

Marek Garbarski
Ryszard Włodarski

STATYSTYCZNA OCENA NIEZAWODNOŚCI KABLI
WYSOKICH NAPIĘĆ O IZOLACJI WYTŁACZANEJ

Przed dwoma laty Komitet Studiów 21 CIGRE "Kable wysokich napięć" powołał grupę roboczą, której powierzył opracowanie metody badań, umożliwiającej kwalifikacyjną ocenę kabli wysokich napięć o izolacji wytłaczanej. Wybrano w tym celu statystyczną metodę badania reprezentacyjnej próbki, złożonej z pewnej liczby krótkich odcinków kabli. W pracach Komitetu nie był to temat nowy. Inna grupa robocza tego Komitetu opracowała już wcześniej podstawy wnioskowania o niezawodności długich odcinków kabli na podstawie laboratoryjnych badań wielokrotnie krótszych próbek [6]. Nowa grupa robocza przejęła więc temat aby go rozszerzyć, pogłębić i doprowadzić do międzynarodowego ujednoczenia zasad oceny w postaci zaleceń IEC-CBI.

Nakreślono następujący program ramowy prac:

- ustalenie terminologii i sposobu przedstawiania charakterystyk przebiecia izolacji,
- porównanie wg przyjętych kryteriów wyników badań w różnych krajach,
- ustalenie metod wyznaczania wartości współczynników statystycznych /przy szybkim zwiększaniu napięcia przemiennego w sposób ciągły lub skokami, przy napięciu stałym i udarowym, na podstawie prób długotrwałych itp./,
- analiza czynników wpływających na długość życia kabli /natężenie pola, napięcie, temperatura, cykle nagrzewania i stygnięcia, naprężenia mechaniczne i cieplno-mechaniczne, zwarcia itp./,

Mgr inż. Marek Garbarski, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Przemysłu
Kablowego "Kablosprzęt", Ożarów k/Warszawy
Dr inż. Ryszard Włodarski, Politechnika Warszawska, Instytut
Wysokich Napięć

- analiza i klasyfikacja przyczyn degradacji i przebicia izolacji /błędy "dzieciństwa", błędy fabrykacyjne, uszkodzenia losowe, wpływ zanieczyszczeń, wpływ wylądowań niezupełnych itp./,
- wybór metody prób kwalifikacyjnych kabli i sposobu oceny maksymalnego poziomu śmiertelności /intensywności uszkodzeń/ długich odcinków kabli /linii lub sieci kablowych/ w eksploatacji.

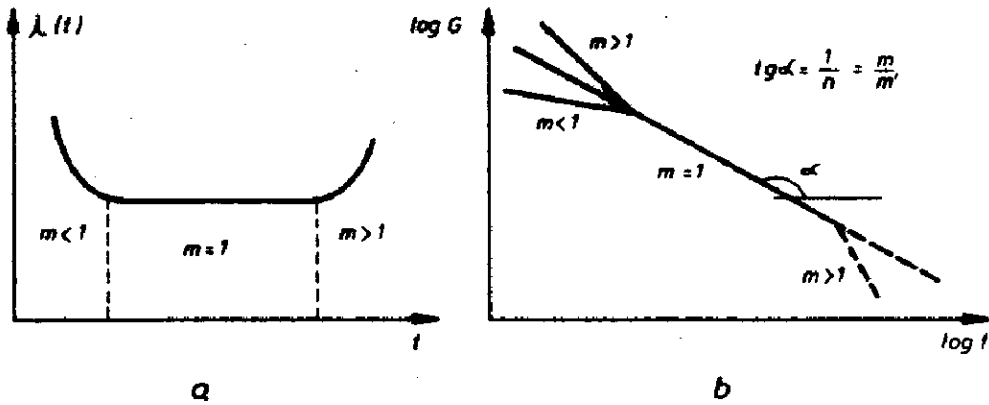
Do prac związanych z badaniem trwałości i niezawodności kabli przyjęto prawo rozkładu zmiennej losowej wg Weibulla. Zgodnie z tym prawem, prawdopodobieństwo P , iż czas do przebicia izolacji kabla o długości L i o przekroju żyły S przy natężeniu pola w izolacji G będzie nie mniejszy od t , można wyrazić zależnością

$$P(G, t, L, S) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{G}{G_0} \right)^{m'} \left(\frac{t}{t_0} \right)^m \left(\frac{L}{L_0} \right) \left(\frac{S}{S_0} \right) \right] \quad /1/$$

