

Jacek Goliński

Kasylda Łabus Nawrat

MECHANIZMY PRZEBICIA IZOLACJI FOLIOWO-GAZOWEJ

1. Wstęp

Celem badań przedstawionych w artykule było poznanie czynników decydujących o trwałości izolacji foliowo-gazowej z SF_6 . Dla osiągnięcia tego celu przeprowadzono badania wytrzymałości doraźnej i długotrwałej w układach modelowych odpowiadających rzeczywistym układom IFG oraz w uproszczonych układach modelowych z różnego rodzaju wnz mogącymi wystąpić w układach rzeczywistych. Mechanizm przebicia w IFG z powietrzem został już w literaturze szeroko opisany, jednakże w celach porównawczych był również przedmiotem naszej analizy.

Do badań użyto F o grubości $36 \mu m$ z PTPE krajowej produkcji o oznaczeniu fabrycznym Estrofol ET36. Jest to dielektryk o dobrych własnościach szeroko stosowany, jednak nie do IFG z SF_6 . W tym przypadku zakres zastosowania PTPE jest ograniczony stosunkowo wysokim ϵ , / $\epsilon = 3,1$ /. W niektórych przypadkach ze względów techniczno-ekonomicznych może być jednak celowe takie rozwiązanie.

Doc.Dr inż.Jacek Goliński

Mgr int.Kasylda Łabus Nawrat

Instytut Elektrotechniki

Zakład Wysokich Napięć

Warszawa

Celem niniejszej pracy nie był wybór najwłaściwszego rodzaju F, ale dla danej F zbadanie wpływu wnz i różnego rodzaju słabych punktów izolacji na jej trwałość. Ze względu na objętość artykułu nie omawia się szczegółowo uzyskanych rezultatów badań E_p , t_p , a ograniczono się głównie do spostrzeżeń dotyczących mechanizmów destrukcji i przebiega mających charakter bardziej ogólny i mogących dotyczyć także innych polimerów stosowanych w IFG.

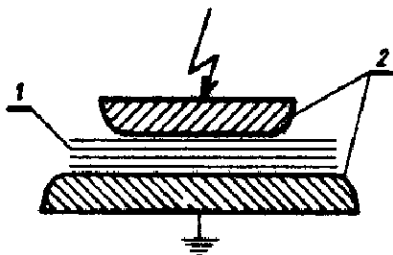
2. Zakres przeprowadzonych badań

Badania przeprowadzono dla 2 rodzajów układów modelowych przedstawionych na rys.1 i 2. W układach z rys.1 stosowano elektrody mosiężne, bądź z Al o powierzchniach 1; 15 i 100 cm², promieniach krzywizny 1,5 i 10 mm. Używano elektrod polerowanych i zestarzonych kolejnymi próbami przy czym polerowanie stosowano co kilka prób. Wytrzymałość dociskową badano przede wszystkim dla 1 F zarówno w stanie dostawy jak i po starzeniu. Do starzenia stosowano głównie elektrody o powierzchni 100 cm², a do wyznaczania E_{do} i E_{ds} elektrody o powierzchni 1 i 15 cm². Badania przeprowadzono w temperaturze 20-25°C, przy ciśnieniu 1 b dla SF₆ i powietrza. Wilgotność powietrza wynosiła 50.....70%.

Starzenie w układzie z rys.1 przeprowadzono dla 2,3,4 i 6 F. Dla modeli z 3F stosowano 2-gą F z kilkunastoma wtrącinami o średnicy 4 mm. Dla modeli o 6F w przypadku wprowadzenia wtrącin znajdowały się one w 2-giej i 5-tej F. Do modeli z rys.1 poza wtrącinami wprowadzone były także różnego rodzaju słabe punkty. Stosowane dociski wynosiły 200 - 2000 N/m².

