

taki kabel na 60 kV, wyrobu fabryki Jeumont, demonstrowany na wystawie fizycznej w Paryżu 1923 r.

### 3. Straty elektryczne w kablach.

Określenie dobroci kabla przez pomiar jego wytrzymałości na przebicie, nie uważa się obecnie jako wystarczające. Jak w każdym dielektryku, tak samo i w izolacji kabla występują straty, które mogą być do pewnego stopnia charakterystyczne dla danego kabla. Straty te są przy prądzie stałym inne, niż przy zmiennym. Powstają one nie tylko skutkiem przepływu prądu przez dielektryk, — przyczem ciepło wywiązujące się jest niezależne od rodzaju prądu, a proporcjonalne do kwadratu napięcia przyłożonego, — lecz również skutkiem histerezy dielektrycznej, występującej przy prądzie zmiennym; wtedy zaś zależne są od jednolitości struktury dielektryku.

Dawniej kwalifikowano kabel jedynie według jego oporności izolacji, mierzonej przy prądzie stałym o niskim napięciu. Dążenie do dobrej izolacji wymagało się w stosowaniu materiałów niehygroskopijnych, o dużej oporności właściwej. Dlatego stosowano jako izolację przeważnie papier nasycony żywicą. Okazało się to wkrótce niepraktyczne, zwłaszcza przy coraz wyższych napięciach. Skutkiem takiej impregnacji papier stawał się sztywny i łamał się przy fabrykacji lub układaniu kabli, co powodowało zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej. Przejście do papierów giętkich, nasyconych olejem, podniosło wytrzymałość elektryczną, choć oporność izolacji zmalała. Ta ostatnia, jakkolwiek maleje znacznie z rosnącą temperaturą kabla, jest jednak jeszcze tak duża, że straty skutkiem wpływu prądu przez izolację są za małe, aby zaważyć na dobroci kabla. Pomiar przeto samej oporności, bez zbadania wytrzymałości elektrycznej jest jednak nie wystarczający do określenia dobroci kabla, oba winny iść w parze.

Ale jeszcze z innego powodu nie można polegać na podaniu wartości oporności izolacji, pomierzonej prądem stałym. Przy prądzie zmiennym zachodzą bowiem szczególne zjawiska, zmieniające wynik pomiaru i powodujące straty elektryczne, zależne, w przeciwieństwie do tamtych, od częstotliwości. Straty te, jakkolwiek już dawniej znane, zostały bliżej zbadane dopiero w ostatnich latach, kiedy

poznano ich duże znaczenie przy określaniu dobroci materiałów izolacyjnych.

Straty dielektryczne tego rodzaju, jak poznaaliśmy poprzednio, nie występują w dielektryku jednorodnym. Ponieważ takich dielektryków w praktyce nie ma, bo każdy jest więcej lub mniej niejednorodny, mamy przeto z nimi zawsze do czynienia.

Strata mocy w dielektryku kabla wyraża się, jak wiadomo (p. str. 7):

$$P = V I_u = V I \sin \delta,$$

gdzie  $V$  jest napięciem przyłożonym do kabla,  $I_u$  — prądem upływowym ( $I_u = I_s + I_h$ ),  $I$  prądem rzeczywistym,  $\delta$  zaś — kątem stratności.

Uwzględniając, że upływność  $A = \omega C \operatorname{tg} \delta$ , otrzymamy

$$P = A V^2 = \omega C V^2 \operatorname{tg} \delta \quad (5)$$

Ponieważ straty są — jak widać — proporcjonalne do kwadratu napięcia przyłożonego, przeto

