

Dr inż. Jacek Goliński  
Mgr inż. Jerzy Słowikowski  
Zakład Wysokich Napięć  
Instytut Elektrotechniki  
Warszawa

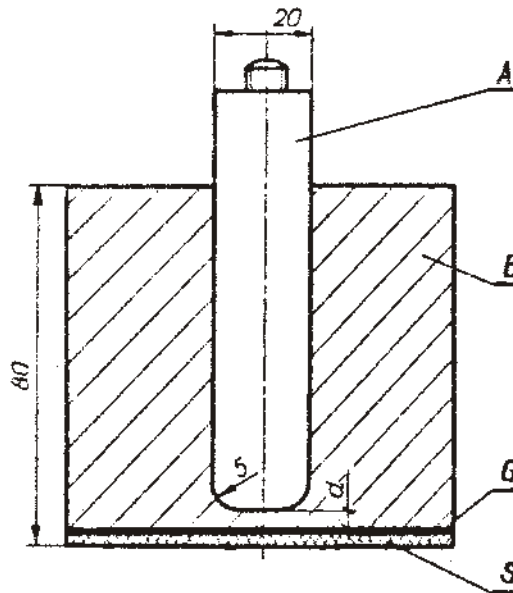
BADANIA WYTRZYMAŁOŚCI DIELEKTRYCZNEJ KOMPOZYCJI  
ŻYWIC EPOKSYDOWYCH PRZY RÓŻNYCH CZĘSTOTLIWOŚCIACH

1. Wstęp

Wytrzymałość dielektryczna kompozycji żywic epoksydowych była, jak wiadomo przedmiotem wielu prac badawczych. Istnieje również w tym względzie doświadczenie eksploatacyjne ponieważ żywice epoksydowe od prawie 20-let znajdują zastosowanie w układach izolacyjnych wielu urządzeń, w tym przekładników i rozdzielnic małogabarytowych. Tym niemniej do chwili obecnej istnieje wiele spornych poglądów w tak ważnych kwestiach, jak na przykład dopuszczalnych naprężeń roboczych, zależności wytrzymałości od grubości izolacji, wpływu temperatury, dopuszczalnej intensywności wyładowań niezupełnych itp. Ten ciągły jeszcze odczuwalny brak dostatecznej wiedzy o zachowaniu się żywic epoksydowych powoduje m.in., że warunki prób odbiorczych urządzeń elektrycznych, w których zastosowano kompozycje żywiczne, są jak dotąd ostrzejsze i bardziej skomplikowane aniżeli na przykład w przypadku urządzeń z izolacją papierowo-olejową. Tak na przykład: CEI 173 /Sec/20/ March 1971 przewiduje dla rozdzielnic z izolacją stałą próbę długotrwałą w ciągu 100 godzin przy napięciu  $1,8 U_{r \max}$  /przy zasilaniu trójfazowym/ w temperaturze odpowiadającej maksymalnemu przyrostowi temperatury powiększonemu o  $40^{\circ} \text{C}$ .

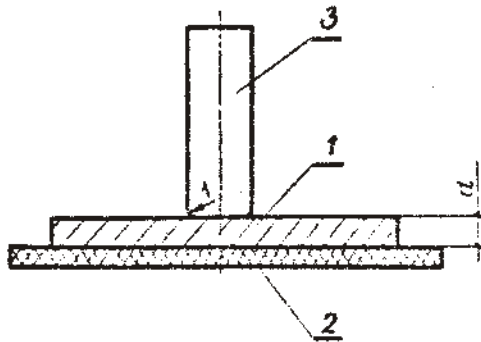
Wiele rozbieżności w ocenie zachowania się żywicy wynika, jak należy sądzić, stąd, że znajduwane na drodze doświadczalnej zależności wytrzymałości dielektrycznej od różnych czynników, mogą się dość poważnie

różnić ze względu na sposób przeprowadzenia próby. Na przykładzie wyników uzyskanych przez różnych badaczy oraz wyników prac własnych autorzy niniejszego referatu chcieliby uwypuklić powyższy problem naświetlając go przede wszystkim od strony fenomenologicznej. Wzięto pod uwagę wyniki badań w układach o quasijednorodnym i niejednorodnym rozkładzie pola elektrycznego. Na rys. 1 przedstawiono układ elektrod o polu quasijednorodnym. Układ ten był wykorzystywany przy badaniach dokonywanych wspólnie przez Zakład Wysokich Napięć IEI i IPH Berlin.



Rys.1. Układ modelowy do badania wytrzymałości dielektrycznej żywicy epoksydowej w polu quasijednorodnym:  
 A - elektroda aluminiowa WN, B - odlew badanej żywicy epoksydowej, G - warstwa grafitu rozproszanego w lakierze epoksydowym, s - siatka miedziana, d - grubość badanej żywicy

Na rys.2 przedstawiono układ elektrod stosowany w Zakładzie Wysokich Napięć IELI odpowiadający zaleceniom publikacji IEC nr.343 z 1970r. Układ ten charakteryzuje się jak wiadomo występowaniem silnych wyładowań powierzchniowych.