W układzie z rys.2 stosowano 8 F lub 14 F. Na elektrody stosowano drut miedziany w emalii poliestrowej o średnicy 0,25 mm. Badania przeprowadzono dla czasów $t_s = 10^{-3} - 10^3$ h i dla $E_s = 1, 2 - 180$ kV/mm. Nie we wszystkich przypadkach kontynuowano próby aż do

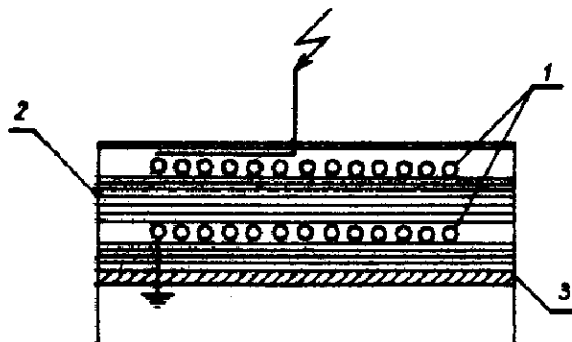
przebiecia. P starzone poddawane były szcegółowym oględzinom gołym okiem i pod mikroskopem /z powiększeniem do 100/. Każdorazowo analizowane było miejsce przebiecia i rodzaj uzyskanej destrukcji.



Rys.1. Model izolacji o polu kwasijednorodnym

1 - badana folia

2 - elektrody aluminiowe lub mosiężne



Rys.2. Model izolacji międzywarstwowej przekładni-
ków napięciowych

1 - drut w emalii

2 - badana folia

3 - cylinder izolacyjny

Jednym z parametrów decydujących o jakości izolacji foliowo-gazowej jest wypełnienie gazem wewnętrznych strukturalnych wtrącin istniejących pomiędzy łańcuchami molekuł, pomiędzy obszarami krystalicznymi a amorficznymi itp. Wg /1/ w PE w zależności od jego gęstości i gatunku zawartość tych wewnętrznych wtrącin wynosi 2...17% objętości. Uwzględniając, że PTFE ma bardziej złożoną budowę chemiczną niż PE zawartość takich wtrącin wewnętrznych może być jeszcze wyższa. W serii badań opisanych w tym artykule pominięto całkowicie badania wpływu ciśnienia i czasu impregnacji SF_6 . Przyjęto mianowicie stały czas odgazowania 1h, wystarczający do odgazowania tylko w pewnym stopniu zewnętrznej warstwy zadsorbowanych gazów, a praktycznie nie pozwalający na wytworzenie próżni w wewnętrznych wtrącinach. Przy 1 barze SF_6 impregnacja tych wtrącin następowała zatem jedynie na skutek różnic ciśnień parcjalnych gazów znajdujących się wewnątrz P i SF_6 otaczającego P. Stosowany czas impregnacji przed próbami wynosił 4h. Uwzględniając ponadto stwierdzony przez [1] /dla PE/ fakt liniowego wzrostu z P rozpuszczalności SF_6 w P należy stwierdzić, że przyjęta metodyka dała zaostrenie warunków prób, skoro stosowane P dla IFG zawierają się zwykle w granicach 3-4 barów [2], [3] .

Na obecnym etapie prac nie można stwierdzić w jakim stopniu to zaostrenie warunków jest przyspieszeniem obserwowanych procesów starzenia, a w jakim stopniu ich deformacją tj. wywołaniem mechanizmów przebicia nie zachodzących przy wyższych P.

Nie ulega wątpliwości, że zwiększenie P wpływając na podniesienie U_0 wpłynie przede wszystkim na zwiększenie wytrzymałości długotrwałej czyli na zwiększenie wykładnika krzywej życia.

3. Degradacja folii w czasie starzenia elektrycznego

3.1. Klasyfikacja degradacji

W przeprowadzonych badaniach stwierdzono występowanie następujących rodzajów degradacji

- głęboka erozja / $> 0,2 d_1$ /
- płytka erozja / z dającymi się wyróżnić poszczególnymi wyerodowanymi kraterami /.
- powierzchniowe zmiany struktury F /np. ściernalny biały pył /
- lokalne objętościowe zmiany struktury F /powstawanie jakby kryształów wewnątrz F /
- kanały przebieg częściowych /zwęglone i niezwęglone /

