

# PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN STOWARZYSZENIA ELEKTROTECHNIKÓW POLSKICH.

WYCHODZI 1-go i 15-go KAŻDEGO MIESIĄCA.

<p><b>PRZEDPŁATA:</b>                  kwartalnie . . . . . zł. 6.—                  _____                  Cena zeszytu 1 zł.                  _____</p>	<p>Biuro Redakcji i Administracji: Warszawa, Czackiego № 5 m 24, I piętro                  (Gmach Stowarzyszenia Techników), telefon № 90-23.                  _____                  Administracja otwarta codziennie od g. 12 do g. 4 po poł.                  _____                  - Redaktor przyjmuje we wtorki od godziny 7-ej do 8-ej wieczorem. -                  _____                  Konto № 363 Pocztovej Kasy Oszczędności.</p>	<p><b>CENNIK OGŁOSZEŃ:</b>                  Ogłoszenia jednoraz. na 1/1 str. zł. 120                  " " na 1/2 " " 75                  " " na 1/4 " " 40                  " " na 1/8 " " 20                  Strona tytułowa (I) 50 proc. drożej,                  " okładki zewn. (II) 20% " "                  " " wewn. (III) i (III) 20% droż.                  Ogłoszenia strony tytułowej przyjmowane                  są tylko całostronicowe.                  Podwyżka cennika ogłoszeń obowiązuje                  wszystkie już złożone ogłoszenia od dnia                  zmiany cen bez uprzedniego zawiadom</p>
---	--	--

Rok VII.

Warszawa, 1 grudnia 1925 r.

Zeszyt 23.

## Kable wysokiego napięcia <sup>1)</sup>.

Prof. **K. Drewnowski.**

Kabel, służący do przesyłania energii elektrycznej, składa się z jednej lub kilku, izolowanych od siebie, żył przewodzących, z warstwy izolacyjnej, izolującej i te żyły od siebie i od ziemi, i z płaszczu metalowego (ołowianego), pokrytego nadto zwykle pancierzem stalowym. Kabel jednożyłowy przedstawia zatem kondensator walcowy, którego jedną okładziną jest żyła, drugą — płaszcz, a dielektrykiem — warstwa izolacyjna. Kabel wielożyłowy uważać zaś można jako układ kondensatorowy, przy którym występują pojemności żył między sobą i względem ziemi.

Kable, stosowane do wysokiego napięcia, wymagają bardzo starannego wykonania przy wyrobie ich i używaniu; na pierwszy plan wysuwa się kwestja wytrzymałości elektrycznej układu oraz strat w izolacji kabla.

### 1. Naprężenia elektryczne w kablach.

a) *Kable jednożyłowe.* — Nowoczesne kable wysokiego napięcia mają prawie wyłącznie izolację jednolitą z papieru, nasyconego substancją izolacyjną, Rys. 1, przedstawia taki kabel na 60 kV elektrowni Dessau-Bitterfeld.

W kablu jednożyłowym, który uważamy jako kondensator walcowy (Rys. 2), naprężenie izolacji w p.  $x$  pod wpływem przyłożonego napięcia  $V$  jest, jak wiadomo,

$$F_x = \frac{V}{x \log_n \frac{R}{r}} \quad \text{V/cm,}$$

gdzie  $R$  jest promieniem wewnętrznym okładziny zewnętrznej w cm, a  $r$  — promieniem żyły.

Największe naprężenie izolacji będzie tuż przy żyłce kabla, gdyż tam  $x = \text{min.} = r$ ; będzie tam:

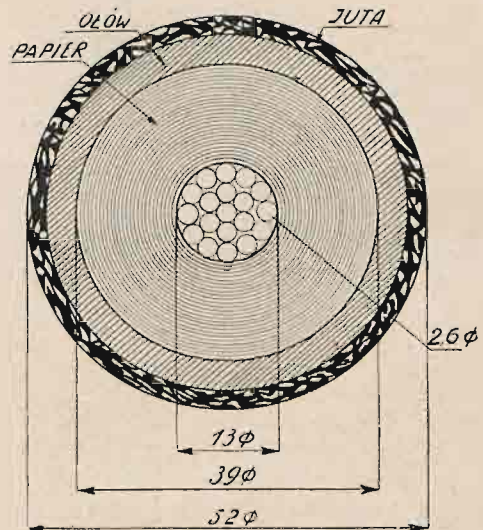
$$F_r = \frac{V}{r \log_n \frac{R}{r}} = F_{\text{max}}$$

