

WPLYW TEMPERATURY NA ZMIANY INTENSYWNOŚCI WYŁADOWAŃ
NIEZUPEŁNYCH W UKŁADACH IZOLACYJNYCH KABLI
ELEKTROENERGETYCZNYCH

1. Wstęp

Dotychczasowe badania zmian intensywności wyładowań niezpełnych w układach izolacyjnych kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia uwzględniały wpływ dwóch czynników: napięcia oraz czasu jego działania [1, 2]. Badania te miały na celu stwierdzenie, czy w izolacji kablowej po procesie technologicznym występują zjawiska wyładowań niezpełnych oraz jaka jest ich dynamika pod wpływem napięcia i czasu jego działania.

Stwierdzono, że w izolacji papierowo-olejowej po prawidłowo przeprowadzonym procesie technologicznym powietrze pozostałe w układzie izolacyjnym jest w całości rozpuszczone w oleju [3]. Wtrąciny gazowe mogą powstać w wyniku procesów cieplnych występujących w izolacji kablowej spowodowanych nagrzewaniem i chłodzeniem przy zmianach wartości prądu obciążenia kabla [4]. Tak więc w warunkach eksploatacyjnych w izolacji papierowo-olejowej dwa pola: pole elektryczne i pole cieplne mają decydujący wpływ na zainicjowanie i rozwój wyładowań niezpełnych. Wyładowania te obejmować mogą różne formy, a z upływem czasu może następować ich zanik, lub mogą prowadzić do wyładowania zupełnego jako końcowego stadium destrukcji izolacji.

Dotychczasowe badania wpływu temperatury na zmiany intensywności wyładowań niezpełnych w izolacji papierowo-olejowej kabli elektroenergetycznych ograniczały się do pomiarów zależności współczynnika strat dielektrycznych od temperatury przy stałej wartości napięcia, lub pomiaru zależności współczynnika strat dielektrycznych od napięcia

przy różnych wartościach temperatury [5]. Badania te miały głównie na celu weryfikację założeń konstrukcyjnych i technologicznych produkcji kabli, rzadziej zaś ocenę stanu izolacji kabli znajdujących się w eksploatacji. W oparciu o metodę analizy amplitudowej przeprowadzono badania wpływu temperatury na zmiany intensywności wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych kabli elektroenergetycznych. Badania te prowadzone w stanie cieplnie nieustalonym miały na celu znalezienie zależności pomiędzy temperaturą układu izolacyjnego, a intensywnością wyładowań.

2. Metodyka badań i opracowanie wyników pomiaru

W celu określenia związków jakościowych i ilościowych pomiędzy temperaturą układu izolacyjnego, a intensywnością wyładowań niezupełnych badania przeprowadzono na dwóch modelowych obiektach:

a) kable w których do napięcia znamionowego międzyprzewodowego nie występują wyładowania niezupełne (minimalny ładunek pozorny wyładowania określony jest oszczędnością układu pomiarowego),

b) kable w których występują intensywne lokalne wyładowania niezupełne wywołane w sposób sztuczny przez wbicie w głąb izolacji przez powłokę ostrza stalowego (odzworowanie mechanicznego uszkodzenia powłoki).

Objektami przeznaczonymi do badań były odcinki pojedynczych żył typowych kabli produkcji krajowej - JHAK na napięcie znamionowe 20 kV. Zakńoczenia badanych odcinków kabli wykonano w postaci metalowych głowic wypełnionych olejem. W celu zabezpieczenia przed wnikaniem oleju do wnętrza izolacji papierowo-olejowej jej miejsce styku z olejem wypełniającym głowicę uszczelniono żywicą epoksydową. Długość badanych odcinków kabli wynosiła 6 - 8 m.

Badania przeprowadzono przy napięciu znamionowym międzyprzewodowym i przy obciążeniu kabla prądem znamionowym kabla ułożonego w powietrzu. W przypadku kabli w których do napięcia znamionowego międzyprzewodowe-

go nie występują wyładowania niezupełne badania przeprowadzono dodatkowo przy obciążeniu prądem równym dwukrotnej wartości prądu znamionowego kabla ułożonego w powietrzu.