Rys.2. Układ do badania wytrzymałości kompozycji żywicy epoksydowych w polu niejednorodnym:

- 1 - próbka badana, 2 - elektroda uziemiona uciążliwa.
- 3 - elektroda walcowa wolframowa o średnicy 6 mm.
- d - grubość badanej próbki.

Badania omawiane w niniejszym referacie dotyczą wytrzymałości doraźnej /przebiecie - po ok. 10 s od chwili przyłożenia napięcia/, wytrzymałości przy stopniowym podnoszeniu napięcia /skokowe podniesienie napięcia o ok. 10 % wartości doraźnego napięcia przebiecia i utrzymywanie go przez określony czas np. 1 min/ oraz wytrzymałości długotrwałej. To ostatnie pojęcie wiąże się z występującym naogół dużym nachyleniem dystrybuant rozkładów czasu do przebiecia /przy ustalonych wartości napięcia probierczego/ wyznaczonych w skali prawdopodobieństwa Weibulla. Skutkiem czego prawdopodobieństwo wystąpienia przebiecia w czasie krótszym od pewnego okresu staje się bardzo niskie.

## 2. Badania w układzie z quasijednorodnym rozkładem pola.

Szereg autorów badało wpływ różnych parametrów na wytrzymałość doraźną żywicy epoksydowej różnych typów głównie Aralditu B /CT 200/, Epidianu 2 czy Epiloxu 1 [1 - 7]. Stwierdzono przy tym, obok wpływu ukształtowania elektrod [1-7] wyraźny wpływ wielkości ich powierzchni [3, 5], który można ująć [5] w zależność:

$$U_1 = U_2 - k \log \frac{S_1}{S_2} \quad /1/$$

gdzie:  $U_1$  - średnia wartość napięcia przebicia przy powierzchni elektrod  $S_1$ ,

$U_2$  - średnia wartość napięcia przebicia przy powierzchni elektrod  $S_2$ ,

$k$  - stała,

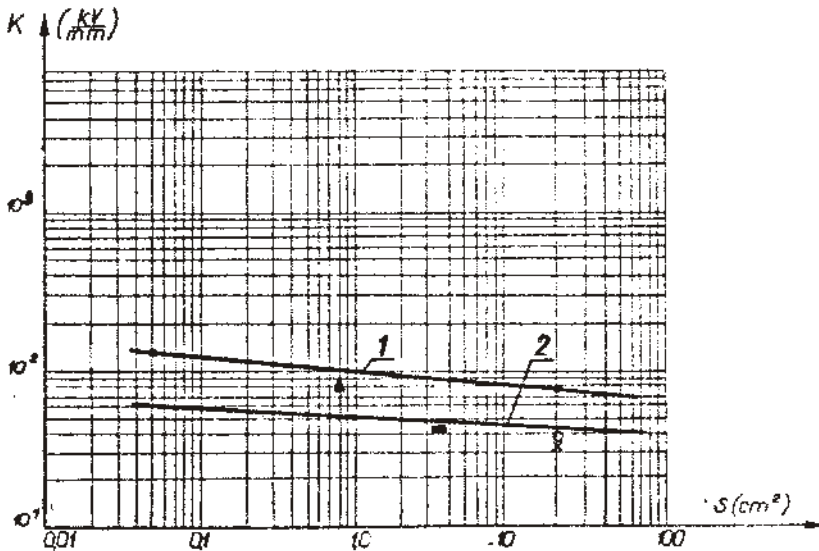
co ilustruje rys.3. Prosta 1 z tego rysunku dotyczy układu o polu praktycznie jednorodnym /tj. elektrod Rogowskiego/, a prosta 2 układu z polem quasijednorodnym.

Schifflein stwierdził znaczne /do ok. 50 %/ obniżenie wytrzymałości doraźnej w przypadku zastąpienia elektrod metalowych powłoką grafitową [5]. Leu stwierdził także obniżanie się wytrzymałości elektrycznej przy zastosowaniu na elektrodę lakieru przewodzącego. Wpływ obniżania się wytrzymałości ze wzrostem powierzchni elektrod zaobserwował jednak Leu tylko w odniesieniu do żywicy bez wypełniacza [3]. Innym parametrem, który odgrywa jednak mniejszą rolę w takich układach, jest grubość izolacji. Wykładnik potęgowy  $k$  zależności /2/ napięcia przebicia od grubości:

$$U_p = U_0 / \frac{d}{d_0} /^k \quad /2/$$

zawiera się bowiem w granicach od 0,3 do 0,98 [4, 7] podczas gdy w układach o polach niejednorodnych zawiera się w granicach 0,---0,7

[4, 7] . W odróżnieniu od parametrów ujmujących wpływ geometrii układu nie ma jednolitych poglądów co do wpływu temperatury.



Rys.3. Zależności średniej wartości wytrzymałości dielektrycznej od powierzchni elektrod w układach o polu jednorodnym /prosta 1/ lub quasijednorodnym /prosta 2/ wg. danych Schühleina [5] . Wyniki pomiarów dodatkowych: wg. [2] -  $\Delta$ , wg. IPH -  $\blacksquare$ , wg. [6] -  $\circ$ , wg. [5] z tym, że elektrody grafitowe -  $\times$ .

