

Eugeniusz Wasilenko  
Henryk Boryń  
Stanisław Wojtas

## WPLYW ZEWNĘTRZNYCH WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH NA ŻYWOTNOŚĆ KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH O IZOLACJI POLIETYLENOWEJ

### 1. Wstęp

Problem zagrożenia izolacji polietylenowej kabli przez wyładowania niezupełne jest badany od wielu lat. Uważa się, że wyładowania niezupełne występujące wewnątrz izolacji, na granicy niejednorodności, są przyczyną stopniowej degradacji polietylenu i prowadzą do przebicia izolacji przy doraźnej lub długotrwałej próbie napięciowej. Odpowiedzialny za przebicie jest zwykle mechanizm drzewieniowy, wywołany lokalnym wzrostem natężenia pola elektrycznego wewnątrz izolacji, wskutek istnienia wtrąciny przewodzącej lub zjonizowanego pęcherzyka gazowego.

Natomiast działanie wyładowań niezupełnych, występujących na zewnątrz izolacji kabla, np. w szczelinach powietrznych między warstwami ekranującymi, nie jest dostatecznie wyjaśnione. Wyładowania te, niekiedy dość intensywne, powstają głównie w kablach z ekranem zewnętrznym wykonanym z półprzewodzącej taśmy papierowej lub tkaniny, nałożonej na pografitowaną izolację polietylenową. Przeprowadzone wcześniej badania długotrwałej wytrzymałości elektrycznej izolacji

---

Doc.dr inż. Eugeniusz Wasilenko, mgr inż. Henryk Boryń, mgr inż. Stanisław Wojtas, Politechnika Gdańska - Instytut Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych.

kabli krajowych z wprowadzonymi różnymi wadami [2] wykazały, że przy napięciu przemiennym 90 kV ( $E_{gr} = 20 \text{ kV/mm}$ ), temperaturze izolacji ok.  $20^\circ\text{C}$  i czasach ekspozycji do 200 godzin uzyskiwano przebicia w miejscach leżących poza obszarem intensywnych wyładowań niezupełnych, występujących na zewnątrz izolacji kabla. Wybór wielkości napięcia probierczego w tych badaniach wynikał z innych przesłanek i dlatego czas około 200 godzin może być niewystarczający do obniżenia wytrzymałości izolacji w miejscu występowania zewnętrznych wyładowań niezupełnych.

Celem niniejszej pracy jest weryfikacja wniosków w sprawie wpływu zewnętrznych wyładowań niezupełnych na wytrzymałość długotrwałą izolacji polietylenowej krajowych kabli elektroenergetycznych wysokiego napięcia.

## 2. Metodyka badań

Badania przeprowadzono na odcinkach kabla typu YHdAKX 15 kV o przekroju  $120 \text{ mm}^2$ , wyprodukowanego w Bydgoskiej Fabryce Kabli w 1977 r. Zewnętrzna powierzchnia izolacji polietylenowej jest pografitowana i owinięta półprzewodzącą taśmą tekstylną. Żyłę powrotną składa się z 18 drutów miedzianych, ułożonych spiralnie na taśmie tekstylnej i z jednego obwoju taśmy miedzianej łączącej druty między sobą. Druty są ułożone z odstępem ok. 4 mm wzdłuż obwodu zewnętrznego izolacji.

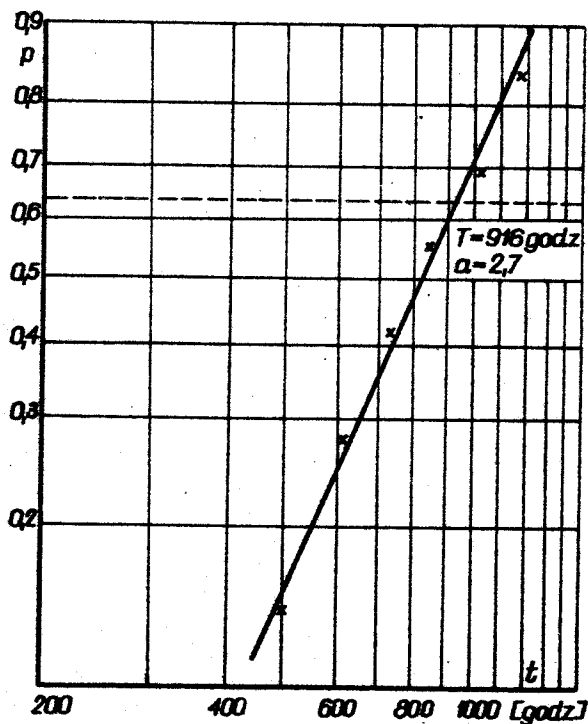
Odcinki kabla o długości pomiarowej około 4,75 m zakończono laboratoryjnymi głowicami, wolnymi od wyładowań do napięcia 36 kV, przy czułości pomiarowej 0,4 pC [3]. Próbkę kabli użyte do badań miały napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych ok. 14 kV, przy czułości pomiarowej 4 pC, a maksymalny ładunek pozorny, mierzony przy napięciu probierczym 21,6 kV, wynosił ok. 28 pC, co odpowiadało wymaganiom normy zakładowej [1].