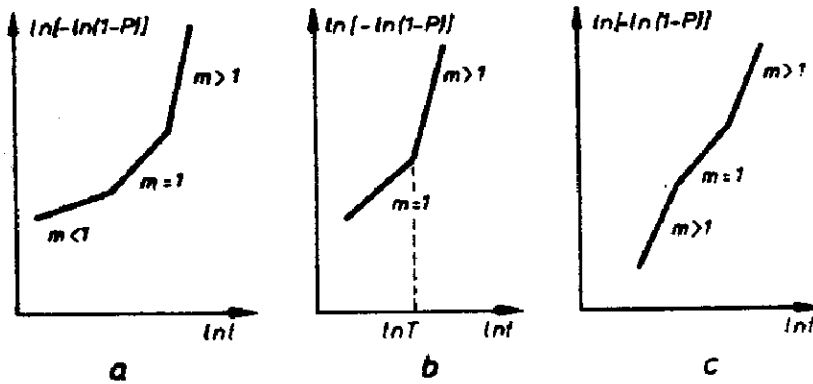
Wartości G_0 , t_0 , L_0 , S_0 są parametrami badanej próbki reprezentatywnej / G_0 - natężenie pola podczas próby, t_0 - czas do przebicia izolacji np. z określonym prawdopodobieństwem $P = 63\%$, L_0 - sumaryczna długość badanych odcinków kabla o przekroju S_0 /. Parametry statystyczne m i m' wyznacza się na podstawie wyników badań wytrzymałości elektrycznej krótkich odcinków kabli /badanej próbki reprezentatywnej/ odpowiednio przy $G = \text{const}$ i $t = \text{const}$.

Wartość parametru m wiąże się z kolejnymi strefami wykresu intensywności uszkodzeń /rys. 1/; $m < 1$ odpowiada strefie błędów "dzieciństwa" /niedoskonałość projektu, wykonania, kontroli/; $m = 1$ odpowiada strefie uszkodzeń losowych wynikających ze zbieżności narażeń eksploatacyjnych przekraczającej przewidywania koncepcji; $m > 1$ odpowiada strefie uszkodzeń wynikających np. z degradacji i starzenia się izolacji. Wartość parametru m' charakteryzuje rozrzut wyników badań przy zwiększaniu napięcia probierczego. Duża wartość m' odpowiada małemu rozrzutowi i potwierdza stabilność

produkcji o dobrej jakości.



Rys. 1 Wykres intensywności uszkodzeń $\lambda / t /$ i krzywej życia $G = f / t /$ dla próbki reprezentacyjnej lub sieci kablowej charakteryzujące się różnymi strefami uszkodzeń.



Rys. 2 Zależność prawdopodobieństwa P przebicia izolacji od czasu t , przy stałym natężeniu pola G .

Jeżeli badana próbka reprezentacyjna zawiera odcinki kabla z wadami konstrukcyjnymi lub technologicznymi, wówczas zależność prawdopodobieństwa przebicia od czasu próby może mieć charakter złożony /rys. 2a/. Wystąpi to szczególnie wyraźnie, gdy badania prowadzone są przy dużych wartościach natężenia pola [1] , [5] . W takich warunkach wykres krzywej życia może być również złożony /rys. 1b/. Spotyka się opinie, że ocena wyników badań, reprezentatywna dla warunków eksploatacji / $m > 1$ rys. 2b/ powinna być dokonana po wyeliminowaniu próbek o wczesnej śmiertelności. Wykrycie takich próbek powinno być sygnałem do koniecznej poprawy konstrukcji lub technologii. Jeżeli badana populacja nie zawiera odcinków o wczesnej śmiertelności, wówczas celowe jest wykonanie badań przy mniejszych natężeniach pola, jednak kilkakrotnie większych od natężenia roboczego, aby nie przedłużać zbytnio czasu próby. Badania prawdopodobieństwa przebicia mogą dać również wyniki jak na rys. 2c. W początkowym okresie $m > 1$, następnie m maleje ($m = 1$) i ponownie rośnie przy dłuższych czasach próby. Pierwsze załamanie wykresu wyjaśnia się zjawiskiem "samonaprawy" izolacji np. przez częściowe wygaszenie wyładowań niezupełnych.

