

Adam Rynkowski

**BADANIA INTENSYWNOŚCI WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH
W KABLACH O IZOLACJI POLIETYLENOWEJ**

1. Wstęp

Wprowadzone w ostatnich latach do produkcji i eksploatacji w Polsce kable wysokiego napięcia o izolacji polietylenowej mają zastąpić całkowicie kable tradycyjne średnich napięć. Szybko wzrastająca produkcja i udział tych kabli w energetyce zawodowej, brak informacji o wynikach badań w literaturze krajowej, nieznanomość zachowania się kabli w eksploatacji powoduje, że na temat kabli elektroenergetycznych o izolacji polietylenowej produkcji krajowej wyrażane są niejednokrotnie rozbieżne poglądy, wobec oczywistych ich zalet.

Duże zainteresowanie i kontrowersje budzą pomiary wyładowań niezupełnych w kablach z uwagi na rolę jaką odgrywają wyładowania w procesie degradacji własności izolacyjnych dielektryków. Zagadnieniom wpływu tych wyładowań na dielektryki poświęca się wiele uwagi, co znajduje odzwierciedlenie w bogatej literaturze zagranicznej i krajowej, ale ze szczególnym uwzględnieniem badań na małych próbkach samych materiałów izolacyjnych. Hipotezy dotyczące wpływu i zmian intensywności wyładowań określone na próbkach materiałów izolacyjnych

Mgr inż. Adam Rynkowski

Politechnika Gdańska

Instytut Wysokich Napięć i Aparatów

Elektrycznych

silną rzeczą przechodzą na ich interpretację przy badaniu układów izolacyjnych, gdzie nie ma ściśle określonego miejsca występowania i rodzaju wyładowań.

Jakościowe i ilościowe opisanie procesów wyładowań niezupełnych w kablu wymaga wielu badań oraz stosowania aparatury wybiegającej poza standardową, używaną w próbach fabrycznych, za pomocą której można stwierdzić istnienie lub brak wyładowań o określonej intensywności przy ustalonym napięciu. Aparatura oraz układy badawcze muszą spełniać szereg wymagań dotyczących czułości, wrażliwości na zakłócenia oraz ilość informacji możliwych do uzyskania z uwagi na brak jednoznacznego określenia, który z parametrów charakteryzujących wyładowanie niezupełne daje najlepszy obraz destrukcyjnego ich wpływu na układ izolacyjny.

Istotną trudnością opisu jest skomplikowany charakter zjawiska, które może obejmować różne formy wyładowań w układzie izolacyjnym. Mogą to być wyładowania przy zyle w warstwach granicznych między materiałem półprzewodzącym a izolacją, mogą to być wyładowania na-1 w samym materiale półprzewodzącym, wyładowania powierzchniowe, i wreszcie wyładowania we wtrącinach powietrznych lub innych wadach materiału izolacyjnego, a także wyładowania w głowicach, które są nieodłączną częścią układu jakim jest odcinek kabla.

Złożoność zjawisk powoduje fakt, że przebieg procesów wyładowań w kablu wysokonapięciowym zależy od narażeń elektrycznych, termicznych, chemicznych oraz mechanicznych, a także od wielu innych czynników technologiczno-eksploatacyjnych.

Zarys problemów przedstawiony wyżej wskazuje na konieczność prowadzenia intensywnych badań na kablach produkcji polskiej.

W Instytucie Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Gdańskiej przygotowano odpowiednie układy pomiarowe umożliwiające prowadzenie wszechstronnych badań wyładowań niezupełnych w kablach

o izolacji polietylenowej.

Badania te mają na celu m.in. określenie wpływu narzężeń na przebieg procesów wyładowań niesupełnych oraz ich jakościowy i ilościowy opis, określenie użyteczności pomiarów wyładowań niesupełnych w kablach dotychczasowej produkcji i wyjaśnienie przyczyn wpływających na przebieg charakterystyk wyładowań niesupełnych.

Niniejszy artykuł otwiera serię publikacji rozwiązujących przedstawione problemy.