Próbki kabla poddano długotrwałemu działaniu napięcia przemiennego  $U_p = 4 U_o = 34,6 \text{ kV}$  /średnie naprężenie w izolacji  $7,6 \text{ kV/mm}$  /

z cyklicznym 6-godzinnym nagrzewaniem żył kabla do  $70^{\circ}\text{C}$  i następującym po nim 6-godzinnym cyklem chłodzenia do temperatury otoczenia, wynoszącej ok.  $20^{\circ}\text{C}$ . W trakcie próby długotrwałej dokonywano okresowych pomiarów napięcia zapłonu i ładunku maksymalnego wyładowań niezupełnych.

### 3. Wyniki badań

Wybrano napięcie probiercze 34,6 kV, które doprowadziło do przebicia próbek w przedziale czasowym 500 - 1000 godz. Rysunek 1 przedstawia dystrybuantę rozkładu Weibulla czasów do przebicia sześciu badanych próbek kabla. Parametr skali wynosi 916 godzin, a współczynnik



Rys. 1. Rozkład czasów do przebicia odcinków kabla typu YHdAKX 15 kV  $1 \times 120 \text{ mm}^2$  w próbie długotrwałej przy średnim napięciu w izolacji 7,6 kV/mm

kształtu krzywej  $a = 2,7$ . Wszystkie przebicia wystąpiły podczas cyklu chłodzenia, po osiągnięciu przez kabel temperatury bliskiej otoczeniu, tj. w czasie, gdy wyładowania niezupełne w zewnętrznych warstwach ekranujących zwiększają swoją intensywność, wskutek wzrostu wielkości szczelin powietrznych.

W czasie badań obserwowano stopniowe obniżanie się progów wyładowań niezupełnych i wzrost ładunku maksymalnego. Na przykład mierzone przy czułości 4 pC napięcie zapłonu wyładowań zmniejszyło się od 14 kV do 6 kV, a ładunek maksymalny wzrósł od 28 pC do 412 pC przy napięciu 21,6 kV.

Zarówno duży współczynnik kształtu krzywej  $a = 2,7$ , jak i znaczne zmiany parametrów wyładowań niezupełnych, wskazują na rozwój procesu degradacji początkowych własności dielektrycznych kabla, doprowadzające ostatecznie do przebicia izolacji. Wnikliwe oględziny miejsc przebicia izolacji w pełni potwierdzają ten wniosek. Po odpowiednio długim czasie działania zewnętrznych wyładowań niezupełnych następuje usuwanie warstwy grafitu z powierzchni izolacji i uszkodzenie taśmy tekstylnej, która jest poprzerywana w licznych miejscach. Przykład takich uszkodzeń powłok półprzewodzących przedstawia rysunek 2. Na destrukcyjne działanie wyładowań niezupełnych są szczególnie narażone miejsca między drutami miedzianymi żyły powrotnej, gdzie jest stosunkowo słaby docisk tkaniny do pografitowanej powierzchni izolacji. W tych miejscach rośnie intensywność wyładowań niezupełnych, które występują na odsłoniętej powierzchni polietylenu i prowadzą do stopniowej erozji powierzchniowej.