Powracając do równania /1/ należy dodać, że ekstrapolację wyników ogranicza się do pewnego zakresu. Należy brać pod uwagę czas próby /stosuje się do czasów dłuższych od kilkunastu minut/, przekrój żyły /tak, aby różnice maksymalnych natężeń pola w izolacji kabli o różnym przekrojach żył nie były zbyt duże/ oraz natężenia pola podczas próby, które powinno wynosić od 3 do 50 kV/mm. Dwie dodatkowe zmienne - temperatura i częstotliwość - nie zostały dotychczas włączone do tego równania, co grupa robocza tłumaczy brakiem dostatecznie uzasadnionych opinii. Podstawowymi krateriami oceny niezawodności pozostają więc wartości obydwu parametrów statystycznych m i m' . Zasadniczym wymaganiem dla prób pozostaje nadal nieobecność procesów starzenia się izolacji, a więc obszar działania, w którym

intensywność uszkodzeń

$$\lambda(t) = \frac{\frac{dP(G, t)}{dt}}{1 - P(G, t)} \quad /2/$$

maleje lub jest stała w funkcji czasu trwania próby, co odpowiada wartościom $m < 1$.

W niektórych pracach analitycznych [5] spotyka się opinię, że rozpatrując niezawodność kabli $F(G, t)$, przy czym

$$F(G, t) = 1 - P(G, t) \quad /3/$$

należy brać pod uwagę co najmniej dwa podstawowe mechanizmy przebiecia: elektryczny i starzeniowy. W wyrażeniu niezawodności wprowadza się wówczas dwa nowe parametry statystyczne i uwzględnia prędkość narastania napięcia

$$F(G, t) = \exp \left[-k G^{m'} t \frac{t^a + T^a}{T^a} \right] \quad /4/$$

gdzie: T - czas odpowiadający zmianie nachylenia wykresu dystrybuanty,

a - parametr statystyczny, $a = m' - 1$,

k - współczynnik uzależniony od prędkości narastania napięcia

$$k = \frac{V_{m'}}{(E_0)^{m'} + 1} \quad /5/$$

E_0 - natężenie pola odpowiadające prawdopodobieństwu 63% przebiecia próbek przy podnoszeniu napięcia

Dla dużych natężeń pola i dla krótkich czasów ($t \ll T$) niezawodność

$$F(G, t) = \exp \left[-k G^{m'} t \right] \quad /6/$$

co odpowiada odcinkowi krzywej życia bez wyraźnego wpływu mechanizmu starzeniowego ($n = m'$). Dla dłuższych czasów przy mniejszych natężeniach otrzymuje się prawo Weibulla dla dwóch zmiennych G i t

$$F(G, t) = \exp \left[-\frac{k}{T^n} G^{m'} t^m \right] = \exp \left[-k' (G^n \cdot t)^m \right], \quad /7/$$

co odpowiada zależności

$$G^n \cdot t = \text{const} \quad /8/$$

przy czym $n = \frac{m'}{m}$.

Istotną rolę jaką odgrywają wartości parametrów m i m' może ilustrować następujący przykład. Z zależności /8/ dla $n = 9$ wynika, że niezawodnej eksploatacji kabla przez 30 lat przy napięciu U_0 odpowiada sześciomiesięczny okres próby tego kabla przy napięciu $\sqrt[3]{3} U_0$. Taką próbę z wynikiem pozytywnym wykonano na odcinku kabla 225 kV o izolacji polietylenowej o długości 50 m /EDF, Clamart, 1971 r./. Szukając odpowiedzi na pytanie o czas niezawodnej eksploatacji tego kabla o długości 4 km, lecz nie znając rzeczywistych wartości parametrów m i m' , można na podstawie równania /1/ uzyskać różne wyniki zależne od założonych wartości m i m' , których iloraz będzie równy $n = 9$:

dla $n = 9$, $m = 3$ i $m' = 27$, czas $T = 37$ lat,

dla $n = 9$, $m = 1$ i $m' = 9$, czas $T = 2$ lata.