To naprężenie powinno być mniejsze od wartości krytycznej  $F_0$ , dopuszczalnej dla danego materia-

łu izolacyjnego. Napięcie robocze  $V$  nie powinno zatem przekroczyć wartości krytycznej:

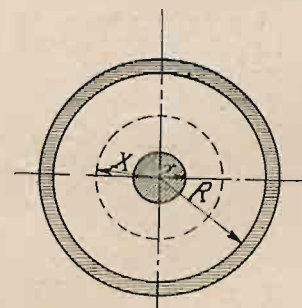
$$V_0 = F_0 r \log_n \frac{R}{r} \quad \dots \quad 1)$$

Zwykle  $V$  jest, ze względów na pewność ruchu, kilkakrotnie mniejsze od  $V_0$ .



Rys. 1.

Stosunek naprężenia krytycznego  $F_0$ , właściwego dla materiału izolacyjnego danego układu, do naprę-



Rys. 2.

żenia  $F$ , występującego na powierzchni żyły przy napięciu roboczym  $V$ , nazywa się stopniem bezpieczeństwa kabla:  $\delta = \frac{F_0}{F}$ . Oczywiście także  $V_0 = \delta V$ .

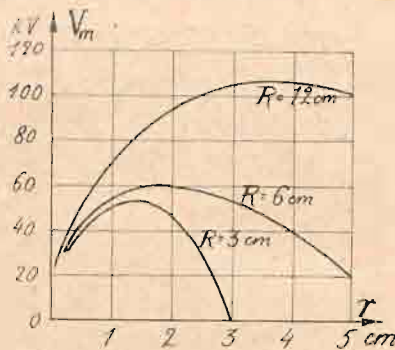
<sup>1)</sup> Ciąg dalszy serii artykułów o materiałach i układach izolacyjnych, (p. Przegl. Łf. 1925. Nr. 9, 10, 16, 19, 20).

Napężenie  $F$  zależy, jak wiemy, nie tylko od grubości izolacji,  $d = R - r$ , ale i od stosunku promieni  $\frac{R}{r}$ . Najkorzystniejszy stosunek  $\frac{R}{r}$ , czyli najkorzystniejsza grubość izolacji, t. j. taka, przy której kabel wytrzyma jeszcze największe napięcie ( $V_0$ ), otrzymamy (według rozdziału, traktującego w podstawach wytrzymałości elektrycznej \*) dla  $\frac{R}{r} = e = 2,718...$ , skąd najkorzystniejszy promień żyły przy danym promieniu  $R$  kabla

$$r = \frac{R}{e} = 0,368.. R$$

Jeżeli ten stosunek nie jest zachowany, to zawsze otrzymamy izolację gorzej wykorzystaną, a przy tej samej średnicy zewnętrznej kabla — mniej wytrzymałą.

Napięcie krytyczne dla tej samej grubości izolacji zatem również nie jest stałe, lecz zależy od stosunku promieni kabla i żyły. Stosunki tu zachodzące przedstawia Rys. 3, na którym przedstawiono  $V_0 = f(r)$



Rys. 3.

dla różnych  $R = \text{const}$ . Z rosnącą grubością żyły  $r$  przy stałym promieniu kabla  $R$ , napięcie krytyczne  $V_0$  rośnie, osiąga maximum i spada. Jest więc jakaś najdogodniejsza wartość grubości żyły (dla  $R/r = e$ ), przy której napięcie krytyczne wypada największe; będziemy mieli zatem jakiś przekrój, dla którego koszt izolacji jest najmniejszy. Niesłuszne jest przeto mniemanie, że izolacja kabla jest zawsze tem pewniejsza, im jest grubsza.