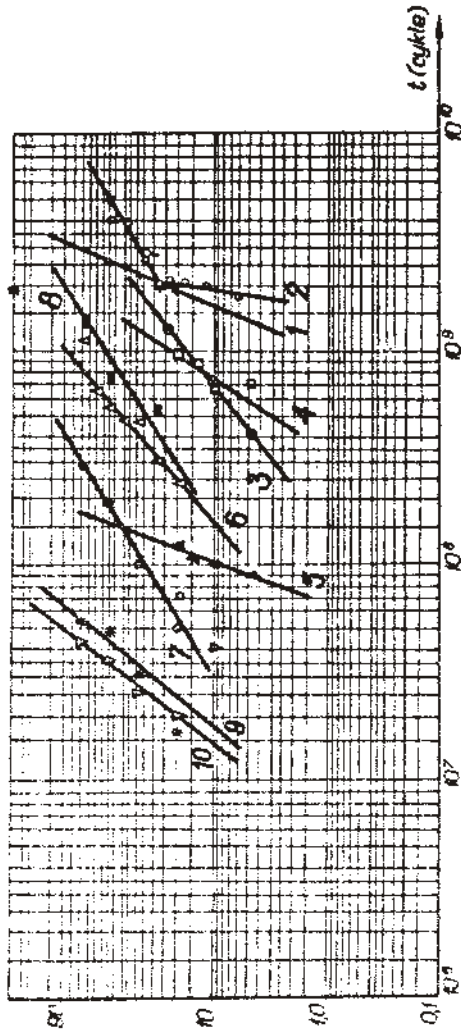
Wg. Lisieckiego [1] wytrzymałość dielektryczna żywic Epidian 3 lub 5 bez wypełniacza maleje w sposób ciągły, począwszy od temperatury 20°C, natomiast wg. Vettera [8] wytrzymałość żywicy EG-1, w zależności od ilości wypełniacza, do 115 bądź do 130°C pozostaje praktycznie bez zmian, poczem silnie maleje. Można przypuszczać, iż spadek wytrzymałości zaobserwowany przez Lisieckiego wynikał z zastosowanego układu

elektrod kulowych i spowodowany był wzrostem naprężeń mechanicznych w żywicy przy podwyższaniu temperatury.

Brak jest publikacji na temat wpływu częstotliwości na wytrzymałość w omawianych układach. Nieliczne prace poświęcone są wytrzymałości długotrwałej w polach quasi jednorodnych [2, 6]. Szczególnie związana z kierunkiem prac podjętych przez autorów referatu jest publikacja F.Schwarzera [6], który w układzie elektrod aluminiowych o powierzchni  $30 \text{ cm}^2$  o polu jednorodnym, poza wytrzymałością doraźną, badał przy napięciu o częstotliwości 50 Hz wytrzymałość długotrwałą na czasach do 10000 godz. Stwierdził on, że dla naprężeń do 15 kV/mm odpowiadających 0,5 ... 0,6 wytrzymałości doraźnej nie występują przebicia badanej żywicy. Podniesienie naprężeń do 16 kV/mm powodowało przebicie po kilku do kilkudziesięciu godzinach. Badania nasze dotyczyły modeli, o układzie elektrod zgodnym z rys.1, wykonanych w IPH Berlin także z żywicy BG1, utwardzanej bezwodnikiem kwasu ftalowego ze zmielonym kwarcem jako wypełniaczem w ilości 200 cz. wag. Skład kompozycji był taki sam jak użyty przez Schwarzera [6], przygotowanie masy i zalewanie próżniowe, czas utwardzania - 12 godz. w  $130^\circ\text{C}$ . Do masy dodawany był w ilości 2 cz.wag. barwnik  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Badania wytrzymałości elektrycznej długotrwałej przeprowadzane były przy częstotliwości 970 i 2280 Hz w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  i stanowiły, jak wspomniano na wstępie, wycinek wspólnych badań prowadzonych w ramach współpracy IPH - IBI. Badania w IPH prowadzone były w szerszym zakresie lecz tylko przy częstotliwości 50 Hz. Uwzględniały one m.in. wpływ temperatury /20, 60 i  $100^\circ\text{C}$ /.

Na rys.4 w skali prawdopodobieństwa Weibulla przedstawiono dystrybuanty czasów do przebicia przy różnych wartościach naprężeń, dla dwóch grubości izolacji /2,5 i 5 mm/ oraz dla 3 częstotliwości /50, 970 i 2280 Hz/. Badania przeprowadzono dla dwóch rodzajów populacji modeli: nieselekcjonowanych i selekcjonowanych.



Rys. 1. Dystrybuanty czasów do przebiecia badanych modeli z rys. 2, przedstawione w skali Weibulla

Opis rys.4.

