

czas trwania ulotu jest dłuższy przy krzywej płaskiej niż przy ostrej.

Straty z powodu ulotności, jakkolwiek w normalnych warunkach niewielkie, mogą w niekorzystnych warunkach stać się stosunkowo znaczne (parę kW na kilometr). To też przy obliczaniu przewodów należy skontrolować, jakie straty będą i dobrać odpowiednie odstępy przewodów, a nawet ich grubości tak, aby napięcie ulotu nie było większe od napięcia roboczego, ale jednak możliwie się do niego zbliżało (ze względu na koszt przewodów i słupów).

Dla przykładu podam, że przy 110 kV przewody o przekroju  $70 \text{ mm}^2$  (10,5 mm grube) pracują normalnie bez większych strat skutkiem ulotności. Jednak przy 220 kV musiałyby one mieć przekrój  $360 \text{ mm}^2$ , t. j. ok. 25 mm średnicy, aby straty te utrzymać na tej samej wysokości. Przewód taki pod względem obciążenia prądem elektrycznym byłby bardzo źle wyzyskany. Celem lepszego wyzyskania stosujemy przewody z materiału o mniejszej przewodności właściwej n. p. aluminiowe lub stalowo-aluminiowe zamiast miedzianych, lub też nawet — w ostatnich latach — linki wydrażone, o średnicy do 40 i więcej milimetrów.

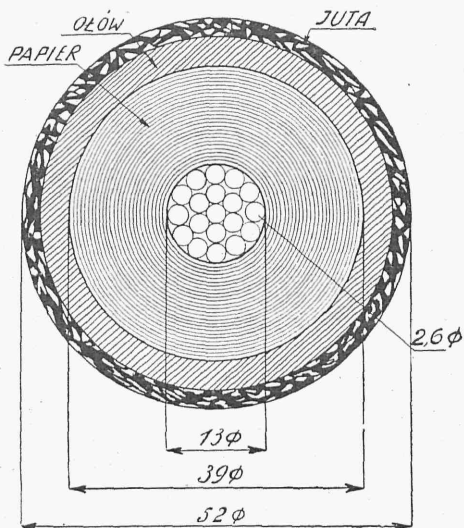
W niektórych przypadkach ulot nawet może być pożyteczny, gdyż skutkiem działania wentylowego może tłumić przepięcia (t. j. nagłe, zwykle krótkotrwałe, podskoki napięcia roboczego).

## 2. Naprężenia elektryczne w kablach.

Kabel, służący do przesyłania energii elektrycznej, składa się z jednej lub kilku, izolowanych od siebie, żył przewodzących, z warstwy izolacyjnej, izolującej te żyły od siebie i od ziemi, i z płaszcza metalowego (ołowianego) pokrytego nadto zwykle pancerzem 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.

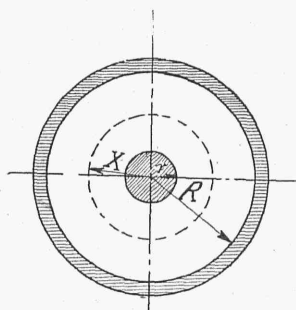
Kable, stosowane do wysokiego napięcia, wymagają bardzo starannego wykonania przy wyrobie ich i używaniu; na pierwszy plan wysuwa się kwestja wytrzymałości elektrycznej układu oraz strat w izolacji kabla.

*Kable jednożyłowe.* — Nowoczesne kable wysokiego napięcia mają prawie wyłącznie izolację jednolitą z papieru, nasyczonego substancją izolacyjną; Rys. 65 przedstawia taki kabel na 60 kV.



Rys. 65.

W kablu jednożyłowym, który uważamy jako kondensator walcowy (Rys. 66), naprężenie izolacji



Rys. 66.

w odległości  $x$  od osi kabla 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  $x = \min. = r$ ; będzie tam:

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

To naprężenie powinno być mniejsze od wartości krytycznej  $F_0$ , dopuszczalnej dla danego materiału izolacyjnego. Napięcie robocze  $V$  nie powinno zatem przekroczyć wartości krytycznej:

$$V_0 = F_0 r \log_n \frac{R}{r}. \quad (2)$$

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

Stosunek naprężenia krytycznego  $F_0$ , właściwego dla materiału izolacyjnego danego układu, do naprężenia  $F$ , występującego na powierzchni żyły przy napięciu roboczym  $V$ , nazywa się stopniem pewności kabla:  $\Delta = \frac{F_0}{F}$ . Oczywiście także  $V_0 = \Delta V$ .

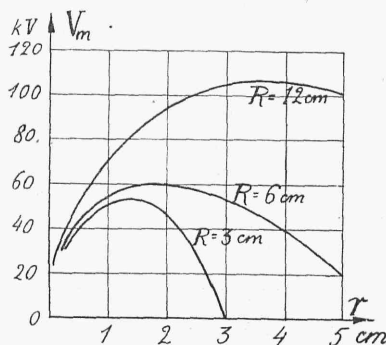
Naprężenie  $F$  zależy, jak wiemy, nie tylko od grubości izolacji,  $d = R - r$ , ale i od stosunku promieni  $\frac{R}{r}$ . Najkorzystniejszy stosunek  $\frac{R}{r}$ , czyli najkorzystniejsza grubość izolacji, t. j. taka, przy której kabel wytrzyma jeszcze największe napięcie ( $V_0$ ), otrzymamy (według Rozdz. I. str. 23) 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. 67, na którym przedstawiono  $V_m = V_0 = f(r)$  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.