Zakładając pewien stopień bezpieczeństwa  $\delta$ , można z łatwością obliczyć minimalną grubość izolacji  $d$  w zależności od promienia żyły dla danego napięcia roboczego  $V$ . Ponieważ  $V_0 = V$ , a  $R = r + d$ , przeto równanie (1) można napisać w formie:

$$\delta \cdot V = F_0 r \log_e \frac{r+d}{r} \quad \dots \quad 2)$$

skąd grubość izolacji

$$d = r (e^{\frac{\delta V}{F_0 r}} - 1) \quad \dots \quad 3)$$

Wstawiliśmy do (2) najkorzystniejszą wartość stosunku  $\frac{R}{r} = e$ , otrzymamy:

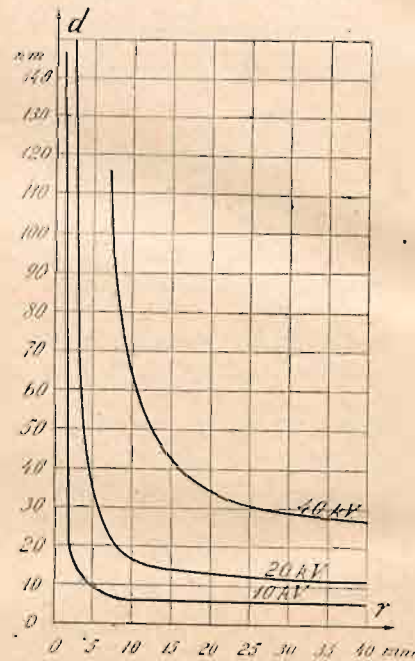
$$r = \frac{\delta \cdot V}{F_0}$$

jako najkorzystniejszy promień żyły dla danego napięcia roboczego, przy założonym stopniu bezpieczeństwa i znanem napięciu krytycznym  $F_0$ . Promień kabla ( $R$ ) jest wtedy najmniejszy.

Jeżeli mamy przepisane napiężenie izolacji  $F = \frac{F_0}{\delta}$ , to powyższe dwa wzory przekształcają się w

$$d = V (e^{\frac{V}{F r}} - 1) \quad \text{i} \quad r = \frac{V}{F}$$

Na Rys. 4 \*) przedstawiony jest przebieg  $d = f(r)$



Rys. 4.

dla napiężenia  $F_0 = 2 \text{ kV/cm}$  i różnych napięć roboczych. Widać z niego, że grubość izolacji maleje szybko z rosnącym promieniem żyły, — jak tego należało się spodziewać —, ale tylko do pewnych granic, poczem grubość żyły niema prawie wpływu na grubość izolacji. Promień zaś kabla ( $R$ ) (Rys. 5) wykazuje minimum dla pewnej grubości żyły. Charakterystyczne jest, że te minima leżą na prostej przechodzącej przez początek osi współrzędnych; odpowiadają one stosunkowi  $r = \frac{V}{F}$  względnie  $r = \frac{\delta V}{F_0}$ , stosownie do powyższych wywodów.

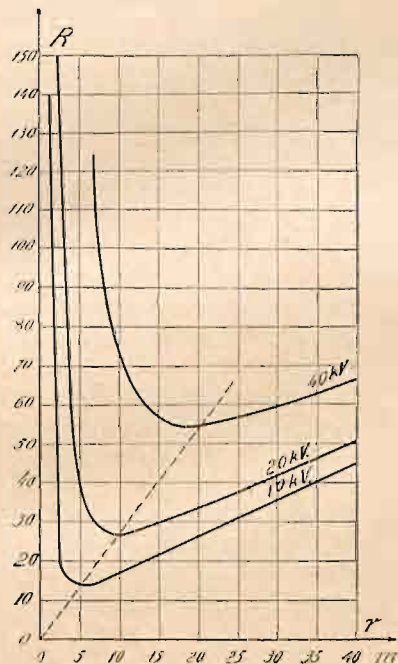
Promień kabla, t. j. zewnętrzny promień izolacji, przepisany jest często względami na konstrukcję i układanie kabla. Kable grubsze, niż 15 cm. średnicy, są nader trudne do układania i nawijania na bębny do przewożenia tak, że grubszych kabli nie spotyka się.