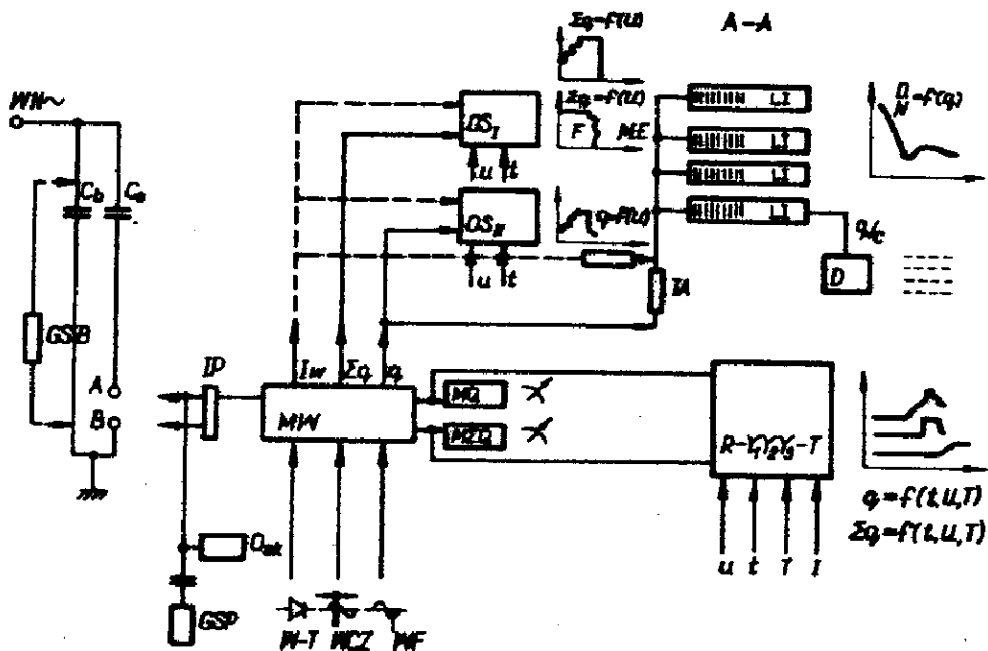
2. Układ pomiarowy

Opracowany i zbudowany zautomatyzowany układ do pomiaru wyładowań niesupełnych w kablach przy napięciu przemiennym spełnia wymagania PN-70/E-04066.

Układ umożliwia: identyfikację rodzaju wyładowań niesupełnych, pomiar ładunku maksymalnego, sumy ładunków i prądu średniego wyładowań, pomiar energii - mocy wyładowań, pomiar częstotliwości i wielokanałową analizę amplitudy wyładowań, przy czułości 0,1 pC w dowolnie wybranym przedziale okresu napięcia przemiennego.

Układ automatycznie i jednocześnie rejestruje przebieg ładunku maksymalnego, sumy ładunków, częstotliwości lub ilości wyładowań w funkcji napięcia, czasu i temperatury.

Układ skalowany może być metodą pośrednią lub bezpośrednią i jest przystosowany do pracy w układzie prostym i mostkowym. Uproszczony schemat blokowy i funkcyjny układu podano na rys.1.



Rys. 1 Uproszczony schemat blokowy i funkcyjny układu pomiarowego wyładowań niespełnych

GSB - generator skalujący /met. bezpośrednia/,
 C_b - obiekt badany; C_s - kondensator sprzęgający;
 GSP - generator skalujący /met. pośrednia/;
 IP - impedancja pomiarowa; MW - miernik wyładowań;
 /W-T - tłumienia, W-CZ - wybór czasu pomiaru;
 W-F - wybór fazy początkowej pomiaru; I_w - impulsy
 wyzwalające; Σq - suma ładunków; q - ładunki
 maksymalne/; OS_I - oscyloskop z przystawką foto-
 graficzną do pomiaru q i identyfikacji wyładowań;
 A-A - analizator amplitudy wyładowań /TA - tłumik
 analizatora, LI - licznik impulsów, D - drukarka/;
 R-Y₁Y₂Y₃-T - rejestrator samopiszący; u - napięcie
 probiercze; t - czas; T - temperatura; I - prąd
 obciążenia.