Zestaw aparaturowy składał się z:

- a) układu do pomiaru intensywności wyładowań niezupełnych [6],
- b) układu nagrzewania kabla i pomiaru temperatury.

Nagrzewanie badanego odcinka kabla przeprowadzono metodą pośrednią wykorzystując transformator wielkopiętrowy, którego obwód wtórny stanowi zwarta żyła badanego kabla [7]. Dla kontroli krzywej nagrzewania przeprowadzono ciągły pomiar temperatury powłoki kabla. Zastosowano w tym celu czujnik rezystancyjny nawinięty w postaci cewki bezpośrednio na powłocę kabla i włączony w obwód niekrótnoważonego mostka Wheastone'a. Napięcie niewyważenia mostka mierzono w sposób ciągły woltomierzem cyfrowym. Przyjęte następujące wielkości charakteryzujące intensywność wyładowań niezupełnych:

- ładunek pozorny wyładowania niezupełnego,
- częstość powtarzania impulsów wyładowań,
- średni prąd wyładowań niezupełnych.

Stochastyczny impulsowy charakter wyładowań spowodował konieczność zastosowania do opracowania wyników metod statystyki matematycznej.

Dla otrzymanych rozkładów empirycznych wyładowań tj. zależności $n_1 = f(Q_1)$ obliczono następujące wielkości charakterystyczne,

- wartość przeciętną ładunku \bar{Q} ,
- odchylenie standardowe ładunku $\hat{\sigma}$,
- rozstęp R .

W celu porównania ze sobą rozkładów empirycznych otrzymanych dla kabli o różnych pojemnościach oraz porównanie rozkładów empirycznych z teoretycznymi przeprowadzono normowanie i testowanie rozkładów empirycznych. W tym celu dokonano dla otrzymanych rozkładów empirycznych weryfikacji hipotezy nieparametrycznej za pomocą testu zgodności Kolmogorowa opartego na statystyce λ [8]. Otrzymane rozkłady są rozkładami

wykładniczymi, których gęstość prawdopodobieństwa opisana jest wzorem:

$$f(Q) = \begin{cases} = 0 & \text{dla } Q \leq 0 \\ = \int \exp(-f Q) & \text{dla } Q > 0 \end{cases}$$

Przyjmując poziom istotności $\alpha = 0,01$ przeprowadzono weryfikację hipotezy. Program obliczeń opracowano w języku Fortran dla maszyny matematycznej Odra.

W celu znalezienia korelacji między intensywnością wyładowań niezupełnych, a temperaturą układu izolacyjnego obliczono przebieg temperatury żyły, różnicy temperatur żyła-powłoka i temperatury w dowolnym miejscu izolacji w okresie nagrzewania i chłodzenia. W przypadku obliczenia temperatury żyły i różnicy temperatur żyła-powłoka skorzystano z metody przedstawionej przez Van Warmera [9], a w przypadku wyznaczenia temperatury w dowolnym miejscu izolacji z metody podanej w [10].

3. Wyniki pomiarów

Badania przeprowadzono na odcinku kabla typu 3HAK 20 kV, 120 mm² w którym do napięcia znamionowego międzyprzewodowego, w temperaturze otoczenia $\bar{U}_0 = 25^{\circ}\text{C}$, nie występują wyładowania niezupełne. Czułość układu pomiarowego określona jako minimalny możliwy do zmierzenia ładunek pozorny wyładowania wynosi 30 pC.