$$A = \omega C \operatorname{tg} \delta = \frac{P}{V^2} = \text{const.}$$

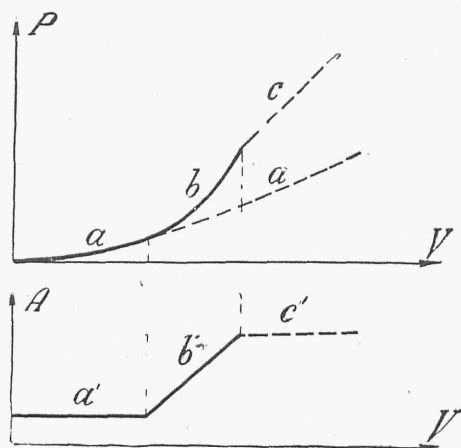
i może służyć jako miara kąta stratności  $\delta$  jeżeli  $C$  jest to samo. Z drugiej strony, skoro  $C$  i  $\omega$  są stałe, musi również  $\operatorname{tg} \delta$  pozostawać stałym; jest on rzędu 0,02.

Na wielkość strat mają wpływ trzy czynniki: napięcie, czas trwania naprężenia i temperatura. Poznamy, jak się zachowują upływność w zależności od nich.

*Wpływ napięcia.* — Przy małych napięciach zachodzi zupełna proporcjonalność strat do kwadratu napięcia (Rys. 72,\*) t. zn.  $A$  jest wtedy stałe, od  $V$  nie zależne, a zatem, przy tem samym  $C$  i  $f$ ,  $\operatorname{tg} \delta = \text{const.}$  Powyżej pewnej wartości krytycznej  $V_j$ , straty zaczynają jednak prędzej rosnąć (krzywa  $b$  odbiega od paraboli  $a$ ), charakterystyka zaś  $A = f(V)$  doznaje załamania. Zjawisko to tłumaczymy sobie powstawaniem jonizacji w porach izolacji, gdzie zawarte powietrze poddane jest naprężeniu, zwiększonemu skutkiem dużej różnicy stałej dielektrycznej: jej go oraz izolacji kabla. Po przekroczeniu krytycznej wartości napięcia ( $V_j$ ) zjawisko jonizacji występuje więc i powoduje zwiększenie przewodności

\*) Rys. 72 do 75 wykonane są na podstawie referatu v. Staverena na Konferencji wielkich sieci elektr. w Paryżu, 1923

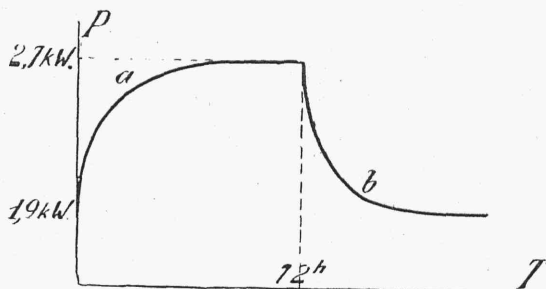
izolacji, a zatem i upływności. Wysokość tego napięcia, charakterystyczna dla izolacji kabla, nazywa się napięciem jonizacji kabla. Zależnie od rodzaju struktury izolacji, bywa ono róż-



Rys. 72.

ne. Im bańki powietrzne są drobniejsze, czyli im izolacja bardziej zwarta, tem napięcie jonizacji wyższe, to zn. jonizacja występuje przy wyższym napięciu.

Przy dalszem zwiększaniu napięcia następuje, znowu od pewnej granicy, powtórne załamanie charakterystyki, lecz w przeciwnym kierunku (krzywa c); charakterystyka przyjmuje prawie pierwotny przebieg. Świadczy to o pewnym stanie nasycenia, skoro już wszystkie cząstki zostały zjonizowane.

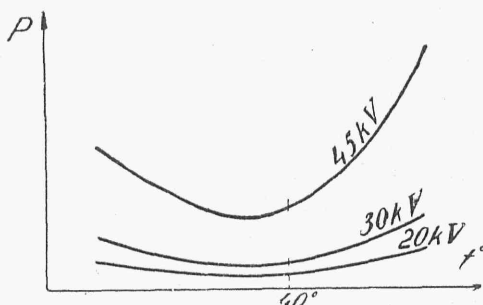


Rys. 73.