3. Układ probierczy

Opracowane stanowisko probiercze umożliwia prowadzenie prób kabli przy jednoczesnym lub osobnym działaniu napięcia przemiennego 50 Hz do 55 kV, napięcia udarowego do \pm 250 kV, obciążenia żył roboczych i powrotnych do 300°C oraz jednoczesnym prowadzeniu pomiarów wyładowań niezupełnych przy średnich natężeniach pola w kablach do 12 kV /mm przy czułości \leq 0,4 pC.

Zautomatyzowany układ probierczy napięcia przemiennego 50 Hz jest wolny od wyładowań niezupełnych do 55 kV przy czułości \leq 0,1 pC.

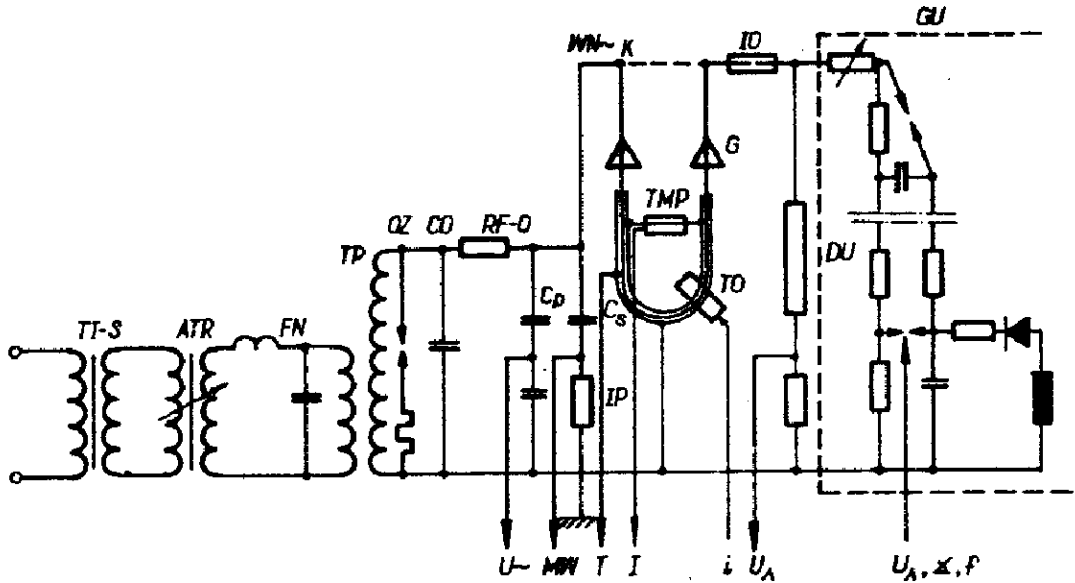
Układ probierczy napięcia udarowego umożliwia prowadzenie prób kabli napięciem udarowym do 350 kV, o różnych kształtach i na obiektach o różnej pojemności, podawanym w wybranych odstępach czasu i fazach napięcia przemiennego. Przebiegi rejestrowane są automatycznie na dwustrumieniowym oscylografie.

Układ prądowy składa się ze specjalnie zbudowanych transformatorów /10 kVA/, sterowanych ręcznie lub z nastawnika. Zestaw umożliwia jednoczesne lub osobne obciążanie żył roboczych i powrotnych kabli.

Uproszczony schemat stanowiska probierczego do pomiaru wyładowań niezupełnych w układzie syntetycznym pokazano na rys.2.

4. Opis badań

Badania przeprowadzono na odcinkach kabli typu YHAKx i YHdAKx pochodzących z produkcji w r.1972, 1973 i 1974 o przekrojach żył roboczych 50,70 i 120 mm² przebadano łącznie ok. 380 m odcinków kabli. Z każdego rodzaju kabla o długości 60 mb badano co najmniej 15 odcinków o łącznej długości pomiarowej 26,25m.