Nr krzywej	d	$K_{gr}$	$/K/_{maks}$	f	Przeprowadzenie selekcji modeli	Liczba badanych modeli
-	mm	kV/mm	kV/mm	Hz	-	-
1	5,0	6	7,3	2280	nie	10
2	2,5	6	6,7	2280	tak	16
3	2,5	8	8,9	50	" x/	20
4	5,0	8	9,8	50	"x/	20
5	2,5	8	8,9	2280	nie	20
6	2,5	8	8,9	970	nie	10
7	2,5	14,5	16,2	970	tak	5
8	2,5	12	13,4	970	tak	5
9	2,5	12	13,4	970	nie	5
10	2,5	14,5	16,2	970	nie	5

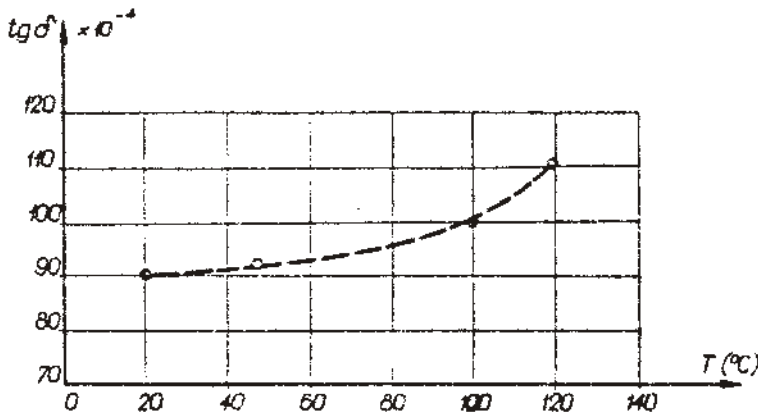
x/ selekcjonowane w IPH przez próbę wyrobu - próba 1 minutowa: 70 kV, 50 Hz i próba udarowa 170 kV.

Selekcji dokonywano przez wykonywanie prób przy jednej wartości napięcia probierczego do momentu, gdy co najmniej połowa wszystkich badanych modeli zostanie przebita. Przebiegi 1 i 2 oraz 7 i 4 z rys.4. przedstawiają dystrybuanty czasów do przebicia dla obu grubości przy jednakowych parametrach  $K_{gr}$  i f. W obu przypadkach następuje przecięcie się dystrybuant, a dłuższe czasy występują dla mniejszych grubości czyli dla mniejszych  $K_{maks}$ .

Dystrybuanty 5, 6 i 3 przedstawione na rys.4, otrzymano dla różnych częstotliwości, przy stałych wartościach  $K_{maks}$ ,  $K_{gr}$  i d. Z rysunku tego wynika, że dla układu o polu quasijednorodnym bez występowania mierzalnych wyładowań niezupełnych (dla czułości ok. 0,1 pC), dla mediany czasów do przebicia t, tak samo, jak dla układów o polu niejednorodnym z występowaniem wyładowań niezupełnych przy stałych naprężeniach, obowiązuje w przybliżeniu zależność  $t \cdot f = const$ . Podwyższenie f powoduje zmniejszenie tego iloczynu. Zaobserwowano, że



powyżej pewnej częstotliwości występuje wyraźne zwiększenie stromości dystrybuanty /prosta 5 z rys.4/. Przeprowadzone uzupełniające pomiary zależności  $\operatorname{tg} \delta$  od temperatury przy częstotliwości 2280 Hz /rys.5/ i obliczone na tej podstawie przyrosty temperatur spowodowane stratami dielektrycznymi wyniosły kilka  $^{\circ}\text{C}$ . A zatem należy tu wykluczyć możliwość wystąpienia przebiecia cieplnego czy też obniżenia się wytrzymałości dielektrycznej istotnej wskutek podwyższenia temperatury.



Rys.5. Zależność  $\operatorname{tg} \delta$  od temperatury przy napięciu  $U$  częstotliwości 2 kHz.

Zależność czasów do przebiecia od naprężeń uwidacznia się wyraźniej dla populacji modeli selekcyjonowanych /porównaj dystrybuanty 7, 8 oraz 9,10/. Przy tych samych naprężeniach mediana czasów do przebiecia jest znacznie mniejsza dla modeli nieselekcyjonowanych, przy czym dystrybuanty /9 i 10/ są bardziej strome. Podwyższenie temperatury żywicy z  $20^{\circ}\text{C}$  do  $60^{\circ}\text{C}$  wpłynęło w próbach w IPH na ponad 10-krotne skrócenie czasów do przebiecia, w stosunku do dystrybuanty 3 z rys.4, a przy próbach w temperaturze  $100^{\circ}\text{C}$  stwierdzono już tylko nieznaczne

skrócenie czasów w stosunku do temperatury  $60^{\circ}\text{C}$ . Na rys.6. przedstawiono wyniki dla układów modelowych z rys.1. z dodatkową wtrąciną powietrzną o średnicy ok. 1 mm. Dla układów takich obserwuje się bardzo znaczne /około 2,5 krotne/ skrócenie mediany czasu do przebicia, a dla krótszych czasów prawdopodobieństwo przebicia w obecności wtrąciny wzrasta wielokrotnie. Dystrybuanty układów modelowych z wtrąciną charakteryzują się dużo mniejszą stromością, co wywołane jest m.in. rozrzutami w wymiarach wtrącin. Wzrost naprężeń oraz częstotliwości, tak samo jak dla układów jednorodnych, powoduje podwyższenie stromości tych dystrybuant. Porównując otrzymane rezultaty badań wytrzymałości dielektrycznej długotrwałej z wynikami Schwarzera [5] należy stwierdzić, że wg. badań autorów referatu wytrzymałość długotrwała dla czasów do 10000 godzin przy 50 Hz tj. przy  $1,8 \cdot 10^9$  cykli jest ponad trzykrotnie niższa, gdyż zamiast 15 kV/mm jak wg. Schwarzera, otrzymano wartości leżące między 3 a 4 kV/mm. Zgodnie z poprzednio przedstawionymi wynikami badań, różnic tych nie można przypisać wyłącznie podwyższeniu częstotliwości, gdyż wg. badań w IPH do 7000 godzin przy 50 Hz wytrzymałość ta leży pomiędzy 4 a 8 kV/mm, przy czym należy dodać, że przy naprężeniach pośrednich badania nie były prowadzone. Sądzymy, że tak duże różnice zależą przede wszystkim od różnic w rodzajach materiału elektrod, ściśle biorąc elektrody uziemionej, którą w naszych badaniach stanowiła powłoka lakieru epoksydowego z proszkiem grafitowym.