Mając daną średnicę zewnętrzną izolacji, oblicza się jej grubość tak, aby dla danego napięcia roboczego  $V$  i przyjętego stopnia bezpieczeństwa wzgl. przepisanego maksymalnego napiężenia  $F$ , wypadła ona najkorzystniejsza. Kontroluje się zatem, czy  $d$  odpowiada temu warunkowi. Jeżeli przytem  $r$  trzeba zmniejszyć, to sprawdza się, czy przekrój żyły nie

\*) p. Przegl. El. 1925 Nr. 10 str. 147.

\*) Rys. 4 i 5 wzięte są z art. P. Humanna w ETZ. 1910, Nr. 50.

wypadnie za mały. Może jednak wypaść, że trzeba będzie  $r$  powiększyć. Wtedy, żeby cena kabla nie była zbyt wygórowana, nie można brać zbyt grubej żyły miedzianej; trzeba zatem zastosować sztuczne zwiększenie przekroju żyły, co może być uskutecznione różnymi sposobami. Przedewszystkiem można dać rdzeń z juty lub z konopi, a na to pochwę z właściwych drutów przewodzących (miedzianych); sposób



Rys. 5.

ten jednak jest niepraktyczny, bo rdzeń ściska się przy wyrobie, a pochwa zniekształca. Można pokryć miedzianą żyłę pochwą z drutów nie miedzianych, np. żelaznych lub aluminiowych; z powodu nierównego wydłużania się drutów wywołuje ona jednak w kablu nierównomierne naprężenia. Najlepiej cel się osiąga, otaczając przewodzącą żyłę pochwą ołowianą gładką, równą i mocno ściskającą całość. Zamiast żyły miedzianej można też brać żyłę aluminiową (o mniejszej przewodności), przez co też zwiększa się przekrój żyły. W każdym przypadku kontroluje się, czy naprężenie izolacji nie przekracza dopuszczalnych granic.

Żeby izolacja w miejscach bardziej naprężonych była bardziej wytrzymała, można ją podzielić na warstwy o różnych stałych dielektrycznych, malejących z odległością od osi żyły; bliżej rdzenia mieliśmy większą stałą i przez to mniejsze naprężenie, a dalej od rdzenia, mniejsza stała dielektryczna, powodowałaby względnie większe naprężenie izolacji.

Również można zastosować uwarstwienie z materiałów o różnych wytrzymałościach i różnych stałych dielektrycznych. Bliżej rdzenia umieszcza się warstwę o małej stałej i dużej wytrzymałości; naprężenie będzie tam wprawdzie większe, ale warstwa może jeszcze je wytrzymać.

Dla przykładu przytoczę kabel jednożyłowy, który był demonstrowany na wystawie w Medjolanie w 1906 r.

Miał on izolację, składającą się z czterech warstw; z nich pierwsze trzy miały gumę z domieszką talku, siarki i tlenku cynku, w rozmaitych propor-

cjach, ostatnia zaś warstwa była z przetłuszczonego papieru. Stałe dielektryczne poszczególnych warstw, licząc od żyły, miały wartości następujące: 6,1; 4,7; 4,2; 4,0. Żyła miedziana była pokryta pochwą ołowianą dla otrzymania gładkiej powierzchni; średnica żyły wynosiła 16,5 mm, razem z ołowiem — 18 mm; grubość izolacji tylko 14,5 mm. Kabel ten był przeznaczony do napięcia 100 kV.