Rys. 2 Uproszczony schemat stanowiska probierczego do pomiaru wyladowań niezupełnych w układzie syntetycznym

TI-S - transformator izolacyjny - stabilizator, ATR - zautomatyzowany transformator regulacyjny, FN - filtr niskonapięciowy, TP - transformator probierczy, OZ - odgromnik zaworowy, CO - kondensator ochronny, RF-O - opornik filtrująco-ochronny, Cp - kondensator pomiarowy, Cs - kondensator sprzęgający, IP - impedancja pomiarowa wyladowań, K - kabel, G - głowica bezzakłóceńowa, TO - transformator obciążeniowy, TMP - transformator mierniczy prądowy, IO - iskiernik odcinający, DU - dzielnik napięcia udarowego, GU - generator udarów.

Odcinek kabla o długości pomiarowej 1750 mm zakończano głowicami bezzakłóceniovymi, w zestawie przewidzianym do prób przy napięciach probierczych 90 kV 50 Hz i 250 kV 1,2/50 μ s. Po umieszczeniu odcinka kabla na stanowisku probierczym skalowano układ metodą pośrednią przy czułości 4 pC uzyskując możliwość pomiaru przy czułościach od 0,4 pC w sekwencji 10 dB, do 400 pC. Inne czułości ustawiane były w zależności od potrzeby badań. Po ustawieniu czułości układu zdejmowano charakterystykę ładunku maksymalnego $q_{max} = f/U$ i charakterystykę prądu średniego w funkcji napięcia $I=f/U$ w półokresach i w całym okresie napięcia przemiennego, do napięcia 21,6 kV. Jednocześnie obserwowano obraz wyładowań niezupełnych na ekranie oscyloskopu, sprawdzając miejsce występowania wyładowań na krzywej napięcia probierczego.

Po wykonaniu charakterystyk $q_{max} = f/U$ i $I=f/U$ określano rozkład ładunku pozornego, w odcinkach kabla, w funkcji napięcia /10,8, 14,5, 18 i 21,6 kV/ metodą analizy amplitudowej od 4 pC.

W ten sposób opisany odcinek kabla poddawano dalszym próbom i badaniom. Opis ten traktowano jako tzw. pierwotny.

4.1. Wpływ napięcia przemiennego na wielkości charakteryzujące wyładowania niezupełne

Badania wstępne wszystkich odcinków kabla typu YHAKx i YHdAKx 15 kV pochodzące z produkcji lat 1972-1974 wykazały, że obraz wyładowań niezupełnych nałożony na krzywą napięcia probierczego jest dla wszystkich kabli podobny. Porównanie go z przykładowymi obrazami charakterystycznymi dla określonego rodzaju wyładowań, wskazuje na istnienie wyładowań wewnętrznych.

Charakter zmian ładunku maksymalnego pojedynczego wyładowania w funkcji napięcia, rejestrowany powyżej napięcia progu wyładowań przy określonej czułości, był podobny dla wszystkich typów kabla. Ładunek ten rósł do pewnego napięcia, a przy wyższych napięciach utrzymywał się na osiągniętym poziomie lub nieznacznie wzrastał. Zmiana ładunku, wartość ustalająca się, była tak jak napięcie zapłonu, charakterystyczna dla odcinków z jednej partii. Charakterystyczną była też wartość napięcia, przy którym ładunek maksymalny ustalał się na pewnym poziomie.

Przykładowo dla jednej partii kabla typu YHAKx 1x120mm, której średnia wartość napięcia progu wynosiła 7,66 kV przy czułości 4 pC, ładunek maksymalny wzrastał do napięcia 14 kV po czym ustalał się na średniej wartości równej 120 pC. Dla innej partii kabli typu YHdAKx 1 x 70 , której wartość średnia napięcia progu wynosiła 14 kV przy czułości 4 pC, mniej więcej równomierny przyrost ładunku maksymalnego następował do napięcia 18 kV, a wartość ładunku ustalonego wynosiła 35 pC.

Wartość ładunku maksymalnego, we wszystkich typach kabli, mierzona przy napięciu 21,6 kV zawierała się w granicach od 20 pC do 220 pC.