Wpływ elektrod grafitowych na obniżenie wytrzymałości elektrycznej doraźnej żywic epoksydowych w polu quasijednorodnym został już na początku niniejszego punktu omówiony przy czym wg. rezultatów naszych badań wpływ ten istnieje także na wytrzymałość elektryczną długotrwałą, w polu quasijednorodnym. W przypadku pola niejednorodnego wpływ taki został stwierdzony już znacznie wcześniej [9].

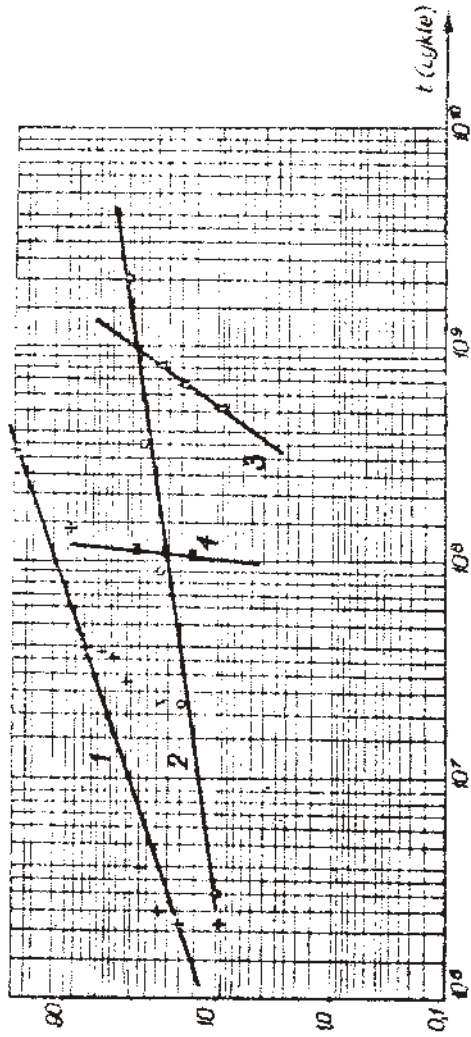


Рис. 6. Дистрибуанты часо́в до прѣбѣгца бѣдѣных модели з рис. 2 дѣла  $d = 5$  мм з додатковѣмѣм втрѣчинѣмѣм повѣтрѣзнѣмѣм о ѣреднѣцы ок. 1 мм прѣдѣставѣणे в скаѣи Веѣбулѣи.

Opis do rys. Nr 6.

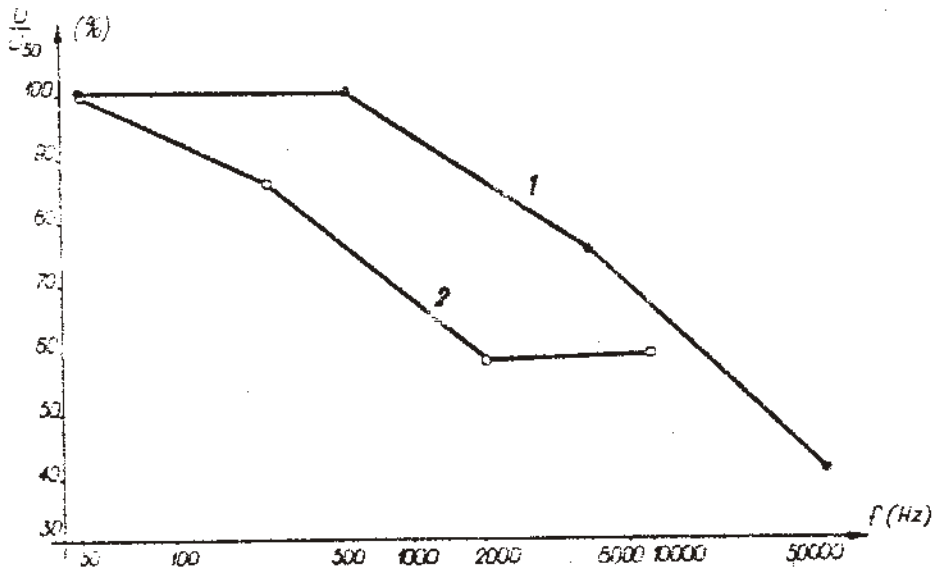
Nr krzywej	$K_{gr}$ kV/mm	$f$ Hz	Przeprowadzenie selekcji modeli	Liczba badanych modeli
1	6	970	na 6 szt.	10
2	4	970	nie	10
3	4	50	tak	10
4	4	2280	nie	6