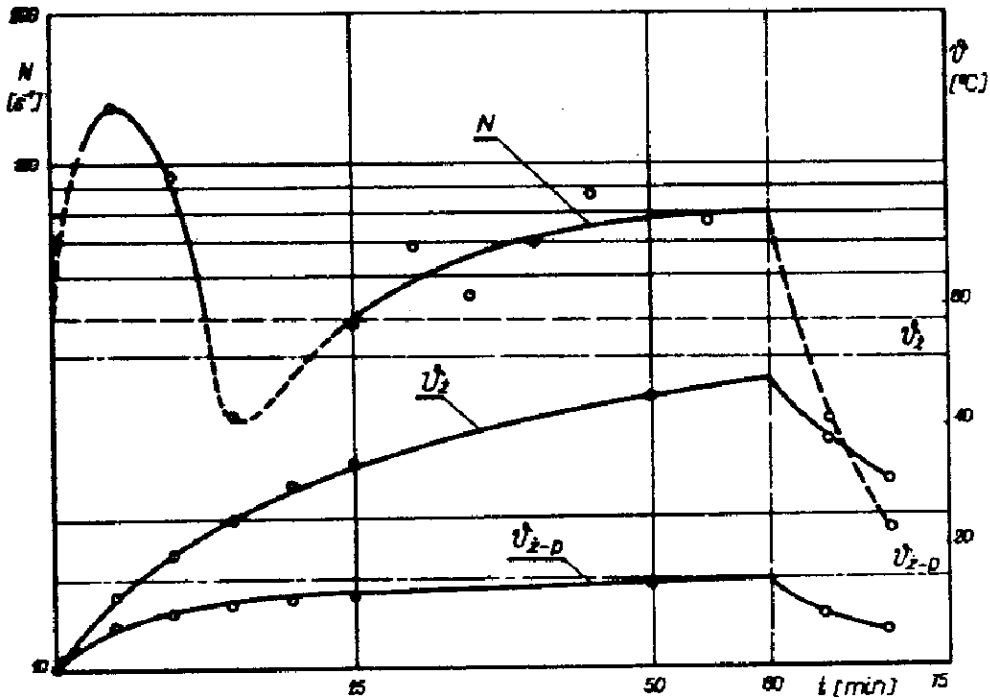
Obciążenie kabla prądem znamionowym (kable umieszczonego w powietrzu przy obciążeniu długotrwałym) $I_N = 160 \text{ A}$ nie powoduje powstania w nim wyładowań niezupełnych (o ładunku pozornym większym od 30 pC). Zwiększenie prądu obciążenia do dwukrotnej wartości prądu znamionowego tj. $2 I_N = 320 \text{ A}$ spowodowało powstanie w nim w stanie cieplnie nieustalonym wyładowań niezupełnych. Wyładowania te są wyładowaniami małointensywnymi, ich całkowita liczba nie przekracza 150 s^{-1} , a ładunek pozorny zawiera się w okresie 30 - 50 pC.

Na rysunku 1 przedstawiono zależność całkowitej liczby wyładowań od czasu w okresie nagrzewania i chłodzenia. Badany odcinek nagrzewano

prądem $2 I_N = 320 \text{ A}$ w ciągu 60 min, a następnie wyłączono obciążenia. W czasie nagrzewania i chłodzenia w sposób ciągły działało napięcie znamionowe międzyprzewodowe tj. $U_N = 20 \text{ kV}$. Na tym samym rysunku przedstawiono przebieg zależności temperatury żyły i różnicy temperatur żyła-powłoka od czasu. Równania opisujące ten przebieg mają następującą postać:

$$\vartheta_z(t) = 52 - 0,2 e^{-2,5847 t} - 2,8 e^{-0,6293 t} - 49,0 e^{-0,0399 t}$$

$$\vartheta_{z-p}(t) = 15 + 0,01 e^{-2,5847 t} - 6,35 e^{-0,6293 t} - 9,66 e^{-0,0399 t}$$



Rys. 1. Zależność całkowitej liczby wyładowań od czasu w stanie cieplnie niestabilnym. Kabel 3HAK 20 kV, 120 mm^2 , $\vartheta_0 = 25^\circ\text{C}$, 0 - 60 min - nagrzewanie prądem $2 I_N = 320 \text{ A}$

W końcowym okresie nagrzewania temperatura żyły osiągnęła wartość 73°C , a różnica temperatur żyła-powłoka $14,5^{\circ}\text{C}$. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że istnieje pewna graniczna temperatura powyżej której jest możliwe powstanie małointensywnych wyładowań wywołanych tą temperaturą [4].