Napięcie progu, wielkość określająca jakość kabla w badaniach fabrycznych, było charakterystyczne dla odcinków z określonych partii i tak na przykład dla odcinków kabli typu YHAKx 1x50 pochodzących z produkcji w 1972 r. średnie napięcie progu przy czułości 4 pC było równe 9,71 kV przy odchyleniu standardowym 0,64 kV, a przy czułości 40 pC 10,99 kV i $\sigma = 0,89$ kV, a dla kabli YHAKx 1 x 120 napięcie progu przy 4 pC było równe 6,43 kV przy $\sigma = 0,64$ a przy 40 pC $U_g = 8,06$ kV i $\sigma = 0,18$ kV. Inne partie charakteryzowały się średnimi od 4,8 kV do 12 kV przy czułości 4 pC i 7,2 kV do 21,6 przy czułości 40 pC przy czym wartość modalna była rzędu 11,5 kV.

Partia kabli, z której odcinki charakteryzowały się napięciem progu większym od 21,6 kV przy czułości 40 pC pochodziła z produkcji w roku 1974 jednak /w przekroju miała drobne pęcherzyki/ średnie napięcie progu wyładowań przy czułości 4 pC wynosiło 11,82 kV przy odchyleniu standardowym 1,37 kV.

Prąd średni wyładowań w miarę zwiększenia napięcia powyżej napięcia zapłonu wyładowań wzrastał mniej więcej jednostajnie. Było to typowe dla wszystkich przebadanych odcinków do napięcia 21,6 kV, a także dla przebadanych do napięcia 35 kV. Taki sam charakter miały zmiany mierzone w półokresach napięcia probierczego.

Prędkość zmian oraz wartości prądu średniego były wyraźnie uzależnione od czułości pomiarowej i charakterystyczne dla badanych odcinków z jednej partii, przy czym rozrzut wyników był większy aniżeli przy badaniach napięcia progu wyładowań czy ładunku maksymalnego. Np. prąd średni wyładowań dla kabli typu YHAKx 1 x 120 wahał się w granicach 0,95 $\mu\text{C}/\text{sek}$ do 2,5 $\mu\text{C}/\text{sek}$ przy napięciu 21,6 kV.

Pod wpływem napięcia probierczego zmieniającego się od napięcia progu wyładowań do napięcia 21,6 kV lub 35 kV następował rozwój wyładowań w badanych odcinkach kabla .

Liczba wyładowań o danym ładunku n $\left[n_1 = f/U/ , Q_1 = \text{const} \right]$ wzrastała, przy czym wzrost ten był nierównomierny - w pewnym zakresie napięć wielokrotny a w następnym nieznaczny i np. dla odcinków kabli typu YHAKx 1x 120 wzrost prawie 10-krotny występował w granicach 10,8 kV do 14,5 kV , a 11-krotny w granicach od 14,5 do 21,6 kV największy przyrost liczby ładunków występował w zakresie małych ładunków /8,16, 24 pC/. Liczba ładunków maksymalnych nie przekraczała 2.

Zakres ładunków maksymalnych zwiększał się wraz ze wzrostem napięcia przy czym wzrost ten był największy do 4-6 kV powyżej napięcia progu wyładowań i tak np. dla kabla typu YHAKx 1x120 wzrost od 8 pC do 80 pC przypadał w granicach 9-14,5 kV a 80-95 pC od 14,5 do

21,6 kV.

Rozkłady gęstości liczby ładunków $\frac{n_1}{N} = f/Q_1/$ jak i rozkłady gęstości ładunków $\frac{n_1 \cdot Q_1}{\sum Q_1 \cdot n_1} = f/Q_1/$ są dla przebadanych kabli podobne pod

względem kształtu.

Największa liczba wyładowań przypada na ładunki małe, które stanowią około 80-90% całkowitej liczby wyładowań, natomiast całkowity ładunek przenoszony przez ładunki małe stanowi 30 - 20% całkowitego ładunku przenieszonego przez wszystkie wyładowania. Udział liczby jak i ładunku przenieszonego przez ładunki małe maleje ze wzrostem napięcia.