### 3. Badania w układach z niejednorodnym rozkładem pola.

Badania w polu niejednorodnym przeprowadzono dla układu /z rys. 2/ przy czym ośrodek stanowiło powietrze lub olej silikonowy. Badano żywicę krajową Epidian 3 utwardzoną bezwodnikiem ftalowym i szwajcarską CY 205 utwardzoną HT 912, zastosowane jako syciwa papieru nawojowego o grubości 60  $\mu$ m. Grubość próbek wynosiła 0,18... 2,3 mm tj. od 2 do 20 warstw papieru. Podstawowy zakres badań dotyczył określenia wytrzymałości dielektrycznej przy jednostajnym podnoszeniu napięcia /próba doraźna/ z szybkością 0,2-2 kV/sek oraz przy stopniowym /1-minutowym/.

Zmiennymi parametrami była częstotliwość /50, 250, 2000 i 8000 Hz/ oraz temperatura w zakresie od  $-50^{\circ}$  ...  $+150^{\circ}$ C.

Na rys.7 przedstawiono wyniki badań wpływu częstotliwości na wytrzymałość dielektryczną doraźną w układzie umieszczonym w powietrzu i w oleju silikonowym, a także porównawczo przytoczono wyniki pomiarów uzyskane przez Andrzewską [10]. Obok bardzo silnego wpływu częstotliwości na zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej doraźnej można zaobserwować znaczny rozrzut wytrzymałości naszych próbek spowodowany jak należy sądzić niejednorodnością izolacji papierowej impregnowanej żywicą epoksydową. Tak znacznego wpływu częstotliwości na obniżenie wytrzymałości doraźnej nie można w żadnym przypadku

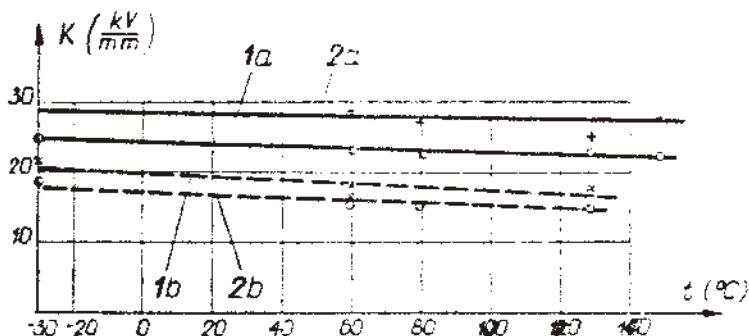


Rys.7. Zależność wytrzymałości dielektrycznej doratniej wyrażonej w % wytrzymałości dielektrycznej przy 50 Hz w funkcji częstotliwości napięcia:

krzywa 1 - wg. Andrejewa [10] - w układzie ostrze- płyta /elektrody zatopione w żywicy z wypełniaczem/,

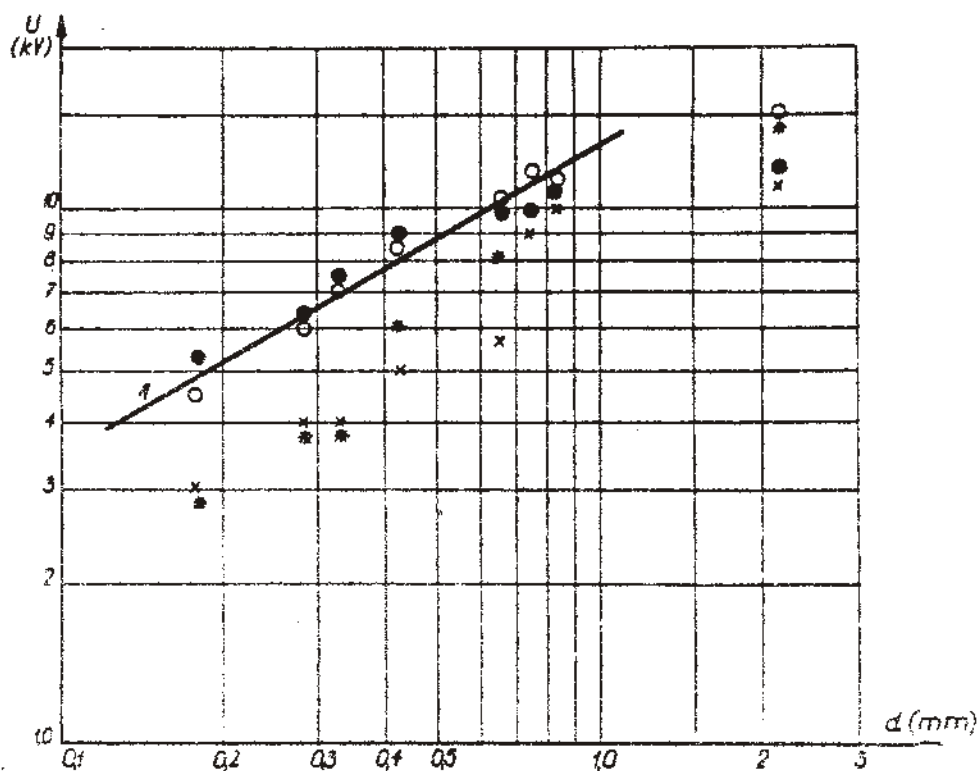
krzywa 2 - w układzie z rys.2 w przypadku badania próbek złożonych z papieru nawojowego /3 warstwy papieru o grubości 0,06 mm/ nawojonych Sp. 3.