Wszystkie rodzaje degradacji związane były z obniżeniem E_{d3} do zakresu $/0,05-0,95/ E_{d0}$. Wszystkie charakteryzowały się nierównomiernym występowaniem w obszarze skłaniania E. Wydaje się, że obecność następujących czynników decydowała o lokalizacji miejsc degradacji:

- lokalny wzrost E
- intensywność wzs
- koncentracja wzs
- słabe punkty F
- wtrąciny gazowe
- rodzaj ośrodka gazowego

3.2. Rola słabych punktów

Jako słabe punkty izolacji w tym artykule zostały uznane:

- a/ lokalne defekty struktury pojedynczej F,
- b/ zanieczyszczenia w postaci np. pyłków dostające się w trakcie produkcji F lub wykonywania względnie badania modeli,
- c/ specjalnie wprowadzane do modeli zanieczyszczenia typu pyłowego,
- d/ uprzednio zdegradowana elektrycznie F wprowadzana między nowe F.

Lokalne defekty struktury polegały na:

- uszkodzeniach F w procesie produkcji w postaci np. rys,
- wtrącinach gazowych lub różnych obcych ciałach w F.

Łączna częstotliwość występowania powyższych defektów wynosiła w zależności od dostawy 1 - 100 m⁻², przy czym E_{do} tych defektów wynosiło (0,3 - 0,95) E_{do} śr. Znacznie większe obniżenie E_{do}, bowiem aż do (0,05 - 0,1) E_{do} śr stwierdzono w miejscach, które przy obserwacji niczym się nie wyróżniały. Były one spowodowane przypuszczalnie występowaniem słabych punktów typu b.

Wpływ słabych punktów typu a i b na E_p określano na podstawie analizy lokalizacji miejsc przebiccia oraz t_p. Słabym punktem typu a i b przypisano obniżenie t_p poniżej /t_p/śr o 1 rząd wielkości lub wyższe.

Słabe punkty typu c i d dla większych E były miejscem przebić zupełnych bez wstępnej degradacji, a przy E < 60 kV/mm były źródłem rozwijającej się destrukcji izolacji aż do przebiccia. Obserwowano przy tym zarówno erozję jak i częściowe przebiccia kanałowe przechodzące przez 1 lub kilka F. Stwierdzono, że różnego rodzaju słabe punkty typu c /w tym przewodzące/ w różnym stopniu wpływają na przyspieszenie procesu przebiccia. Słabe punkty typu d, tj. F z miejscami lokalnie objętościowo zdegradowanymi /a nie przebicciami zupełnymi/ wpływały w większym stopniu niż słabe punkty typu c.

W układzie modelowym z rys. 2 nie stwierdzono bezpośredniego wpływu słabych punktów typu a i b, bowiem przebiccia były zlokalizowane zawsze w miejscach sprzyjających powstawaniu zlokalizowanego oddziaływania wzn tj. na krawędziach elektrod lub brzegach F. Nie można jednak wykluczyć i w tym przypadku wzmocnienia szkodliwego działania wzn przez słabe punkty.

3.3. Wpływ sąsiedztwa elektrod

Stwierdzono wyraźny wpływ sąsiedztwa elektrod na przyspieszenie degradacji izolacji.

Dotyczy to zarówno erozji płytkiej powstającej w SF_6 pod elektrodami przy ich nierównościach oraz erozji głębokiej powstającej przy krawędzi elektrod. Erozja płytka nie przekraczała 0,1-0,3 grubości F sąsiadującej z elektrodami, erozja głęboka dochodziła przy elektrodzie pod wysokim potencjale do 2 F zarówno przy próbach modeli 6F z rys.1 /dla $E=15 - 35$ kV/mm/ jak 14 F z rys.2.