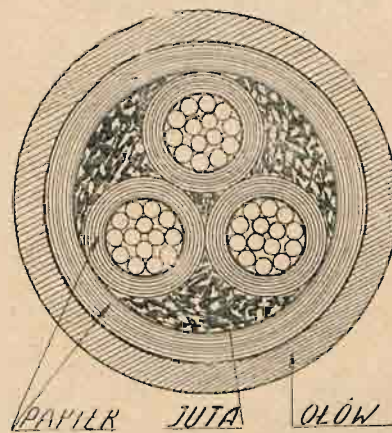
Sposoby te są teoretycznie dobre, ale trudne do wykonania i zatem niepraktyczne. Kable takie nie znalazły zastosowania, gdyż zbyt skomplikowana konstrukcja znacznie podnosi koszt wyrobu, a nadto przy takiej konstrukcji nie można liczyć na zachowanie z biegiem czasu własności elektrycznych przez poszczególne warstwy izolacji, co wywołałoby znaczne pogorszenie własności elektrycznych kabla. Były też różne inne pomysły w tym względzie, uważać je jednak trzeba na razie jako próby. Obecnie jedynie kable z jednolitą izolacją papierową są zupełnie pewne w użyciu.

Kable jednożyłowe wyrabia się obecnie jako normalne do 60 kV i więcej. Tytułem próby pracują zaś kable na 132 kV (np. fabryki Pirelli w Medjolanie<sup>1)</sup>).

b) *Kable wielożyłowe.* — Kable wielożyłowe mogą być koncentryczne lub skręcone.

Kable koncentryczne, dwu- lub trójżyłowe, składają się naprzemian z warstwy izolacji, warstwy miedzi, znów izolacji i t. d.; mają one pole niejednostajne; stosuje się je przy napięciu do kilku tysięcy woltów.

Kable skręcone mają żyły izolowane oddzielnie i skręcone między sobą. Mają one pole bardziej jednostajne, niż tamte, przez co otrzymuje się prawie jednakowe naprężenia w kablu. Wyrabia się je już normalnie do 45 kV, a zaczyna się je stosować



Rys. 6.

do 66 kV. Kable skręcone mogą być o żyłach okrągłych lub profilowanych; te ostatnie mają pole mniej jednostajne, tak, że nie używa się ich powyżej 9 000 woltów. Przestrzeń między poszczególnymi żyłami, izolowanymi papierem, zapełnia się jutą, wszystko otacza się znowu izolacją papierową, a na to nakłada się płaszcz ołowiany, oraz ewentualnie pancierz żelazny lub stalowy ze wstęg lub drutów skręconych.

Kable trójżyłowe są naprężane pomiędzy żyłami napięciem międzyfazowym, a pomiędzy kablem a ziemią napięciem fazowym. W razie zwarcia z ziemią

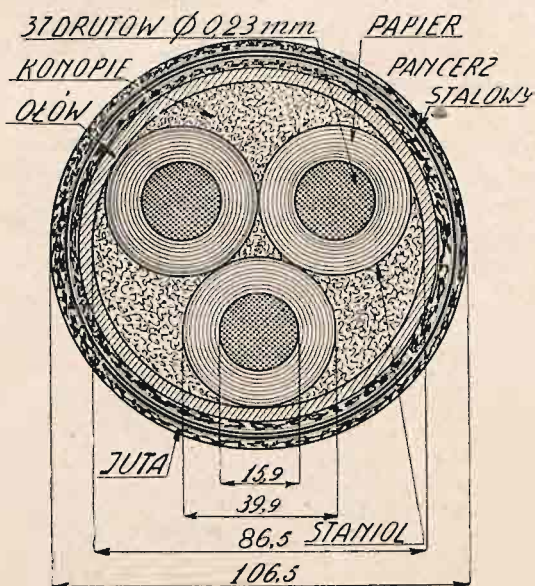
<sup>1)</sup> Konferencja wielkich sieci elektr. w Paryżu, 1925, p. Przegl. Elektr. 1925 Nr. 19.

jednej fazy, dwie inne znajdują się względem ziemi pod napięciem skojarzonym, przeto izolacja kabla winna być obliczona na to napięcie.

Wobec tego, że izolacja jutowa i papierowa mają różne stałe dielektryczne, — co może wywołać nierównomierne naprężenia, — należy w tych bardziej naprężonych miejscach kabli trójżyłowych, t. zn. przy zetknięciu izolacji żyły z izolacją kabla, stosować taką samą izolację dla uniknięcia niejednakowego naprężenia.