W pierwszym okresie nagrzewania (1,5 T) gwałtowne zmiany całkowitej liczby wyładowań spowodowane są zjawiskami elektroforetycznymi. Można przyjąć, że nawet w bardzo starannie oczyszczonym i filtrowanym oleju kablowym zawsze znajdują się drobne zawiesiny. Mogą to być cząsteczki o wymiarach jonów - 2 Å lub większe 50 do 500 Å [12]. Na cząsteczki znajdujące się w warstwie oleju pomiędzy dwoma warstwami dielektryka działają siły pola elektrycznego. Poruszające się cząsteczki mogą osiągnąć powierzchnię dielektryku. Zobojętnienie cząsteczki na powierzchni dielektryku jest formą wyładowania. Zmiany temperatury układu izolacyjnego powodują zmiany lepkości syziwa, a wraz z nią zmienia się szybkość ruchu cząsteczek zanieczyszczeń. Zmniejszenie się całkowitej liczby wyładowań w tym początkowym okresie spowodowane jest samooczyszczaniem się oleju w procesie wyładowań. W czasie nagrzewania kabla następuje zwiększenie jego wymiarów geometrycznych, a wskutek różnic w wartościach współczynników rozszerzalności objętościowej jego elementów następuje zwiększenie ciśnienia wewnętrznego. Spowodowany tym ruch syziwa od żyły do powłoki w materiale porowato-kapilarnym jakim jest papier kablowy może spowodować powstanie wtrącin, w których zapoczątkowana zostaną procesy wyładowań niezupełnych. Wyładowania te powodują rozłożenie molekuł oleju z wydzieleniem gazu. Dalsze wyładowania więc są wyładowaniami przebiegającymi we wtrącinach gazowych. Hipotezę tę potwierdza, uzyskana w późniejszym okresie zależność liniowa pomiędzy całkowitą liczbą wyładowań, a różnicą temperatur żyła-powłoka [13]. Gwałtowny zanik wyładowań w okresie chłodzenia spowodowany jest zmianą ciśnienia w izolacji [14] i rozpuszczeniem się wtrącin gazowych.

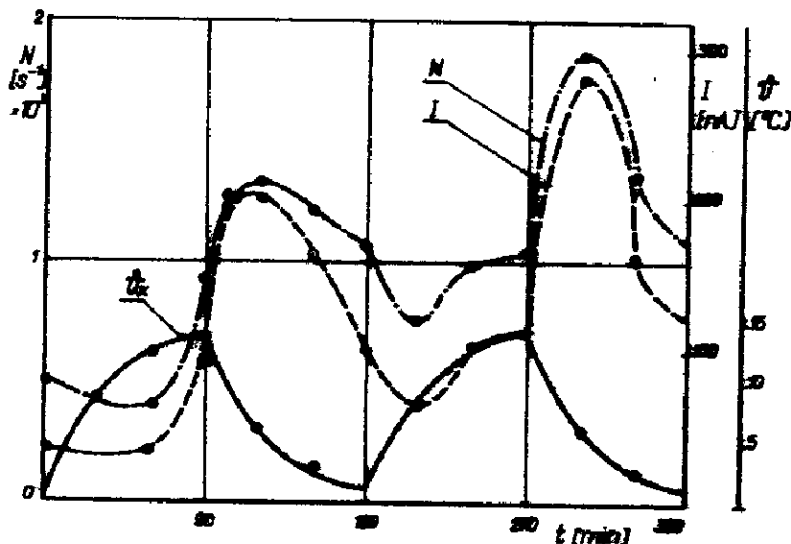
Przeprowadzone dalsze badania w cyklach nagrzewania (60 min) i chłodzenia (60 min) potwierdziły przedstawione wnioski. W każdym kolejnym cyklu nagrzewania powstają wyładowania o coraz mniejszej intensywności. W piątym cyklu badania w okresie nagrzewania, działanie temperatury nie spowodowało powstania wyładowań. Świadczy to o samoczyszczeniu układu izolacyjnego i potwierdza hipotezę [15], że wyładowania rozpoczynają się w warstwach dielektryku ciekłego, a dopiero później odbywają się w powstających wtrącinach gazowych.