Odnosnie mechanizmu powstawania erozji to najbardziej ugruntowane wydają się opinie, że erozja wywołana jest bombardowaniem elektronowym [4,5] choć niektórzy autorzy przypisują istotny wpływ bombardowaniu jonowemu [6 - 8]. Prace japońskie udowodniły, że obecność jonów O^+ przyspiesza w sposób zdecydowany erozję, przy czym w przypadku PTPE jak PE wystarczają minimalne tj. $< 1\%$ zawartości O_2 w atmosferze, w której powstają wzn [9]. Ta rola O_2 wydaje się całkiem zrozumiała uwzględniając, że zamiast procesów rekombinacji może wtedy następować reakcja utleniania PTPE zgodnie z poniższą formułą [10]:



Praktycznie zarówno w powietrzu jak i w SF_6 powstają jeszcze stałe i częściowo ciekłe produkty rozkładu F , czyli reakcje mają charakter bardziej złożony choć w niektórych przypadkach znaleziono prawie idealne potwierdzenie tego wzoru [10].

Sądziwy, że przypadku prób w SF_6 jonów O^+ dostarczały cząsteczki O_2 zaadsorbowane bądź zaabsorbowane przez F , o czym świadczyć może wpływ O_2 przy badaniach F w wysokiej próżni [8].

Wracając do wpływu sąsiedztwa elektrod na degradację należy podkreślić, że przy elektrodzie uziemionej także w przypadku tej samej

krawiszny obserwowano mniejszą degradację.

W przypadku $t_g > 200$ h w SF_6 obok erozji obserwowano powstawanie lokalnych zmian struktury, a dla powietrza już od $t_g > 2$ h zamiast erozji stwierdzono występowanie powierzchniowych i objętościowych zmian struktury.

Wpływ sąsiedztwa elektrod na E_{ds} podaje przykład rezultatów /10 pomiarów dla danej F/ dla modelu z rys.2, przy $E_g = 12$ kV/mm, $t_g = 400$ h, w SF_6 : dla 1-asej F $E_{ds} = 0,36 E_{d0}$, a dla 14-tej F $0,51 E_{d0}$, gdy dla pozostałych 12 F $E_{ds} = /0,76-1,0/ E_{d0}$, a średnio dla tych warstw $0,91 E_{d0}$. W środkowych F występowały także pojedyncze przypadki $E_{ds} = 0,25 E_{d0}$.

3.4. Wpływ intensywności wns

Badania w układzie z rys.1 w SF_6 wykazały, że q_p ma istotny wpływ na stopień destrukcji izolacji. Obserwowano bowiem głęboką erozję /do $0,3 d_1/$ tylko przy krawędzi elektrod gdzie q_p w zależności od E_g zawierał się w granicach 10^3-10^6 pC.

Dla $t_p > 1$ h zdecydowana większość przebiegów zlokalizowana była pod tą erozją lub w jej sąsiedztwie tj. w odległości do 5 mm.

Natomiast wns podelektrodowe o intensywnościach 10^1-10^3 pC wywoływały tylko płytką erozję. Wpływ intensywności wns /w tym przypadku ich częstotliwości n /na erozję obserwowano dla $E_g > 30$ kV/mm także dla wtrącin wewnątrz F.

W układach z rys.1 w powietrzu wpływ q_p na stopień destrukcji izolacji ograniczony był przede wszystkim przez H_2O adsorbowane na powierzchni, zwiększające jej przewodność, przez co wyeliminowana została praktycznie głęboka erozja. Wydaje się, że w tym przypadku częstotliwość wns zlokalizowanych na nierównościach elektrod, na krawędziach wtrącin decydowała o stopniu degradacji izolacji, która polegała głównie na powierzchniowych i objętościowych zmianach struktury F. W tej degradacji struktury F istotną rolę odgrywa O_2 zawarty

w powietrzu. Na potwierdzenie braku wpływu q_p może świadczyć fakt, że wnz we wtrącinach o $q_p = 0,5 - 500 \text{ pC}$ /ale dużym n / były zawsze przyczyną przebić, a nie występujące jednocześnie wnz na krawędzi elektrod o $q_p = 10^3 - 10^6 \text{ pC}$ /ale małym n /. Należy tu podkreślić, że decydującą rolę odgrywa nie globalne tj. mierzone n danego rodzaju wnz /dla danego zakresu q_p / a n wnz występujących w miejscu, w którym występuje przebicie. Jak okaże się z rozważań punktu 4, także w przypadku SF_6 w końcowym rezultacie o przebicciu decyduje n wnz zlokalizowanych w miejscach głębokiej erozji.