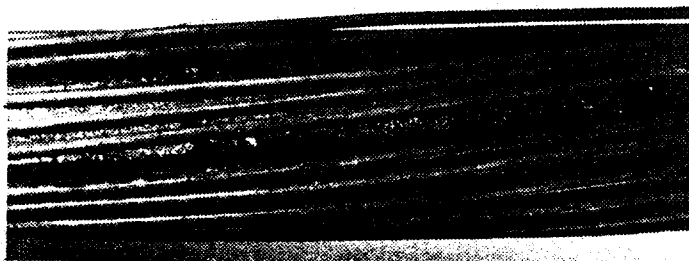
Rysunek 3 przedstawia skutki erozyjnego działania wyładowań niezupełnych na powierzchni polietylenu. Tworzące się kratery o kształcie wydłużonej wnęki gazowej przy dalszym działaniu napięcia probierczego przechodzą w kanał przebicia. Jak wykazały oględziny, miejsca przebicia wszystkich kabli znajdują się w obszarze erozji powierzchniowej, co świadczy o występowaniu erozyjnego mechanizmu przebicia [4].



a

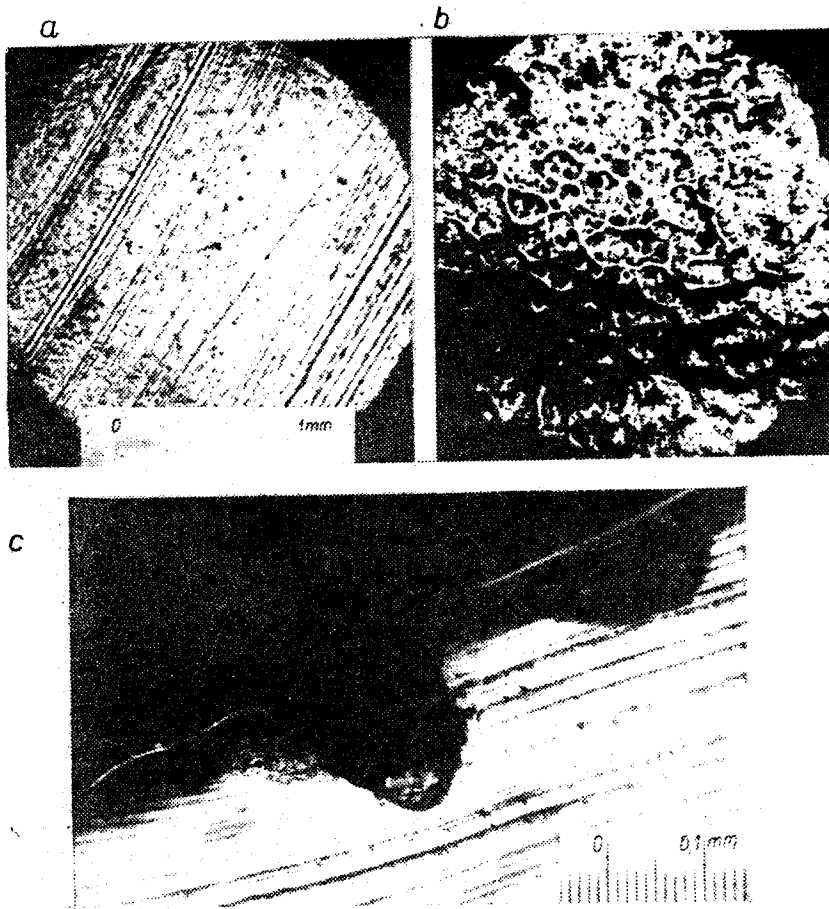


b



c

Rys.2. Uszkodzenie powłok półprzewodzących kabla YHdAKX 15 kV  $1 \times 120 \text{ mm}^2$  w próbie długotrwałej: a - grafitowana powierzchnia izolacji, b, c - taśma tekstylna.



Rys. 3. Efekty erozyjnego działania wyładowań niezupełnych na powierzchni polietylenu: a - powierzchnia izolacji kabla nowego, b - powierzchnia izolacji kabla po próbie długotrwałej, c - przekrój poprzeczny kraterów.