*Wpływ czasu trwania naprężenia.*—Jeżeli dielektryk kabla znajduje się pod napięciem, przewyższającym napięcie jonizacji, to straty w nim rosną z czasem i osiągają pewną ustaloną wartość (Rys. 73

krzywa *a*). Po ustaniu naprężenia maleją one znów do pierwotnej wartości (krzywa *b*), następuje więc regeneracja kabla. Proces ten trwa zwykle dosyć długo (kilka dni). Tłumaczymy to znowu wpływem jonizacji, która trwa tak długo, aż wszystkie pęcherzyki powietrza zostaną zjonizowane; po ustaniu przyczyny jonizującej powoli wraca stan pierwotny.

*Wpływ temperatury.* — Badania wykazują, że straty początkowo maleją powoli z temperaturą, osiągają minimum i potem szybciej rosną (Rys. 74). Im wyższe jest napięcie przyłożone, tem wyraźniejszy jest ten przebieg; wszystkie zaś minima wypadają przy temperaturze ok.  $40^{\circ}\text{C}$ . Zwiększanie się strat z temperaturą, począwszy od pewnej granicy, jest objawem niepożądanym, mogącym spowodować nadmierne ogrzanie się kabla, bez możliwości odprowadze-



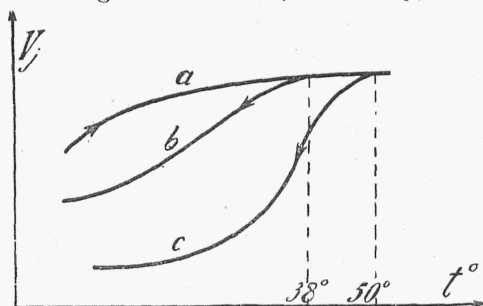
Rys. 74.

nia ciepła. Stąd wskazówka, aby nie dopuszczać do ogrzewania się kabli ponad  $50^{\circ}\text{C}$ ., zwłaszcza, jeżeli napięcie przekracza wartość krytyczną dla jonizacji. Temperatura ma jednak także wpływ i na napięcie jonizacji, a mianowicie rośnie ono wraz z temperaturą. Pochodzi to prawdopodobnie stąd, że z temperaturą rośnie ciśnienie powietrza, zawartego w porach, a napięcie jonizacji powietrza rośnie, jak wiadomo, z ciśnieniem, a maleje z rozmiarem baniek powietrznych. O ile zaś zamknięte bańki powietrzne mogą się zwiększać tylko nieznacznie, pozostaje przeważający wpływ prężności na napięcie jonizacji, które zatem się zwiększa.

Przy oziębianiu jednak kabla, poddanego poprzednio ogrzewaniu, napięcie jonizacji w funkcji temperatury nie osiąga takich samych wartości, jak

podczas przebiegu ogrzewania (Rys. 75, krzywa *a*), lecz jest mniejsze i to tem mniejsze, im do wyższej temperatury był kabel ogrzany (krzywe *b* i *c*). Tłumaczymy to zjawiskiem, że skutkiem ogrzewania, zwłaszcza przy wyższych temperaturach, bańki powietrzne przecież nieco się zwiększają (choć wpływ zwiększania prężności przeważa, aby wywołać zwiększenie napięcia jonizacji). Materia izolacji nie jest jednak tak elastyczna, aby ze spadkiem temperatury, kiedy ciśnienie spada, zmniejszyć z powrotem wielkość baniek. Przeważa więc wpływ zwiększenia objętości i, przy zmniejszeniu ciśnienia, napięcie jonizacji wypada mniejsze przy oziębianiu kabla, niż przy ogrzewaniu, przy tych samych temperaturach.

Ogrzewanie kabla, które powoduje zwiększenie strat dielektrycznych, ma jednak i przeciwny wpływ na te straty. Kabel ogrzany wykazuje po oziębieniu straty mniejsze. Pochodzi to prawdopodobnie stąd, że skutkiem ogrzania materia izolacyjna staje się



Rys. 75.