przypisać obniżeniu się wytrzymałości dielektrycznej w wyniku lokalnego podgrzania się badanej izolacji. Świadczą o tym wyniki zależności wytrzymałości elektrycznej doraźnej od temperatury badane w tym samym układzie, przedstawione na rys.8. Jak wynika z tego rysunku w zastosowanych warunkach prób, wpływ temperatury był minimalny i praktycznie nie przekraczał rozrzutu pomiarów.



Rys.8. Zależność doraźnej /krzywe a/ i 1-minutowej /krzywe b/ wytrzymałości dielektrycznej w układzie z rys.2 od temperatury dla próbek składających się z 3 warstw papieru nawojowego przesyconego żywicą epoksydową: krzywe 1 - CY205      krzywe 2 - Ep. 3.

Wracając zatem do zależności wytrzymałości doraźnej od częstotliwości należy wpływ jej wiązać z jednej strony ze zwiększeniem, wraz ze wzrostem częstotliwości powierzchni objętej powierzchniowymi wyładowaniami niezupełnymi a zatem zwiększeniem prawdopodobieństwa dotarcia przez wyładowania do słabego /aktywnego/ punktu izolacji oraz z intensywniejszym bombardowaniem elektronowym przy podwyższeniu  $f$  i tym samym zwiększonej dyfuzji elektronów do głębszych warstw badanej izolacji [9] .



Rys.9. Zależność wytrzymałości dielektrycznej od grubości izolacji papierowej zaimpregnowanej żywicą Ep.3.

- - w układzie rys.2 przy ciągłym podnoszeniu napięcia,
- + - w układzie rys.2 przy stopniowym podnoszeniu napięcia,
- - w układzie ostrzowym przy ciągłym podnoszeniu napięcia,
- \* - w układzie ostrzowym przy stopniowym podnoszeniu napięcia,
- 1 - dla obu układów elektrod przy ciągłym podnoszeniu napięcia

Na rysunku 9 przedstawiono zależność wytrzymałości dielektrycznej od grubości izolacji przy podnoszeniu napięcia w sposób jednostajny /prosta 1/ oraz stopniami co 10 % utrzymywanymi w ciągu 1 minuty w układzie elektrod z rys.2 oraz porównawczo w układzie ostrzowym  $r = 50 \mu\text{m}$ /. Z rys.9 wynika, że dla małych grubości tj. poniżej 0,5 mm wytrzymałość w obu układach elektrod jest praktycznie taka sama, a w przypadku większych grubości w układzie z rys. 2, tj. elektrody o większej powierzchni uzyskuje się nieco niższą wytrzymałość. Wpływ grubości do 1 mm na napięcie doraźne przebicia odpowiada we wzorze /1/ wykładnikowi  $k$  równemu ok. 0,6, co pokrywa się z wynikami Bertein dla szeregu folii [11]. Przy podnoszeniu napięcia stopniami jednoczynowymi otrzymuje się większe rozrzuty i trudniej jest w tym przypadku określić ten wykładnik z wystarczającą dokładnością.

Jak należy sądzić z wyników przedstawionych w tablicy 1 wpływ na doraźną i jednoczynową wytrzymałość dielektryczną wywiera przede wszystkim jednorodność kompozycji i czystość składników, a nie wartość  $\text{tg} \delta$ .



Tablica 1.

Porównanie wytrzymałości dielektrycznej różnej i jednorodnej 1 minutowej i tgδ mierzonych przy częstotliwości 2000 Hz i 130°C różnych kompozycji żywicnych badanych w polu niejednokrotnym /układ elektrod z rys. 2/. Wytrzymałość dielektryczną i tgδ kompozycji: papier nawojowy 0,06 mm + żywica Ep 3, przyjęto za jedność.

Lp.	Rodzaj kompozycji	Doraźne napięcie przebicia	1-minutowe napięcie przebicia	Wartość tgδ kompozycji
1.	papier 0,06 - żywica Ep 3	1,0	1,0	1,0
2.	papier 0,06 - żywica CY 205	1,2	1,20	0,5
3.	papier 0,12 - żywica Ep 3	1,0	1,0	2,25
4.	bibułka kond. - żywica Ep 3	1,2	1,2	1,75
5.	żywica Ep 3 + wypełniacz kwarcowy	1,5	-	0,4

#### 4. Spostrzeżenia fenomenologiczne i praktyczne dotyczące wytrzymałości dielektrycznej.

Czas doprowadzenia napięcia jest parametrem decydującym o wytrzymałości nie-zależnie od ukształtowania elektrod tj. także w układach o polu gwałtownym.