Na drugim odcinku kabla tego samego typu tj. 3 HAK 20 kV, 120 mm², w którym do napięcia znamionowego międzyprzewodowego nie występują wyładowania niezupełne, wykonano sztuczne uszkodzenie przez wbicie w głąb izolacji przez powłokę ostrza stalowego. Stworzono w ten sposób w układzie izolacyjnym źródło intensywnych zlokalizowanych wyładowań niezupełnych. Badania przeprowadzone przy napięciu znamionowym międzyprzewodowym w funkcji czasu pozwoliły stwierdzić, że wywołane wyładowania są wyładowaniami rozwijającymi się. Właściwe badania pozwalające na określenie wpływu temperatury na zmiany intensywności wyładowań niezupełnych przeprowadzono przy napięciu znamionowym międzyprzewodowym tj. $U_N = 20$ kV i obciążeniu kabla prądem znamionowym kabla umieszczonego w powietrzu przy obciążeniu długotrwałym tj. $I_N = 160$ A. Czulość układu pomiarowego wynosiła 48 pC.

Badania przeprowadzono w cyklach nagrzewania (90 min) i chłodzenia (90 min) przy ciągle działającym napięciu. Początkowa całkowita liczba wyładowań wynosiła 508 s⁻¹, średni prąd wyładowań 37,8 nA, a ładunek pozorny pojedynczego wyładowania zawierał się w przedziale od 48 pC do 122 pC. Na rysunku 2 przedstawiono zależność całkowitej liczby wyładowań i średniego prądu wyładowań od czasu w pierwszych dwóch cyklach nagrzewania i chłodzenia.

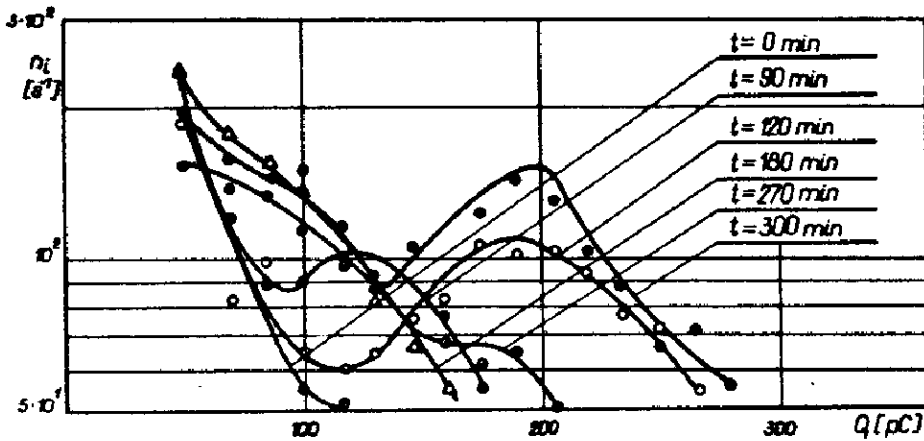
Na tym samym rysunku przedstawiono przebieg zależności temperatury w miejscu styku ostrza z taśmą papierową od czasu opisany zależnością

$$\vartheta_x(t) = 14,9 + 0,16 e^{-2,579t} + 0,06 e^{-0,611t} - 15,12 e^{-0,029t}$$



Rys. 2. Zależność całkowitej liczby wyładowań i średniego prądu wyładowań od czasu w pierwszych dwóch cyklach nagrzewania i chłodzenia. Kabel BHAK 20 kV, 120 mm^2 , $\vartheta_0 = 25^\circ\text{C}$, 0 - 90 min - nagrzewanie prądem $I_N = 160 \text{ A}$