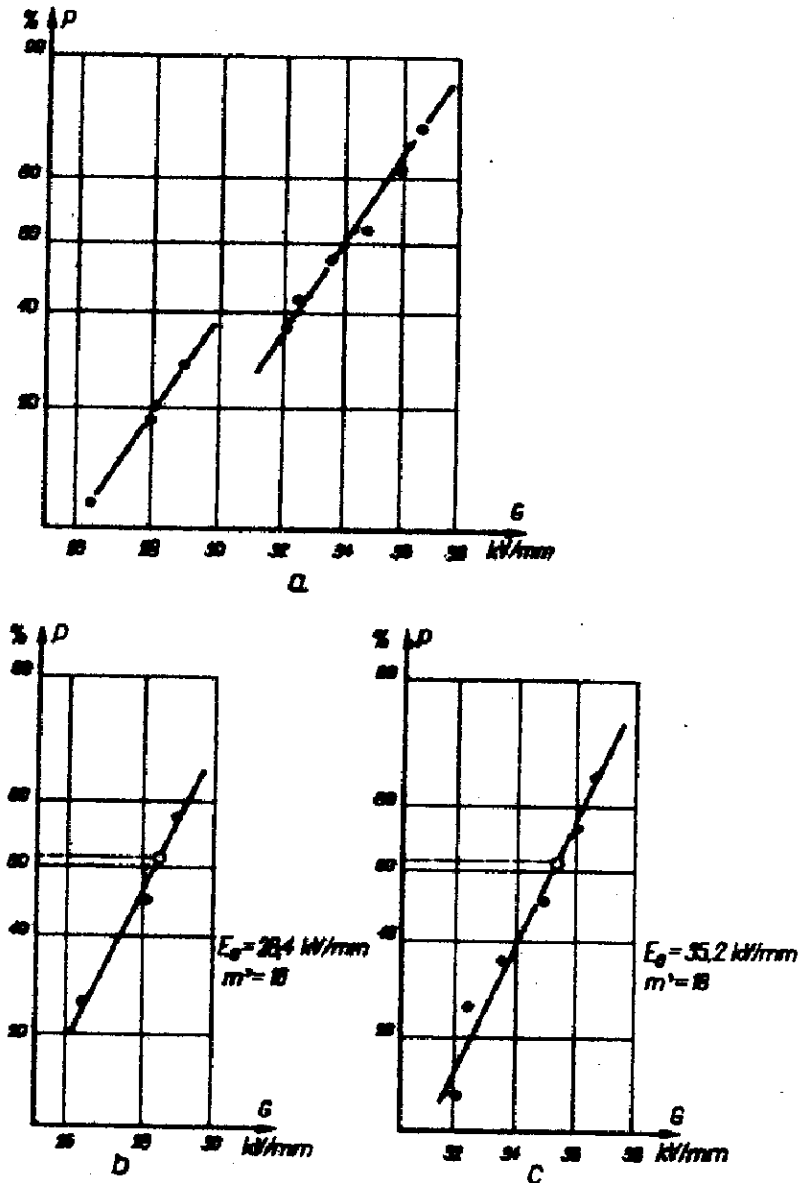
Pierwszy rezultat można uznać za zadowalający, natomiast drugi budzi uzasadniony niepokój.

Nasuwa się wniosek, że należy znać wartości m i m' dla produkowanych kabli i to wartości odpowiadające zarówno krótkim czasom życia, uzyskane np. z prób przy wysokich natężeniach pola, które pozwolą na wyeliminowanie wad fabrykacyjnych oraz wartości odpowiadające długim czasom przy mniejszych natężeniach, reprezentujące dobrą jakość kabli i pozwalające na prawidłowe określenie niezawodności długich linii i sieci kablowych.