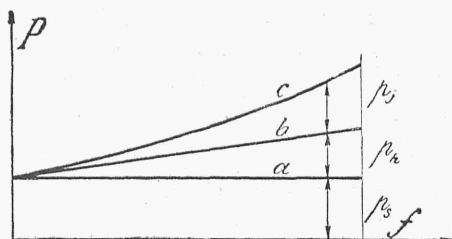
bardziej plastyczna i bardziej jednolita; a takie materiały mają mniejszą stratność dielektryczną.

Przy nadmiernem nagrzaniu się kabla powietrze, w nim zawarte, rozszerza się tak silnie, że wypiera materię impregnacyjną, zwłaszcza w miejscach słabych pod względem elektrycznym (pęknięcia papieru) i papier tam wysycha, kruszy się i zwęglą powoli. Wytrzymałość kabla w tych miejscach maleje.

Straty w dielektryku pochodzą, jak wiadomo, skutkiem przewodności izolacji, histerezy dielektrycznej i jonizacji powietrza w materiale izolacyjnym. Ponieważ straty hysterezy są proporcjonalne do częstotliwości, przeto można rozdzielić straty w dielektryku, mierząc sumę strat przy różnych częstotliwościach. (Rys. 76, krzywa *c*). Straty skutkiem przewodności ( $p_s$ ) są stałe, niezależnie od częstotliwo-

ści (prosta  $a$ ). Przy częstotliwości 0 straty hysterezo-  
we ( $p_i$ ) nie występują; przedstawia je prosta  $b$ . Różni-  
ca rzędnych  $c$  i  $b$  określi straty na jonizację ( $p_j$ ). Stra-  
ty skutkiem przewodności są zwykle przeważające;  
w dobrych kablach wynoszą ok. 80% wszystkich strat  
w dielektryku.

Z poprzedniego widoczne jest, jak ujemnie na  
wytrzymałość kabli wpływa nadmierna temperatura  
i zjawiska jonizacji, pochodzące od nadmiernych na-  
prężeń elektrycznych. Należy zatem unikać tego pod-  
czas normalnej pracy kabla. Przejściowe takie prze-  
ciężenia kabla nie szkodzą mu, o ile nie są zbyt duże.  
Kabel regeneruje się potem prawie zupełnie, jednak  
dopiero po upływie pewnego czasu (kilka dni), zależ-  
nie od stopnia przeciążenia i dobroci izolacji.



Rys. 76.

Zjawiska jonizacji wystąpią tem później, im stała  
dielektryczna materiału izolacyjnego jest mniejsza.  
Wskazuje to na korzyść stosowania właśnie materia-  
łów o małej stałej dielektrycznej przy wyrobie kabli.

Z tych względów, przy ocenianiu dobroci kabla  
należy brać pod uwagę nie tylko stratność dielektrycz-  
ną (względnie kąt stratności), wytrzymałość na prze-  
bicia oraz giętkość kabla, jak to dotąd jest w po-  
wszechnem prawie użyciu, ale również wysokość na-  
pięcia jonizacji; które zawsze powinno być niższe, niż  
napiecie robocze. Na podstawie różnych badań mo-  
żna przyjąć 4 kV/mm, jako granicę górną dopuszczal-  
nego naprężenia izolacji przy żył kabla, powyżej  
której zjawia się jonizacja.

Rozumie się, że powinno się pozostawać z napię-  
ciem roboczym znacznie poniżej tej wartości.

*Straty w płaszczu.* — Inne źródło strat w kablu  
stanowią straty w płaszczu ołowianym, względnie  
w pancerzu kabli jednożyłowych. Płaszcz ten można

bowiem uważać jako zwarte uzwojenie wtórne transformatora, którego uzwojeniem pierwotnem jest żyła.

Siła elektromotoryczna wzbudzona w płaszczu powoduje powstawanie prądu w kierunku długości kabla. Straty te są bardzo małe; w przybliżeniu można ich wielkość uwzględnić jako dodatkową stratę skutkiem przewodności.

Przy kablach jednofazowych stosowanie pancerza żelaznego powoduje straty skutkiem prądów wirowych i hysterezy większe, niż przy trójfazowych.

---