Z wykresu widać brak zależności pomiędzy temperaturą, a wielkościami charakteryzującymi intensywność wyładowań. Początkowe zmniejszenie całkowitej liczby impulsów i średniego prądu wyładowań w okresie nagrzewania spowodowane jest oddziaływaniem syciwa na obszar wyładowań w pobliżu ostrza - kródkła. Poruszające się od żyły w kierunku powłoki syciwo oddziałuje na obszar wyładowań powodując zmniejszenie wyładowań ślizgowych po taśmach papierowych i jednocześnie zmiany ciśnienia we wtrącinie gazowej w pobliżu ostrza. Ponieważ układ izolacyjny jest układem odizolowanym od dostępu powietrza więc zmiana intensywności wyładowań związana jest ze zmianą własności fizyko-chemicznych we wtrącinie gazowej tj. ciśnienia i jego składu chemicznego. Wraz z ustaleniem się temperatury układu izolacyjnego następuje zmniejszenie oddziaływania syciwa i rozwój wyładowań. W okresie chłodzenia początkowy gwałtowny wzrost całkowitej liczby i średniego prądu wyładowań spowodowany jest zwężaniem wymiarów geometrycznych wtrąciny i powstaniem

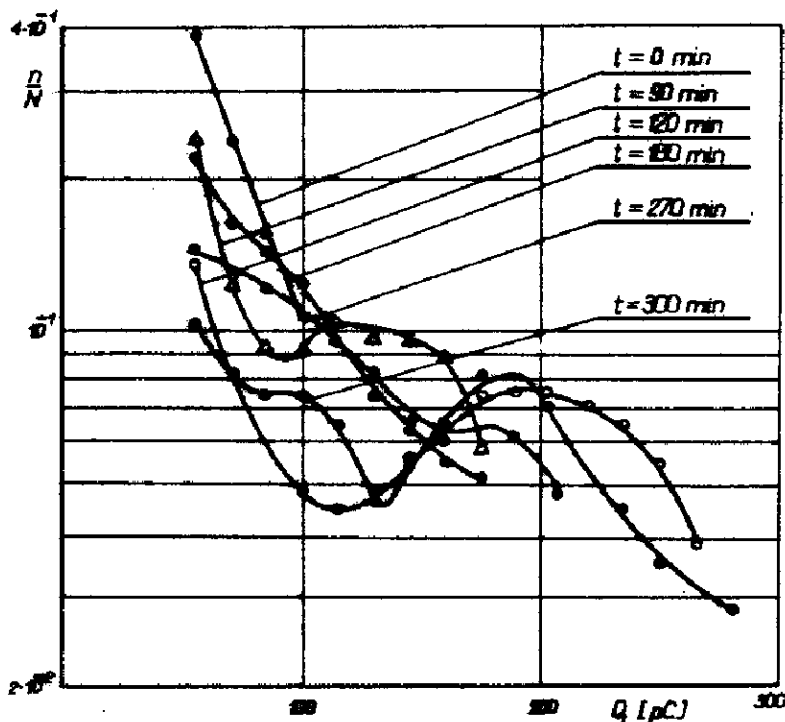


Rys. 3. Rozkład ładunków wyładowań w pierwszych dwóch cyklach nagrzewania i chłodzenia. Kabel BHAK 20 kV, 120 mm², 0 - 90 min nagrzewanie prądem $I_N = 160$ A

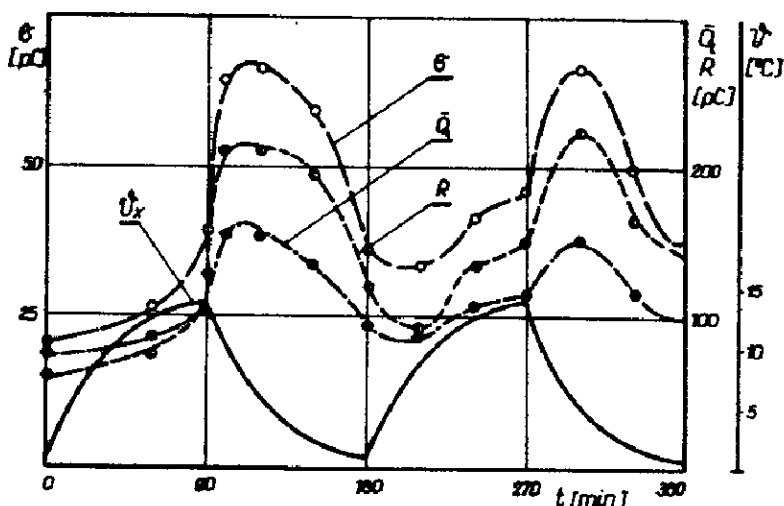
wyładowań ślizgowych po taśmach papierowych. W późniejszym okresie następuje zmniejszenie całkowitej liczby wyładowań i dążenie do ustalenia się jej na poziomie około dwukrotnie wyższym niż na początku próby. Na rysunku 3 przedstawiono rozkład ładunków impulsów wyładowań w pierwszym cyklu nagrzewania i chłodzenia, a na rysunku 4 odpowiadające im funkcje gęstości rozkładu ładunków.