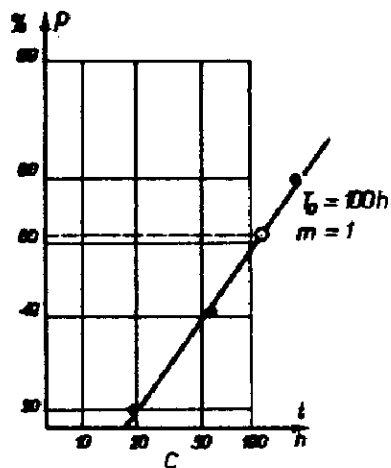
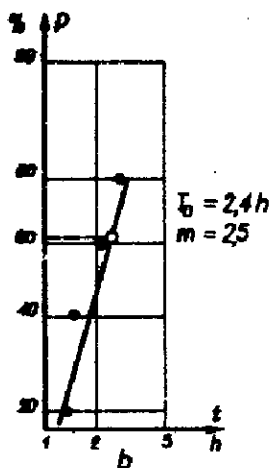
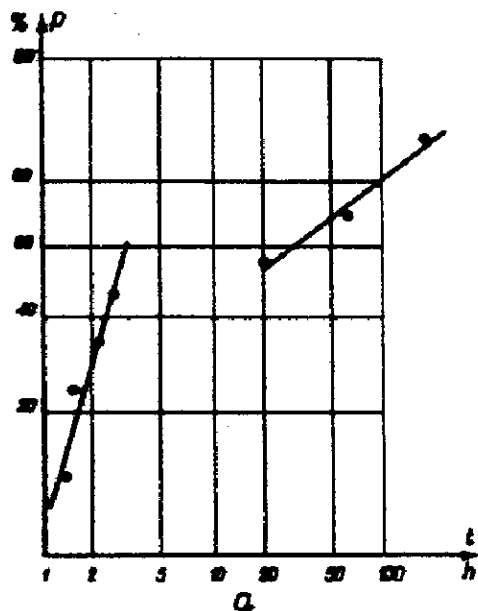
Założenia przyjęte przez CIGRE wykorzystano w krajowych badaniach niezawodności kabli o izolacji polistylenowej na napięciu 15 kV, produkcji Bydgoskiej Fabryki Kabli [7], [8], [9]. Na rysunkach od 3 do 9 pokazano przykładowo uzyskane wyniki dla kilku próbek reprezentacyjnych /łącznie ok. 50 odcinków o długości 10 m/ pochodzących z kabli wyprodukowanych w latach 1972 - 1973. Na rys. 6 podano również wyniki badania wytrzymałości elektrycznej /przy zwiększaniu napięcia probierczego/ kabli o izolacji wytłoczonej z polistylenu krajowego. Szczegółowy opis przystosowania próbek kabli i warunków przeprowadzania próby przekracza ramy niniejszego referatu. Przed badaniami wytrzymałości elektrycznej wykonano pomiary wyładowań niezupełnych w izolacji każdego odcinka przeznaczonego do badań. Pomiary wyładowań niezupełnych wykonano przy napięciach 8,7; 10,8; 15,0; 22 kV oraz określono napięcie początkowe i napięcie gaśnięcia wyładowań niezupełnych. Nie stwierdzono zależności pomiędzy napięciem przebicia lub czasem do przebicia a intensywnością wyładowań niezupełnych zmierzoną przez badaniami wytrzymałości.

Otrzymane wyniki statystycznego napięcia przebicia i czasu do przebicia wskazują, że badane populacje różnią się w sposób nieprzypadkowy. Kable charakteryzujące się rozkładami jak na rys. 3, 4 i 5 zostały wyprodukowane w roku 1973. Wyniki te są wyraźnie lepsze niż dla kabli wyprodukowanych przed rokiem 1973 /rys. 7, 8, 9/. Należy podkreślić poprawę współczynnika m' . Równie wysoką wartość m' otrzymano z badań kabli o izolacji z polistylenu krajowego