4. Mechanizmy przebiccia folii

Z omówionymi w [3] różnymi rodzajami degradacji F, występującej tylko na części całkowitej grubości izolacji między elektrodami związane są różne mechanizmy przebiccia.

Dla układu modelowego w SF_6 z rys.1 dla dłuższych czasów działania / $t_s > 10 \text{ h}$ / najbardziej typowy jest mechanizm związany z głęboką erozją na krawędzi elektrod. Rozważając taki mechanizm przebiccia należy przede wszystkim uwzględnić klasyczną teorię J.H.Masona [6], [7] tj. rozważyć czy głęboka i zlokalizowana erozja stwarza warunki do takiego wzrostu energii wnz, aby mogła ona doprowadzić do zwęglenia i utworzenia ostrza skarbonizowanego, przed którym panowałyby E_{maks} umożliwiające dalszy rozwój przebiccia kanałowego. Wydaje się, że taki mechanizm należy odrzucić gdyż już przed powstaniem wnz skierowanych w osi głębokiej erozji istniały iskry ślizgowe o energii wyższej o rzędy wielkości i nie doprowadziły one do zapoczątkowania przebić kanałowych, a tylko do tej pogłębiającej się z czasem erozji.

Wg innego erozyjnego mechanizmu [1], [12] przebiccie następuje prawie natychmiastowo, gdy w wyniku głębokiej erozji E przekroczy E_{d0} . Obserwowane przez nas przebiccia również przy $E_s \ll 0,05 E_{d0}$

i głębokościach erozji $/0,1 \dots 0,4/ d_1$ nie pozwalają na zmocowanie E na dnie głębokiej erozji /przy występowaniu wzn./ jako przekraczającego E_{d0} .

Wydaje się, że do wytłumaczenia tego zjawiska należy sięgnąć do prac W. Boecksa [3], który stwierdził, że odpowiednio długie bombardowanie F przez wzn prowadzi do bardzo znacznego obniżenia E_{ds} /nawet poniżej $0,1 E_{d0}/$ bez uszkodzenia struktury dielektryka, a po przerwie beznapięciowej E_{ds} wraca do pełnej wartości E_{d0} .

Narayana Rao zmodyfikował hipotezę Boecksa stwierdzając, że proces skokowego wzrostu przewodności obserwowany przez Boecksa tuż przed przebiciem F bombardowanej przez wzn, nie zawsze występuje /np. w podwyższonych temperaturach lub przy powierzchniowym uszkodzeniu struktury F /a zawsze występuje obniżenie E_{ds} , które dla pewnego zakresu t_g ma charakter odwracalny, a dla dłuższych t_g nieodwracalny [4]. Maszyn odzyskanie powrót E_{ds} do pełnej wartości tj. do E_{d0} ze stanu $E_{ds} = 0,1 E_{d0}$ jest możliwy tylko dla układu stosowanego przez Boecksa i Narayana Rao, w którym nie występowały warunki do lokalizowania wzn.

Wychodząc z prac Boecksa i Narayana Rao można sądzić, że zlokalizowane w wyprzedzonej wtrącinie wzn powodują lokalne obniżenie E_{ds} . W ten sposób można by wyjaśnić zależność niesbędnego czasu do zapoczątkowania kanału przebicia od E , gdyż zgodnie z hipotezą Boecksa całkowity ładunek bombardujący, a właściwie wnikający do dielektryka, niesbędny do skokowego obniżenia E_{ds} jest stały. Ten stały całkowity ładunek przy założeniu q_p niezależnego od E jest wprost proporcjonalny do iloczynu $n \cdot t_g$, ponieważ n rośnie silnie z E , to t_g musi odpowiednio maleć z E . Z tego rozumowania wynika jednocześnie znaczenie zwiększenia n przez lokalizację wzn także na skutek innych przyczyn niż głęboka erozja. Tak więc rozważając mechanizm całkowitego przebicia należy uwzględnić w nim wstępujący etap pozwalający na zlokalizowanie wzn np. poprzez erozję, etap obniżenia E_{ds} na skutek bombardowania

przez już zlokalizowane wzn oraz etap przebicia kanałowego.