Obok kształtu elektrod także zastosowany materiał elektrod może mieć znaczny wpływ na wytrzymałość. W przypadku żywic epoksydowych elektrody grafitowe obniżają znacznie /np. do 50 %/ zarówno wytrzymałość doraźną jak i długotrwałą. Należy zatem w konstrukcjach urządzeń elektrycznych z izolacją epoksydową unikać stosowania ekranów grafitowych zastępując je w tych przypadkach, gdzie jest to niezbędne przez metalizowanie powierzchni. Dla badanych kompozycji żywic epoksydowych /Epidian 2 utwardzany bezwodnikiem ftalowym z wypełniaczem kwarcowym lub izolacja papierowa impregnowana Epidianem 3 utwardzany bezwodnikiem ftalowym bądź ich odpowiedniki z NRD i Szwajcarii/ stwierdzono pewne obniżanie się wytrzymałości dielektrycznej długotrwałej i krótkotrwałej przy podwyższaniu częstotliwości w zakresie od 50 do 2000 Hz.

Na podstawie obliczeń opartych o wyniki pomiarów zależności  $\tan \delta$  od temperatury dla zastosowanej częstotliwości napięcia stwierdzono, że należy wykluczyć możliwość przebiegów cieplnych. Stwierdzone zjawisko obniżania się wytrzymałości przy podwyższaniu częstotliwości sugeruje ograniczenie częstotliwości przy próbach izolacji napięciem indukowanym /np. przekładników napięciowych z izolacją żywiczną/ poniżej dopuszczalnych przez normy 400 Hz. Wpływ temperatury w zakresie do temperatury zaszklania jest naogół pomijalnie mały / o ile wzrost temperatury nie powoduje efektów dodatkowych w postaci wzrostu naprężeń mechanicznych/ na wytrzymałość dielektryczną doraźną. Wzrost temperatury powoduje natomiast wyraźne obniżenie się wytrzymałości długotrwałej. Stosowane próby stabilizacji cieplnej urządzeń elektrycznych

/zwykle 48 godzin/ przy najwyższej temperaturze pracy i przy napięciach nieznacznie przewyższających najwyższe napięcie pracy nie dają dostatecznej informacji co do trwałości urządzeń, w których zastosowano kompozycje żywic epoksydowych z ekranami grafitowymi, gdyż obniżenie się wytrzymałości następuje często dopiero po paru set godzinach doprowadzenia napięcia do nagrzanego obiektu.

Omawiane wyżej zjawiska nie są sprzeczne z hipotezą wieloetapowego mechanizmu przebicia uwzględniającego rolę aktywnych punktów izolacji [9]. Warunkiem przebicia jest obniżenie wytrzymałości dielektrycznej istotnej na całej grubości dielektryka, które następuje wówczas, gdy wystarczająca ilość energetycznych, akceptorowych, poziomów dodatkowych zostanie zajęta. Podwyższenie temperatury wpływa bowiem niewątpliwie na zwiększenie szybkości dyfuzji elektronów w głąb dielektryku, a podwyższenie częstotliwości przez zwiększenie częstości emisji na przyspieszenie zajmowania tych poziomów przez elektrony wyemitowane przez aktywne punkty izolacji.

### 5. Literatura.

1. Lisiecki J. - Wytrzymałość dielektryczna żywic lanych - Materiały sem. "Żywice lano jako dielektryki"- Wrocław IX.1963 s.1.
2. Jerzykiewicz A. - Kryteria oceny prawidłowości wykonania układu izolacyjnego wysokiego napięcia z żywic epoksydowych, w badaniach gotowego wyrobu. j.w. s.24.
3. Leu J. - Durchschlagsvorgänge in Epoxidharzplatten mit künstlichen Fehlstellen. Dissertation. TH. Braunschweig 1964.
4. Schthlein E. - Zur Wandickenabhängigkeit der Durchschlagsspannung von Epoxidharz - Formstoffisolierungen. ETZ-B Bd 2c /1968/ H. 13, s.363.
5. Schthlein E. - Aussere Einflüsse auf die Durchschlagsspannung von Epoxidharz - Formstoffisolierungen. j.w. H.6, s.441.

6. Schwarzer Kl. - Langzeitverhalten von Epoxidharz - XIII. Int. Wiss.Koll. H.5 , Elektr.Isol. und Hochspannungstechn. Ilmenau 1968
7. Legros W. - Étude expérimentale de la rigidité diélectrique de l'araldite sous ondes de choc et à la fréquence industrielle - B.S.AIM. 1970, Nr.2, p.81.
8. Vetter E. - Der Wärmedurchschlag von Epoxydharz. Elektrie nr.9 1960, s.309.
9. Goliński J. - Wieloetapowy mechanizm przebiecia jonizacyjnego polimerów stałych. P.E. XLIV 1968, z.7, s.289.
10. Andrejew W.E., Riabow B.M. - Elektriczeskaja procznost' epoksidnych kompowdow pri powyszennych czastotach. IWUZ Energetika 1964, Nr.5, s.105.
11. Bertein H. - Etude du mécanisme de la perforation des isolants solides sous l'action des décharges partielles. Identification d'un critère intrinsèque de tenue des isolantes à la tension. RGE 1970, t.79, n.6, p.497.