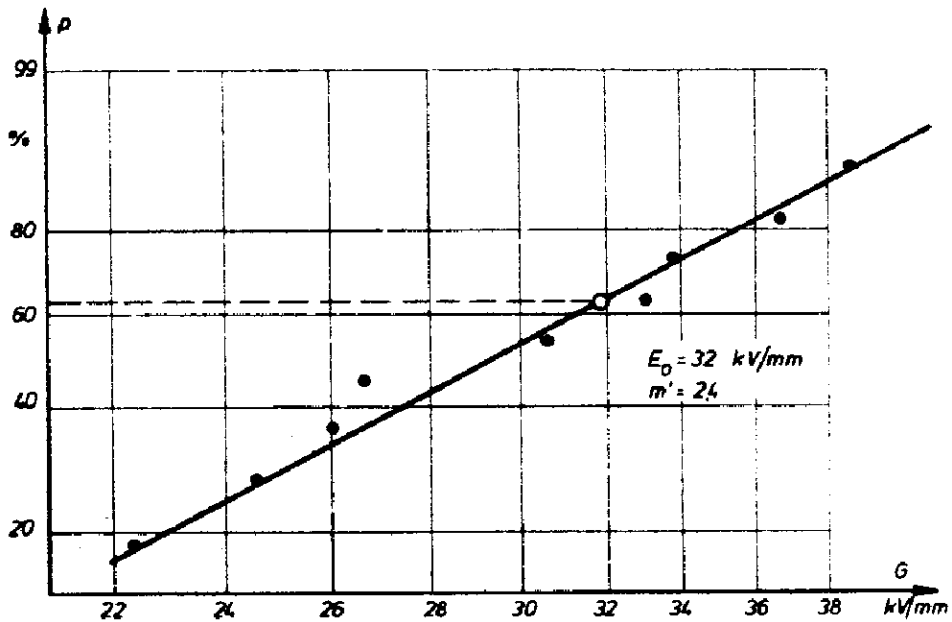
wyprodukowanych w 1974 r. /rys. 6/.



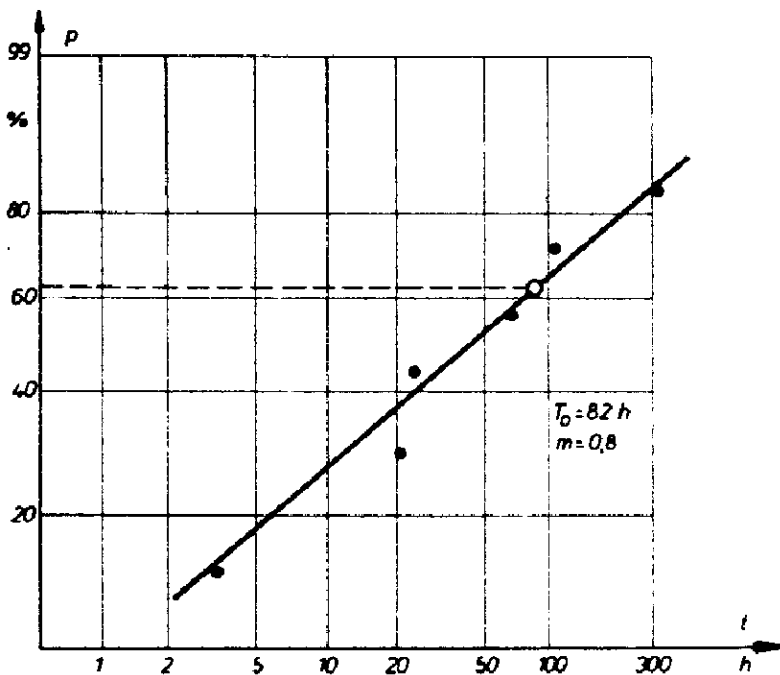
Rys. 3 Zależność prawdopodobieństwa P przebicia izolacji od natężenia pola G dla próbki reprezentacyjnej kabli o izolacji polietylenowej 15 kV produkcji krajowej /polietylen importowany/