Tak zinterpretowaną teorią Boeckę można tłumaczyć także przebicie poprzedzone płytką erozją oraz przebicia dla $t_p = 0,1 \dots 10$ h w SF_6 nie poprzedzone zlokalizowaną erozją, przy których lokalizacja wzn mogła być spowodowana np. nierównomiernością elektrod lub krawędziami folii we wtrącinach.

Zaobserwowane dla PTPE w SF_6 zjawisko poprzedzania przebicia skoncetrowaniem oddziaływania wzn spowodowane jest także utrudnionym wnikiem bombardowania elektronowego do tego dielektryka. Wg [16] [17] w przypadku PE elektrony łatwiej wnikają do wnętrza dielektryka niż do PTPE, tym należałoby tłumaczyć że w badaniu Ruffera [18] wytrzymałości długotrwałej folii PE w SF_6 , 80% przebić występowało pod elektrodą a 20% na krawędziach. W naszych badaniach proporcje były odwrotne.

Decydujący o przebicciu wpływ koncentracji wzn powoduje, że dla $t_p < 10h$ i $E_p > 40$ kV/mm nie stwierdzono praktycznie wpływu rodzaju gazu na t_p mimo, że q_p dla obu gazów, zależnie od grubości izolacji mogły się dość znacznie różnić.

W przypadku dużych E_p /np. $E_p > 80$ kV/mm / i przy występowaniu słabych punktów izolacji przebicie kanałowe pojawia się bez wystąpienia jakiegokolwiek poprzedzającej erozji czy zlokalizowanego bombardowania przez wzn. Wydaje się, że już przy czasach rzędu kilkunastu minut należy się także liczyć z obniżeniem E_{gs} , z tym, że w tym przypadku czynnikiem decydującym o tym obniżeniu jest nie bombardowanie elektronów a wewnętrzna emisja elektronowa z aktywnych punktów izolacji zgodnie z [15]. Badania wykazały, że rolę aktywnych punktów m.in. mogą spełniać słabe punkty typu d zgodnie z 3.2. Wydaje się, że rola wszelkiego typu słabych punktów zależy przede wszystkim od częstotliwości ich występowania. Przy dużej częstotliwości występowania słabych punktów i odpowiednio dużej powierzchni elektrod decydować mogą one nie tylko o przedwczesnych

przebiegach o małym prawdopodobieństwie występowania lecz także o średnim t_p czyli decydować będą o wykładniku potęgowym krzywej życia.

5. Uwagi końcowe

Przeprowadzone badania wykazały, że nawet małointensywne wnz prowadzą w czasie do lokalnej degradacji F z PTFE; z literatury wynika, że dotyczy to wszystkich polimerów w postaci F. Lokalna degradacja izolacji prowadzi z czasem do pełnego przebiccia zgodnie z opisanymi mechanizmami. W zakresie naprężeń roboczych nie jest zatem dopuszczalne powstanie w IFG jakichkolwiek wnz. Ze względu na niską czułość pomiarów wnz na kompletnych obiektach takich jak np. przekładniki napięciowe [19] czy połączone szeregowo elementy pojemnościowe [20] np. w izolatorach przepustowych konieczne jest przeprowadzenie pomiarów wnz na odpowiednio spreparowanych modelach IFG. Jednym z parametrów decydujących o doborze F powinna być jej trwałość w warunkach pracy kontrolowana przez próby starzeniowe adekwatnych modeli tj. o technologii wykonywania odpowiadającej warunkom wytwarzania rzeczywistej IFG.