Na podstawie przeprowadzonych badań można odtworzyć działanie zewnętrznych wyładowań niezupełnych w kablu typu YHdAKX wg następującego schematu:

a/ w miejscach rozluźnionego styku powłok półprzewodzących i żyły powrotnej powstaje wyładowanie niepełne, okresowe nagrzewanie kabla sprzyja rozluźnieniu spójności ekranów zewnętrznych,

b/ wyładowania niezupełne powodują lokalne stopniowe niszczenie taśmy półprzewodzącej i usuwanie pokrycia grafitowego na powierzchni izolacji polietylenowej; intensywność wyładowań niezupełnych rośnie,

c/ pod wpływem wyładowań niezupełnych na odsłoniętej powierzchni polietylenu powstają liczne wgłębienia, kratery, które w polu elektrycznym działają jak otwarte ostrza gazowe, prowadząc do przebicia izolacji na zasadzie mechanizmu erozyjnego [4].

Czas do przebicia zależy od natężenia pola elektrycznego na wierzchołku ostrza gazowego; kształt ostrza, tj. jego smukłość i promień zakrzywienia, mają tu istotne znaczenie. Po utworzeniu się dostatecznie głębokich kraterów przebicie następuje po stosunkowo krótkim czasie. Ponowne próby przebitych odcinków kabli doprowadziły do przebicia po dodatkowym czasie 100 - 200 godzin, co stanowi ok. 10 - 20% czasu do pierwszego przebicia.

Równolegle z opisanymi wyżej badaniami prowadzono w tych samych warunkach próby kontrolnych odcinków kabli, w których usunięto zewnętrzne wyładowania niezupełne. W ciągu 2000 godzin próby nie uzyskano przebicia na żadnym odcinku kontrolnym, co dodatkowo potwierdza tezę o destrukcyjnym działaniu zewnętrznych wyładowań niezupełnych w kablach.

#### 4. Wnioski

Z przeprowadzonych badań można wyciągnąć szereg wniosków w sprawie wyładowań niezupełnych, konstrukcji kabli i prób napięciowych izolacji polietylenowej.

a/ Wyładowania niezupełne powstające w szczelinach powietrznych w zewnętrznych warstwach ekranujących kabli mogą być przyczyną przebicia izolacji polietylenowej na zasadzie długotrwałego mechanizmu erozyjnego.

b/ Z powyższych względów należy stosować takie rozwiązania konstrukcyjne kabli, które zapewnią spójność mechaniczną i trwałe styki

warstw zewnętrznych, nawet po wielokrotnych cyklach nagrzewania i chłodzenia.

c/ Zewnętrzne wady powierzchniowe izolacji, które prowadzą do erozyjnego przebicia polietylenu, mogą być wykryte w czasie długotrwałej próby napięciowej, przy cyklicznym nagrzewaniu, w czasie ok. 1000 godz.

d/ Próba napięciowa doraźna lub krótkotrwała, przy średnich natężeniach probierczych  $E_{gr} \geq 20$  kV/mm może wykryć punktowe wady w izolacji, które prowadzą do przebicia na zasadzie mechanizmu drzewienia.

#### LITERATURA

1. Norma Zakładowa ZN-72-MPM-13-K12111: Kable elektroenergetyczne o izolacji polietylenowej na napięcie znamionowe 10 - 20 kV.
2. Rynkowski A.: Wytrzymałość elektryczna kabli z wprowadzonymi wadami. Zesz.Nauk. FG Elektryka XLV, 1978, nr 289.
3. Rynkowski A.: Opracowanie i badanie głowic bezzakłóceniowych dla kabli o izolacji polietylenowej na napięcie znamionowe 15 - 20 kV. Sprawozdanie ZWN FG nr 339/76, 1976.
4. Wasilenko E.: Ocena odporności polietylenu na drzewienie elektryczne. Zesz.Nauk. FG, Elektryka XLV, 1978, nr 289.

#### Summary

#### INFLUENCE OF EXTERNAL PARTIAL DISCHARGES ON LIFE OF POLYETHYLENE INSULATED POWER CABLES

The paper describes the results of endurance test on the polyethylene insulated cables type YHdAKK 15 kV 1 x 120 mm<sup>2</sup> at voltage stress of 7,6 kV/mm and cyclic loading of 348 A. It is stated that the time to the breakdown decreases due to the external partial discharges acting inside semi-conducting layers. The range 500 - 1000 hours of the times to the breakdown and the intense degradation of the semi-conducting layers and the insulation surface suggests the erosive mechanism of the breakdown.