Jeżeli przy wysokich napięciach trudności dobrej izolacji kabla wypadną zbyt duże, można, zamiast jednego kabla trójżyłowego, stosować trzy jednożyłowe, koszt ich jednak będzie wtedy znacznie większy.

W ostatnich latach stosują owinięcie izolacji poszczególnych żył kabla trójfazowego płaszczem metalowym (staniol). W ten sposób otrzymuje się czyści promieniowe naprężenia izolacji tych żył. Przez zastosowanie takiej osłony elektrostatycznej otrzymuje się — pod względem rozkładu pola — niejako 3 oddzielne kable jednożyłowe. Rys. 7 przedstawia



Rys. 7.

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

## 2. Straty 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 nietylko skutkiem przepływu prądu przez dielektryk, — przyczyną ciepła wywiązującego 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 wyrażało się w stosowaniu materiałów niehygroskopij-

nych, 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 upływu 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 dielektryczne, 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.

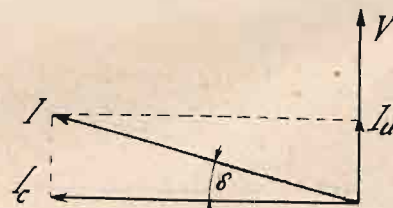
Straty dielektryczne tego rodzaju, jak poznaliśmy poprzednio, nie występują w dielektryku jednorodnym. Ponieważ takich dielektryków w praktyce nie ma, bo każdy jest więcej lub mniej niejednorodny, mamy przeto z nimi zawsze do czynienia.

Strata mocy w dielektryku kabla wyraża się, jak wiadomo:

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

gdzie  $V$  jest napięciem przyłożonym do kabla,  $I_u$  — prądem wpływowym ( $I_u = I_s + I_h$ ),  $I$  prądem rzeczywistym,  $\delta$  zaś — kątem stratności. (Rys. 8).

Uwzględniając, że  $I = \frac{I_c}{\cos \delta}$ , a  $I_c = \omega C V$ , otrzy-



Rys. 8.

mamy:

$$P = V I_c \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = V I_c \operatorname{tg} \delta = \omega C V^2 \operatorname{tg} \delta;$$

ponieważ zaś  $\frac{A}{\omega C} = \operatorname{tg} \delta$ , czyli  $A = \omega C \operatorname{tg} \delta$ , przeto

$$P = A V^2 = \omega C V^2 \operatorname{tg} \delta \quad \dots \quad 4)$$

straty w izolacji kabla są więc proporcjonalne do kwadratu napięcia.

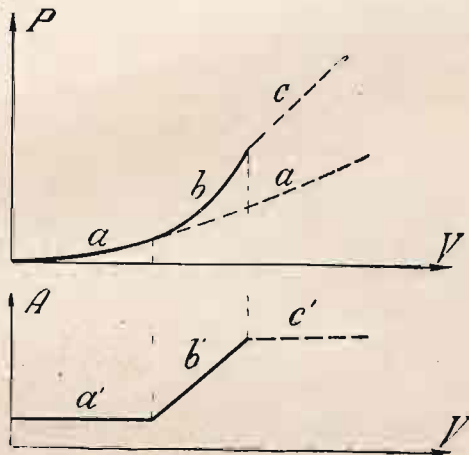
Ponieważ straty są proporcjonalne do kwadratu napięcia przyłożonego, przeto  $A = \frac{P}{V^2} = \omega C \operatorname{tg} \delta =$

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  $\text{tg } \delta$  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. 9), \*) t. zn.  $A$  jest wtedy stałe, od  $V$  niezależne, a zatem przy tem samym  $C$  i  $f$  —  $\text{tg } \delta = \text{const}$ . Powyżej pewnej wartości krytycznej  $V_j$ , straty zaczynają jednak prędzej rosnać (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 stałych dielektrycznych: je-