Oznaczenia

- d_1 - grubość izolacji modelu
- E - natężenie pola elektrycznego
- E_p - naprężenie przebiccia przy próbie długotrwałej
- E_{do} - naprężenie przebiccia doraźnego jednej folii niestarzonej
- E_{ds} - naprężenie przebiccia doraźnego jednej folii starzonej
- E_s - naprężenie przy starzeniu
- F - folie względnie 1 warstwa folii
- IFG - izolacja foliowo-gazowa
- n - częstotliwość wnz
- p - ciśnienie gazu

PE - polietylen

PTPE - politereftalanpolietylenu

q_p - ładunek pozorny

t_s - czas starzenia

t_p - czas do przebiccia w próbie starzenia

U_0 - napięcie proggu wnz

wnz - wyładowania niezupełne

6. Literatura

1. Kojima T. i inni - Characteristics of PE impregnated with various gases. Tr. IEEE V. PAS 93/1974/N2 p.579
2. Łabus-Nawrat K. - Przekładnik napięciowy do rozdzielnicy osłoniętej z SF₆ na napięcie 110 kV.
Prace Instytutu Elektrotechniki 1975 /w druku/
3. Raupach F. - Messwandler für SF₆ - isolierte gekapselte Schaltanlagen.
ETZ-A Bd 94 1973 H.7. s.419
4. Grossman R.F., Beasley W.A. - Effects of corona discharge upon polyethylene. J. of Ap. Pol. Sc. 1959 V. II P.163
5. Garton C.G. - The energy of discharges and their interaction with solid dielectrics. CEGB Conference on gas discharges and the electricity supply industry. Leatherhead 1962 P.412
6. Mason J.H. - The deterioration and breakdown of dielectrics resulting from internal discharge P.I.E.E. 1951 98 part I.P.44
7. Mason J.H. - Breakdown of insulation by discharges P.I.E.E. 1953 V.100 part II A No 3. P.149
8. Antonion A., Bui Ai, Lacoste R., Mayous C. Effects comparatives du bombardement par des ions et des decharges partielles sur la feuille de PE. CRHS Ac. Sc. Ser. B v.274 1972 n.16 p.955

- 9 Tsukui T., Kako Y. - Determination of insulating materials due to partial discharges in nitrogen gas. El.En. in Japan vol 92 No 4 1972 p.9
- 10 Kako Y - Study on deterioration characteristics of solid insulating materials by oxidation due to corona discharges ETJ of Japan Vol.8 N3/4 1963 p.97
- 11 Guyetand A. - Recherche d' une formulation theorique de la duree de vie des isolants solides.
These de 3-eme cycle Universite de Toulouse Oct.1968
- 12 Bui Ai, Guyetand A. - Studium doświadczalne i teoretyczne krzywych długości życia materiałów izolacyjnych stałych poddanych działaniu wyładowań niesupełnych.
Przeegl.Elekt. R 45 Nr 1/1969 s.22
- 13 Boeck W. - Entstehung und Bedeutung von Raumladungen in Kunststoff-Folien durch Koronaentladungen ETZ-A Bd.88 /1967/ H.26 s.647.
- 14 Narayana Rao Y - Durchschlagsvorgänge in Folieisolierungen unter Einwirkung von Koronaentladungen bei Wechselspannung Int.Symp.Hochspannungstechnik TU München März.1972 s.435
- 15 Goliński J. - Wieloetapowy mechanizm praebiecia jonizacyjnego polimerów stałych. Przeegl.Elekt.R.44 z.7/1968 s.289
- 16 Takada T., Saki T., Toriyama Y. - Evaluation of electric charge distribution in polymer films. El.En in Japan Vol.92 N.6 1972 p.28
- 17 Taylor D.M., Lewis T.J. - Electrical conduction in PET and PE films - J.Ph.D.App.Ph 1971 Vol.4 p.1346
- 18 Ruffer K. Zum Einfluss des Imprägniermittels auf die Lebensdauer von Polyäthylen Folien - Schichtungen XIX Internationales wissenschaftliches Kolloquium T.H. Ilwensau Okt. 1974 H.1 s.25

- 19 Goliński J., Labus-Kawrat K., Radwański S. - Evaluation de l'isclément des transformateurs de mesure basée sur l'intensité des décharges partielles. CIGRE 1972 Rap.15-03.
- 20 Labus-Kawrat K., Goliński J. - Badania wyładowań niezupełnych w kondensatorach. Zagadnienia Wybrane Elektrotechniki - Pomiarzy przebiegów szybkozmiennych w technice wysokich napięć SEP IEL Warszawa 1970 r.