Na podstawie rysunku 3 i 4 można stwierdzić, że w pierwszym okresie nagrzewania zmniejszenie całkowitej liczby wyładowań spowodowane jest zmniejszaniem się liczby wyładowań o najmniejszym ładunku przy jednoczesnym pojawianiu się wyładowań o coraz to większym ładunku. W tym początkowym okresie nagrzewania otrzymane rozkłady są rozkładami wykładniczymi (np. dla $t = 0$, $f(Q) = 0,77 e^{-0,77Q}$). Pod koniec okresu nagrzewania rozkład ładunków wyładowań posiada maksimum w zakresie dużych ładunków (125 pC). W okresie chłodzenia zwiększenie całkowitej liczby wyładowań spowodowane jest pojawieniem się impulsów wyładowań o coraz większym ładunku i wzrostem liczby ładunków o wartości ekstremalnej przy jednoczesnym zmniejszaniu liczby impulsów o małym ładunku. Równocześnie następuje przesunięcie wartości ekstremalnej w zakres większych

ładunków (190 pC). Świadczy to o powstaniu wokół ostrza dużej wtrąciny gazowej w której odbywają się wyładowania oraz o rozwoju wyładowań ślizgowych po taśmach papierowych. Otrzymane w tym okresie rozkłady nie są rozkładami wykładniczymi lecz kompozycją dwóch rozkładów: rozkładu wykładniczego i rozkładu normalnego niesymetrycznego. Potwierdza to hipotezę o działaniu w układzie izolacyjnym dwóch rodzajów wyładowań [15]. Wyładowania we wtrącinie gazowej powodują zmiany ciśnienia gazu i jego składu chemicznego, co powoduje z kolei zmianę intensywności wyładowań [16]. Drugim czynnikiem powodującą zmianę intensywności wyładowań jest poruszające się wskutek zmian temperatury syciwo.



Rys. 4. Funkcje gęstości rozkładu ładunków w pierwszych dwóch cyklach nagrzewania i chłodzenia. Kabel 3HAK 20 kV, 120 mm², 0 - 90 min - nagrzewanie prądem $I_{\text{g}} = 160$ A



Rys. 5. Zmiany wartości parametrów opisowych rozkładów impulsów w pierwszych dwóch cyklach nagrzewania i chłodzenia (rys. 4)

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi czasowe zmian wartości parametrów opisowych rozkładów impulsów: ładunku przeciętnego, odchylenia standardowego i rozstępu.

W kolejnych cyklach nagrzewania i chłodzenia następuje zwiększenie rozstępu, czyli ładunku maksymalnego wyładowań, a począwszy od czwartego cyklu zwiększenie również ładunku przeciętnego i odchylenia standardowego. W dziesiątym cyklu badania izolacja kabla została przebita. Przebicie nastąpiło w okresie chłodzenia.

4. Wnioski

Przedstawione wyniki badań wpływu temperatury na zmiany intensywności wyładowań niesupełnych w układach izolacyjnych kabli pozwalają na postawienie następujących wniosków:

1) jeżeli w izolacji kablowej po procesie technologicznym nie występują wyładowania to dopiero przekroczenie pewnej wartości temperatury powoduje ich powstanie. Powstałe wyładowania są wyładowaniami mało-intensywnymi i zanikającymi w okresie chłodzenia.