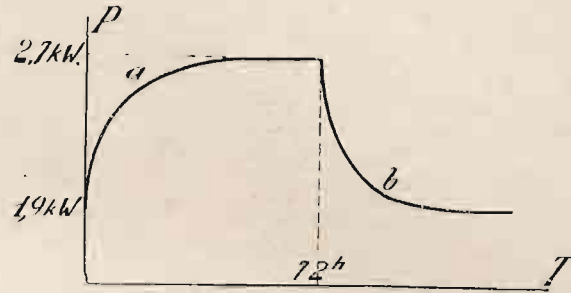
Rys. 9.

go oraz izolacji kabla. Po przekroczeniu krytycznej wartości napięcia ( $V_j$ ) zjawisko jonizacji występuje więc i powoduje zwiększenie przewodności izolacji, a zatem i upływności. Wysokość tego napięcia, charakterystyczna dla izolacji kabla, nazywa się napięciem jonizacji kabla. Zależnie od rodzaju struktury izolacji, bywa ona różna. Im bańki powietrzne są drobniejsze, czyli im izolacja bardziej zwarta, tem napięcie jonizacji wyższe, to zn. jonizacja występuje przy wyższym napięciu.

Przy dalszym 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.

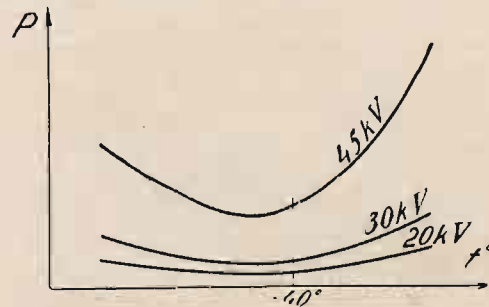
**Wpływ czasu trwania naprężenia.** — Jeżeli dielektryk kabla znajduje się pod napięciem, przewyższającym napięcie jonizacji, to straty w nim rosna z czasem i osiąga pewną ustaloną wartość. (Rys. 10 krzywa  $a$ ). Po ustaniu naprężenia maleją znów do pierwotnej wartości (krzywa  $b$ ), następuje więc 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, osiągną minimum i potem szybciej rosna (Rys. 11). Im



Rys. 10.

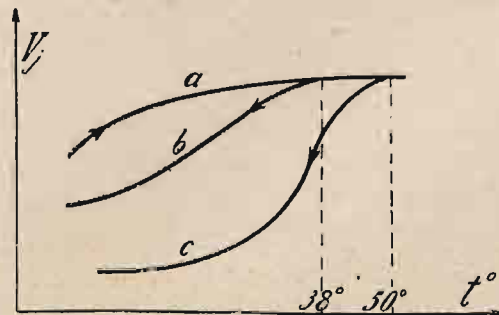
wyższe jest napięcie przyłożone, tem wyraźniejszy jest ten przebieg; wszystkie zaś minima wypadają przy temperaturze ok. 40° C. Zwiększanie się strat z temperaturą, począwszy od pewnej granicy, jest objawem niepożądanym, mogącym spowodować nadmierne ogrzanie się kabla, bez możliwości odprowadze-



Rys. 11.

nia ciepła. Stąd wskazówka, aby nie dopuścić do ogrzewania się kabli ponad 50° 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. 12, krzywa  $a$ ), lecz



Rys. 12.

jest mniejsze i to tem mniejsze, im do wyższej temperatury był kabel ogrzany (krzywe  $b$  i  $c$ ). Tłumaczymy to

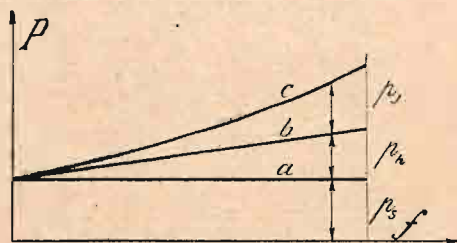
\*) Rys. 9, 10, 11 i 12 wykonane są na podstawie referatu v. Staverena na Konferencji wielkich sieci elektr. w Paryżu, 1923.

zjawiskiem, że skutkiem ogrzewania, zwłaszcza przy wyższych temperaturach, bańki powietrzne przecież nieco się zwiększają (choć wpływ zwiększania prężności przeważa, aby wywołać zwiększenie napięcia jonizacji). Materja 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 materja izolacyjna staje się bardziej plastyczna i bardziej jednolita; a takie materjały mają mniejszą stratność dielektryczną.