Wykresy dystrybuant empirycznych otrzymanych w wyniku obliczeń częstości skumulowanej

$$\frac{\sum_{k=1}^{k_1} n_k}{N} = f/Q_1/ , \quad \frac{\sum_{k=1}^{k_1} Q_k \cdot n_k}{Q_c} =$$

$= f/Q_1/$ ujawniły, np. dla kabli YHAKx 1x120 istnienie dwóch zakresów zmienności liczby i ładunku całkowitego od ładunku, przy czym w drugim zakresie przyrost ten jest mniejszy. Zakresy te występują przy napięciach np. 18 kV i 21,6 kV, a nie występują przy napięciu 10,8 kV.

Ładunek całkowity Q_c , wartość średnia ładunku \bar{Q} , odchylenie standardowe σ , ładunek maksymalny q_{max} oraz całkowita liczba wyładowań N mierzona w okresie napięcia probierczego dla odcinka wymienionego kabla wynosily odpowiednio

U	Q_c	\bar{Q}	σ	q_{max}	N
kV	pC	pC	pC	pC	$50.s^{-1}$
10,8	551	9,7	5	25	50
14,5	5238	13,4	10,5	82	327
18,0	8909	15,5	11,6	95	576
21,6	9919	16,9	12,9	95	588

4.2. Wpływ czasu działania napięcia na przebieg charakterystyk wyładowań niezupełnych

Stałą miarą zmienności był ładunek maksymalny oraz suma ładunków i całkowita liczba wyładowań przekraczających określoną czułość pomiaru - mierzona w okresie lub półokresie napięcia probierczego. Okresowo zdejmowano rozkład wyładowań przy napięciu probierczym oraz charakterystyki $q_{\max} = f/U$ i $I = f/U$ i rozkłady w funkcji napięcia. Wartości tych wielkości porównywano z opisem pierwotnym odcinka. Badania wykazały, że działaniu napięcia w czasie towarzyszą zmiany wielkości charakteryzujących wyładowania niezupełne. Ogólnie następowało zanikanie zjawiska wyładowań i ustalanie się wartości wielkości poddanych pomiarom. Czas zanikania oraz wartości ustalone uzależnione były od wartości napięcia i rodzaju kabla. Zmiany szczególnie były widoczne na przebiegu prądu średniego i liczby wyładowań. Zmiany ładunku maksymalnego następowały wolniej i uzależnione były od typu kabli, wartości początkowej ładunku jak i napięcia probierczego.

Np. dla odcinków kabli typu YHAKx 1x120 prąd średni wyładowań przy napięciu 21,6 kV zmieniał się od 1,5 $\mu\text{C}/\text{sek}$ do 0,7 $\mu\text{C}/\text{s}$ w czasie 1 h 40' i ustalił się na tym poziomie, liczba ładunków powyżej 12 pC malała od 310 do 139, ładunek maksymalny od 130 pC do 110 pC, a ładunek średni od 23 pC przy $\bar{G} = 13,4$ pC do 21 pC i $\bar{G} = 12,3$ pC. Przy napięciu probierczym 35 kV prąd średni od 3 $\mu\text{C}/\text{s}$ do 0,5 $\mu\text{C}/\text{s}$ zmienił się w czasie 45 minut, liczba ładunków N od 423 do 278, ładunek maksymalny q_{\max} od 145 pC do 140 pC, a ładunek średni od 17,8 pC przy $\bar{G} = 16,4$ pC do 17,6 pC i $\bar{G} = 16,4$ pC. Przy napięciu probierczym 10,8 kV prąd średni od 0,1 $\mu\text{C}/\text{s}$ do 0,06 $\mu\text{C}/\text{s}$ w czasie 3 h, liczba ładunków od 7 do 2 i ładunek maksymalny od 38 pC do 25 pC, a ładunek średni od 19,7 przy $\bar{G} = 12,4$ do 16,16 i $\bar{G} = 2,24$

W innym przypadku dla odcinka kabla YHAAKx 1x50 przy napięciu 21,6 kV prąd średni zmienił się od 0,8 $\mu\text{C/s}$ do 0,2 $\mu\text{C/s}$ w czasie 1 h 40', liczba ładunków zmalała od 180 do 28 pC i ładunek maksymalny od 65 do 37 pC, a ładunek średni od 17,96 przy $\bar{G} = 6,7$ pC do 18 pC i $\bar{G} = 5,8$ pC.