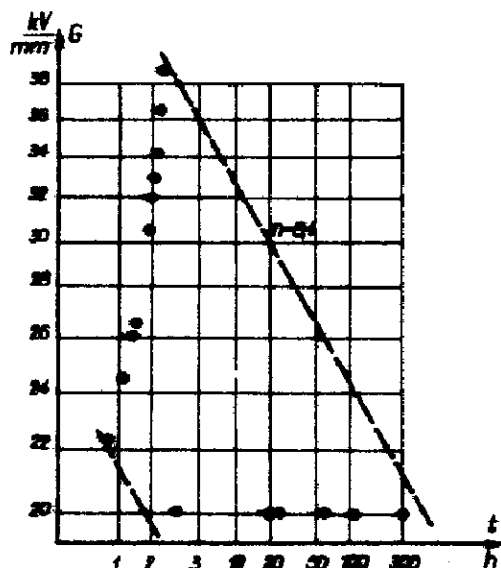
Rys. 4 Zależność prawdopodobieństwa P przebicia izolacji od czasu t / $G_0 = 25,7$ kV mm/ dla kabli opisanych na rys. 3.



Rys. 7 Zależność prawdopodobieństwa P przebicia izolacji od natężenia pola G dla próbki reprezentacyjnej kabli o izolacji polietylenowej 15 kV produkcji krajowej /polietylen importowany/.



Rys. 8 Zależność prawdopodobieństwa przebicia izolacji od czasu t / $G = 20$ kV mm/ dla kabli opisanych na rys. 7.



Rys. 9 Fragment krzywej życia wg wyników badań z rys. 7 i 8

Wartość współczynnika m dla badanej populacji kabli sprzed 1973 r. wskazuje na występowanie wczesnej śmiertelności tych kabli. Badania kabli wyprodukowanych w r. 1973 /rys. 3a i 4a/ wykazują złożoność populacji /dwie grupy o różnych cechach - rys. 3b i 4b oraz rys. 3c i 4c/. Mechanizm samonaprawy, który mógłby dać podobne wyniki w próbie długotrwałej /rys. 4a/ jest jednak mniej prawdopodobny w świetle wyników próby szybkiej /rys. 3a/. Inne przedstawienie wyników badań tych kabli /rys. 5/ ilustruje dodatkowo różną trwałość wyodrębnionych dwóch grup.

Przedstawione wyniki są początkowym fragmentem badań, które kontynuujemy w bieżącym roku.

Literatura

- [1] Gouldson E.J. - Dyskusja do ref. E. Occhini "A Statistical Approach to the Discussion of the Dielectric Strength in Electric Cables". IEEE Trans, PAS, nr 6, 1971.
- [2] Jocteur R., Osty M., Lemainque H., Terramorsi G. - Recherche et developpement en France dans le domaine des cables haute tension isolés au polyéthylène extrudé. CIGRE 1972, ref. 21-07.
- [3] Asker P., Dellby B., Jacobsen C.T. - Vieillissement électrique accéléré des cables a gaines de polyéthylène reticulé. CIGRE 1972, ref. 21-09.
- [4] Kreuger F.H., Bentvelsen P.A.C. - Phenomene de claquage dans les cables isolees au polyethylene. CIGRE 1972, ref. 21-05.
- [5] Oudin J.M., Causse L., Lacoste A. - Contribution generale a l'etude de la disponibilite des reseaux haute tension de cables isolees. Rev. Gen. Electr. nr 6, lipiec 1973.
- [6] CIGRE, Workin Group "Partial Discharges"; The Weibull Distribution, Effect of Length and Conductor Size of Test Cables. Electra, nr 33, march 1974.
- [7] Grobicki J., Włodarski R. - Badania statystyczne kabli YHAKX 15 kV. OBR "Kablo-sprzęt", Sprawozdanie nr 596, 1973.
- [8] Garbarski M., Goliński J., Samsel St., Włodarski R. - Badania niezawodności kabli elektroenergetycznych 15 kV o izolacji polietylenowej. Politechnika Warszawska, Instytut Wysokich Napięć, 1974.
- [9] Garbarski M. - Badania statystyczne kabli elektroenergetycznych o izolacji polietylenowej na napięcie 15 kV. OBR "Kablo-sprzęt". Sprawozdanie nr 516, 1974 r.