Przy nadmiernem nagraniu się kabla powietrze, w nim zawarte, rozszerza się tak silnie, że wypiera materję 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 hysterezoze są proporcjonalne do częstotliwości, przeto można rozdzielić straty w dielektryku, mierząc sumę strat przy różnych częstotliwościach. (Rys. 13, krzywa c). Straty skutkiem



Rys. 13.

przewodności ( $p_s$ ) są stałe, niezależnie od częstotliwości (prosta a). Przy częstotliwości 0 straty hysterezoze ( $p_h$ ) nie występują; przedstawia je prosta b. Różnica rzędnych c i b określi straty na jonizację ( $p_j$ ). Straty 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 naprężeń elektrycznych. Należy zatem unikać tego podczas normalnej pracy kabla. Przejściowe takie przeciążenia kabla nie szkodzą mu, o ile nie są zbyt duże. Kabel regeneruje się potem prawie zupełnie, jednak dopiero po upływie pewnego czasu (kilka dni), zależnie od stopnia przeciążenia i dobroci izolacji.

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

Z tych względów, przy ocenianiu dobroci kabla należy brać pod uwagę nie tylko stratność dielektryczną (względnie kąta stratności), wytrzymałość na prze-

bicia oraz giętkość kabla, jak to dotąd jest w powszechnem prawie użyciu, ale również wysokość napięcia jonizacji; które zawsze powinno być niższe, niż napięcie robocze. Na podstawie różnych badań można przyjąć 4 kV/mm, jako granicę górną dopuszczalnego naprężenia izolacji przy żyłach kabla, powyżej której zjawia się jonizacja.

Rozumie się, że powinno się pozostawać z napięciem roboczym znacznie poniżej tej wartości.

Przepisy holenderskie np. dla kabli 10 kV wymagają wyznaczenia punktu jonizacji, który powinien być wyższy od 14 kV, podczas badania kabla przy napięciu wzrastającym stopniowo od 5 do 25 kV i normalnej temperaturze otoczenia. Następnie to samo określa się przy temperaturze 40° C. Wtedy, przy napięciu poniżej 14 kV, wartość upływności nie powinna być większa, niż dwa razy od znalezionej przy temperaturze normalnej. Pozatem wartość ta nie powinna przekraczać 0,001 W/kV<sup>2</sup> na 1 metr. Następnie to samo mierzy się po ostudzeniu kabla do temperatury 10—15° C. Napięcie jonizacji powinno leżeć wtedy powyżej 12,5 kV. — Określenie punktu jonizacji odbywa się przez pomiar upływności, punkt załamania prostej  $A = f(V)$  jest właśnie punktem jonizacji.

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 pierwotnym 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 wirujących i histerezy większe, niż przy trójfazowych.

## Koszt linii dalekonośnych o wysokim napięciu.

(Streszczenie referatu, wygłoszonego przez E. V. Panella na Międzynarodowej Konferencji wielkich sieci w Paryżu w czerwcu 1925 r.).

Stosowanie napięć coraz wyższych (55, 110, 165, 220 kV) wpływa z potrzeb gospodarczych. Wysokie napięcia zmniejszają bezpośrednio lub pośrednio kosztą zakładowe i eksploatacyjne na jednostkę mocy. Dotyczy to przede wszystkim wielkich sieci, czyli urządzeń do przesyłania energii z dużych elektrowni na znaczne odległości. Na wybór napięcia odległość ma mniejszy wpływ, niż moc; przy odległości 100 do 200 km wszelkie napięcie między 55 i 220 kV może być uznane za najbardziej ekonomiczne, zależnie od mocy i innych warunków.

W Stanach Zjednoczonych utworzono przez połączenie urządzeń sąsiednich olbrzymie sieci, których rozciągłość dochodzi do 2 000 km. Jedna taka sieć