Okresowo odejmowane charakterystyki wyładowań w funkcji napięcia wykazywały zmiany napięcia proggu wyładowań oraz ładunku maksymalnego i prądu średniego w funkcji napięcia. Zmiany te charakteryzowały się zwiększeniem napięcia proggu wyładowań, zmniejszeniem się ładunku maksymalnego i prądu średniego mierzonego przy określonych napięciach. Prędkość zmian jak i wartości ustalone uzależnione były od napięcia probierczego i tak np. dla odcinków kabli typu YHAAKx 1x120 napięcie kapłonu zmierzone przy czułości 40 pC podczas próby napięciem probierczym $U_p = 10,8$ kV wzrosło od 10 kV do 10,8 napięciem $U_p = 21,6$ kV - od 10 kV do 12,9 kV i napięciem $U_p = 35$ kV - od 11,2 do 13,5 kV w ciągu 1 godziny działania napięcia, zmiany te przy wyższych czułościach były stosunkowo większe dla większych napięć probierczych, np. przy $U_p = 35$ kV zmiana proggu wyładowań przy czułości 4 pC wynosiła 1,47 przy 12 pC 1,26, a 40 pC - 1,2 przy $U_{pr} = 10,8$ kV odpowiednio 1,09; 1,08; 1,03.

Ładunki maksymalne zmierzone przy napięciach 10,8; 14,5; 18 i 21,6 kV malały z upływem czasu, przy czym główne zmiany dotyczyły ładunków zmierzonych przy napięciu 10,8 kV i tutaj było widać wyraźny wpływ wielkości napięcia probierczego jakiemu był poddany kabel i tak np. przy $U_{pr} = 10,8$ kV ładunek po 3 godzinach działania napięcia zmalał od 43 do 39 pC przy $U_{pr} = 21,6$ kV od 65 do 9,5 pC przy 35 kV od 60 do 4 pC przy czym wartości te zostały mniej więcej ustalone dla 10,8 kV w czasie całej próby, dla 21,6 kV po 2 h, a dla 35 kV po 1 godz.

Prąd średni wyładowań w funkcji napięcia mierzony okresowo podczas próby malał z upływem czasu, przy czym zmiany te były najbardziej widoczne

ne podczas 1 godziny przyłożenia napięcia zmiany te następowały tym szybciej im większe było napięcie probiercze i tak np. prąd średni zmierzony przy napięciu 21,6 kV po 1 godzinie działania napięcia 35 kV zmniejszył się 4,75 razy, napięcia 21,6 kV - 2,5 raza, a napięcia 10,8 kV w zasadzie nie uległ zmianie.

Ogólnie czas ustalania się wielkości charakteryzujących wyładowanie niespełne nie przekraczał 4 godzin podczas działania napięcia w granicach od 10,8 kV do 35 kV, a głównie zmiany zachodziły w czasie do 2 godzin.

4.3. Wpływ cyklicznego działania napięcia przemiennego

Odcinki kabla poddane działaniu napięcia w ustalonych cyklach wykazywały zmiany intensywności wyładowań niespełnych. Zmiany te charakteryzowały się powrotem do wartości początkowej po chwilowej przerwie beznapięciowej, przy czym im krótsze było działanie napięcia tym krótszy powrót do stanu początkowego. Wydłużenie czasu działania napięcia i przerwy beznapięciowej w cyklu - np. do 12 godzin powodowało stopniowe polepszenie się wartości wielkości charakteryzujących wyładowanie. Po kilku cyklach obserwowano tendencje do ustalania się charakterystyk pomiarowych. Na przykład odcinek kabla poddany działaniu napięcia o $U_p = 21,6$ kV w cyklu 12 godzin napięcia i 12 godzin przerwy beznapięciowej, charakteryzował na początku tego cyklu ładunkiem maksymalnym 41 pC na początku drugiego 35 pC trzeciego 29 pC i dalej 27 pC i 26 pC przy czym wartości ustalone przy końcu cykli wynosiły odpowiednio 22,5 pC, 21 pC, 21 pC. Czasy ustalania się w początkowych cyklach wynosiły ok. 1 godz. 30'a w następnych rzędu 50 minut. Stosunkowe zmiany prądu średniego na początku cykli były równe odpowiednio 0,53; 0,20; 0,17 po czym utrzymywały się na osiągniętym poziomie nawet po dwutygodniowej przerwie beznapięciowej, co stwierdzono na

jednym z odcinków kabla YHdAKx 1x50.

