Jak już wspomniano, sprawa dopuszczalności wyładowań w rzeczywistym układzie izolacyjnym transformatora jest znacznie bardziej skomplikowaną i w zależności od miejsca ich wystąpienia mogą być one mniej lub bardziej szkodliwe.

Ogólnie biorąc, należy stwierdzić, że przy badaniach modelowych wytrzymałości układu izolacyjnego transformatora napięciem impulsowym jest konieczny pomiar zarówno napięcia przebiccia, jak i badania wyładowań niezupełnych. W przyszłych pracach należy szczególną uwagę zwrócić na doskonalenie metod detekcji wyładowań niezupełnych i opracowanie jednoznacznych sposobów interpretacji uzyskiwanych wyników badań.

## LITERATURA

1. Czarnogotski W.M., Dżuń L.P., Maksimcow A.F.: Elektriczeskaja procznost mieżkatuszocznoj izolacji siłowych transformatorów. "Interelektro", Łódź 1978.
2. Dubowik B., Jezierski W.: Zaprojektowanie, wykonanie i wdrożenie układów do wyładowań niezupełnych w transformatorach przy napięciach udarowych. IEL O/L nr OL/50/69.
3. Dymowski S.: Badania modelowe izolacji wzdłużnej transformatorów i poprawa jej jakości. IEL O/L nr OL/43/78,
4. Gadek K.: Wicklungen für Transformatoren grosser Leistung und hoher Spannung. Conti Elektro Berichte Juli/Sept 1966.
5. Goliński I., Lech W., Żołędziowski S.: Jonizacja w transformatorach i maszynach elektrycznych. Rozpr.Elekt. 1957, t.III z.3.
6. Hagenguth I.H., Liao T.W.: Impulse Corona Detekction Measurement of Intensity and Damage Produced. Tr AIEE 1952, cz.III s.263.
7. Kamata Y., Endou K.: Lightning Impulse Volt - Time Characteristics in Transformer Insulation. Conference paper IREE PAS Winter Meeting New York, N.Y., January - February 1973.
8. Panow A.W., Morozowa T.I.: Rekomendacyi po izmienienu technicznych instrukcji Moskowskovo Elektrozawoda. Dokumentacja nr 3864-07 1965.

## Summary

THE PROBLEMS RELATED TO INVESTIGATION OF PARTIAL DISCHARGES AT LIGHTNING VOLTAGES, PERFORMED ON THE MINOR INSULATION MODELS OF POWER TRANSFORMERS

There is provided, in the paper, a critical review of the methods used for the measurement of partial discharges occurring at lightning impulse voltages. Also, reported are certain opinions of harmful effects of the partial discharges at the lightning voltages of a 1.2/50 -  $\mu$ s waveform.

There are also presented certain in-house laboratory measurements of partial discharges, performed on the minor insulation models of power transformers.