2) W przypadku działania w izolacji lokalnych źródeł wyładowań o dużej intensywności temperatura ma decydujący wpływ na ich rozwój. Rozwój ten jest szczególnie intensywny w okresie chłodzenia, w okresie nagrzewania następuje zmniejszenie intensywności wyładowań. Szybkość degradacji izolacji jest w tym przypadku uzależniona od miejsca położenia defektu oraz od długości czasu nagrzewania i chłodzenia.

3) Badanie zmian intensywności wyładowań w stanie cieplnie niestabilnym pozwala na uzyskanie dodatkowych informacji o jakości izolacji kablowej oraz pozwala prognozować o jej zachowaniu się w czasie eksploatacji. Można więc dokonywać badań poprawności założonych konstrukcyjnych i procesu technologicznego oraz badań eksploatacyjnych.

4) Przeprowadzone badania potwierdzają przedstawiony hipotetyczny mechanizm rozwoju wyładowań w warstwach olejowych z późniejszą powstaniem wakuł tych wyładowań wtrącin gazowych, w których przebiegają w dalszym ciągu wyładowania [14].

Literatura

1. Florowska B., Gacek R.: "Wpływ napięcia na intensywność wyładowań w izolacji kablowej". Sympozjum: Wyładowania niespełne jako czynnik destrukcji izolacji. Krościenko, wrzesień 1972.
2. Florowska B., Gacek R.: "O stabilności wyładowań niespełnych w izolacji papierowo-olejowej". Sympozjum: Wyładowania niespełne jako czynnik destrukcji izolacji. Krościenko, wrzesień 1972.
3. Grejsuch M., Kuczyński G.: "Dumano-malennaja izolacja w wysokowoltnych konstrukcjach". Gosenergoizdat, Moskwa 1963.
4. Klein H.: "Gas Field Cavities in Solid - Type Cables". Transactions AIEE 1960, April str. 77 - 87.
5. Barnes C.: "Power cables". Second Edition, 1966. Chapman and Hall Ltd London.
6. Florowska B., Gacek R., Władek R.: "Półautomatyczny zestaw aparatury do badań wyładowań niespełnych metodą analizy impulsów

Elektrotechnika - Biuletyn Informacyjny 1973, nr 4, str.
42 - 45.

7. Buse G.; "Ein einfaches Verfahren zum Bestimmen der dielektrischen Eigenschaften auf geheizter Kabel" ETZ-B, Bd 8, M7, 21.7. 1956, str. 275 - 279.
8. Grein J.: "Modele i zadania statystyki matematycznej". PWN Warszawa 1970.
9. Włodarski R.: "Obliczenia cieplne i hydrauliczne kabli olejowych". WPW Warszawa 1968.
10. Włodek R.: "Metoda obliczania przebiegów zmian temperatury w jednożyłowych kablach olejowych wysokiego napięcia". Praca doktorska, AGH Kraków 1964.
11. Halperin H.: "Load Ratings of Cable" Transactions AIEE 1939, October Vol. 58, s. 535 - 556.
12. Abed J., Fleszyński J., Lutyński B.: "Wpływ wody na wytrzymałość dielektryczną olejów izolacyjnych". Prace Naukowe IPEiE Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1970, seria: Studia i Materiały Nr 1.
13. Warżawskij D.S., Kałantar N.T.: "Wlijanie temperatury na bumażno-maslijanuju izolaciju pri uskorennyh ispytaniach na peremennom tokie". Elektrotechnika 1968, nr 3, str. 21-24.
14. Soffaux R.: "Mecanismes possibles de production des decharges partielles dans les associations dielectriques solides-liquides". Bull. Scient. A.I.H. Université de Liège, no 1, 1974.
15. Włodek R.: "Analiza wyładowań niezupełnych i jej zastosowanie do ich interpretacji w technicznych układach izolacyjnych". Zeszyty Naukowe AGH, Elektryfikacja i mechanizacja górnictwa i hutnictwa z. 61, Kraków 1974.
16. Florkowska B., Gacek R., Włodek R.: "Correlation between intensity of discharges and changes of gaseous medium during the investigation of insulating liquid". CIGRE Study Committee 15 Working Groupol, August 1974.