4.4. Wpływ obciążenia prądem

Odcinki kabla, których wartości charakteryzujące wyładowania niezupełne ustaliły się pod wpływem działania napięcia, obciążano prądem w granicach od 0,8 do 1,3 prądu znamionowego. Podczas próby obciążania rejestrowano zmiany ładunku maksymalnego i prądu średniego wyładowań i okresowo mierzono napięcie progu wyładowań. Badania wykazały, że intensywność wyładowań niezupełnych maleje wraz ze wzrostem obciążenia. Prędkość zmian i wartości ustalone uzależnione są od wartości prądu obciążenia. Zmianie ulegają zarówno ładunek maksymalny q jak i prąd średni oraz liczba wyładowań N . Znacznemu zwiększeniu ulega napięcie progu wyładowań. W wielu przypadkach przy obciążeniu odcinka kabla prądem 1,3 I_n napięcie progu wyładowań było większe od 21,6 kV przy czułości 40 pC po czasie 30 minut od chwili włączenia obciążenia.

Wyłączenie obciążenia powodowało powrót wielkości charakteryzujących wyładowanie do poziomu osiągniętego przed włączeniem obciążenia. Charakter tych zmian był proporcjonalny do krzywych nagrzewania i stygnięcia kabli. Stałe czasowe dla tego zakresu prądu znamionowego były rzędu 30 minut i największe zmiany wpływu obciążenia obserwowano w tych samych czasach.

Przykładowo dla kabli typu YHdAKx 1x50 włączenie prądu znamionowego spowodowało zmniejszenie się ładunku maksymalnego od 37 pC do 10 pC, prądu średniego od 0,25 $\mu\text{C/s}$ do mniej jak 0,02 $\mu\text{C/s}$ i zwiększenie progu wyładowań od 13,1 do 18 kV przy czułości 4 pC w czasie 25 minut.

Dla odcinków kabla typu YHAKx 1x120 charakteryzujących się znacznie gorszymi parametrami wyładowań nastąpiło zmniejszenie ładunku maksymalnego od 130 pC do 11 pC przy napięciu 21,6 kV, prądu średniego od 0,9 $\mu\text{C/s}$ do mniej od 0,06 $\mu\text{C/s}$, a napięcie progu wyładowań

wzrosło od 8,6 kV do 20,7 kV przy całości 4 pC.

Poddanie kabli działaniu cyklicznego obciążenia prądem znamionowym w ciągu 24 godzin w cyklu 3 godz. obciążenia - 3 godziny przerwy, wykazało, że wartość wielkości charakteryzujących wyładowania ulegały odpowiednio zanikaniu i powrotowi do wartości ustalonych pod wpływem napięcia.

5. Zakończenie

Badania kabli o izolacji polietylenowej produkowanych w latach 1972-1973 wykazały złożoność zjawisk towarzyszących pomiarom wyładowań niezupełnych. Wyładowania niezupełne w tych kablach są procesem dynamicznym, tak pod działaniem napięcia jak i obciążenia prądem.

Szczególnie ważne jest to, że wartości wielkości charakteryzujących wyładowania niezupełne ulegają zmianom prowadzącym nawet do zaniku wyładowań pod wpływem napięcia i obciążenia prądem.

Występowanie tych procesów utrudnia właściwą ocenę kabli tak w produkcji jak i w eksploatacji. Informacje uzyskane o zjawiskach wyładowań na podstawie pomiarów nie charakteryzują kabli w sposób jednoznaczny tak w czasie jak i w porównaniu z charakterystykami pierwotnymi na podstawie których kabel został dopuszczony /lub nie/ do eksploatacji.

Dalsze badania powinny wyjaśnić przyczyny występowania wyładowań niezupełnych w kablach dotychczasowej produkcji.