Rys. 67.

Zakładając stopień pewności  $\Delta$ , można z łatwością obliczyć minimalną grubość izolacji  $d$  w zależności od promienia żyły dla danego napięcia roboczego  $V$ . Ponieważ  $V_0 = \Delta V$ , a  $R = r + d$ , przeto równanie (2) można napisać w formie:

$$\Delta \cdot V = F_0 r \log_n \frac{r+d}{r} \quad (3)$$

skąd grubość izolacji

$$d = r \left( e^{\frac{\Delta \cdot V}{F_0 r}} - 1 \right) \quad (4)$$

Wstawiając do (3) najkorzystniejszą wartość stosunku  $\frac{R}{r} = e$ , otrzymamy:

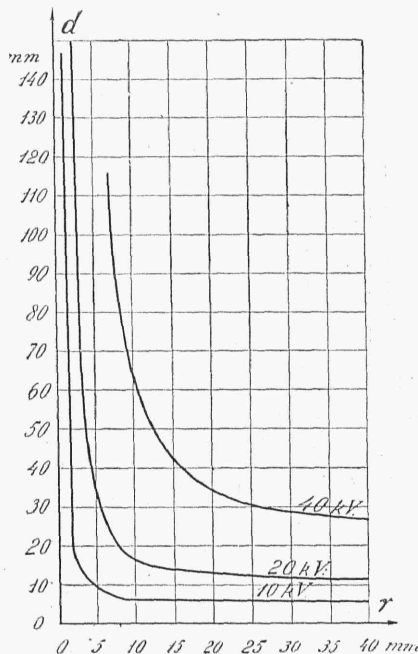
$$r = \frac{\Delta \cdot V}{F_0},$$

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

Jeżeli mamy przepisane napężenie izolacji  $F = \frac{F_0}{\Delta}$ , to powyższe dwa wzory przekształca się w

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

Na Rys. 68\*) przedstawiony jest przebieg  $d=f(r)$  dla napężenia  $F_0 = 2 \text{ kV/mm}$  i różnych napięć roboczych. Widać z niego, że grubość izolacji maleje szybko z rosnącym promieniem żyły, — jak tego na-

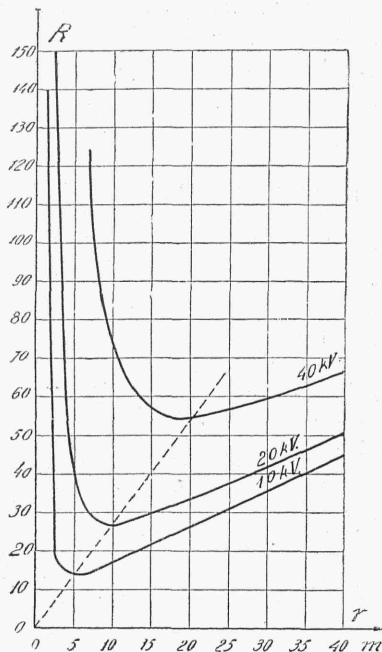


Rys. 68.

leżało się spodziewać —, ale tylko do pewnych granic, poczem grubość żyły nie ma prawie wpływu na grubość izolacji. Promień zaś kabla ( $R$ ) (Rys. 69) 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.

\*) Rys. 68 i 69, wzięte są z art. P. Humanna w ETZ. 1910, Nr. 50.

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 bęben do przewożenia tak, że grubszych kabli nie spotyka się.



Rys. 69.

Mając daną średnicę zewnętrzną izolacji, oblicza się jej grubość tak, aby dla danego napięcia robocznego  $V$  i przyjętego stopnia pewności wzgl. przepisanego maksymalnego naprężenia  $F$ , wypadła ona najkorzystniejsza. Kontroluje się zatem, czy  $d$  odpowiada temu warunkowi. Jeżeli przytem  $r$  trzeba zmniejszyć, to sprawdza się, czy przekrój żyły nie 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 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 wywołują 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 naprężanych była bardziej wytrzymała, można ją podzielić na warstwy o różnych stałych dielektrycznych, malejących z odległością od osi żyły; bliżej rdzenia mielibyśmy 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 wprowadzić 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 proporcjach, ostatnia zaś warstwa była z przetłuszczanego 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 gładziej 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

---

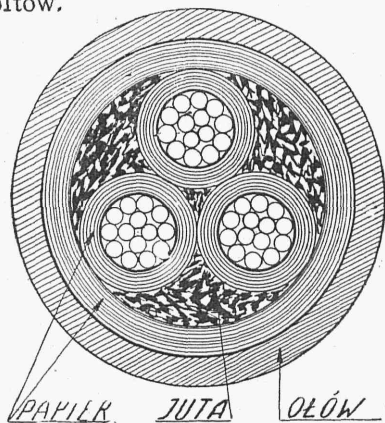
\*) p. Przegl. Elektr. 1921, Nr. 1.

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. fabryka Pirelli w Medjolanie\*).

*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.



Rys. 70

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 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 10 000 woltów. Przestrzeń między poszczególnymi żyłami, izolowanymi papierem, wypełnia 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. (Rys. 70).

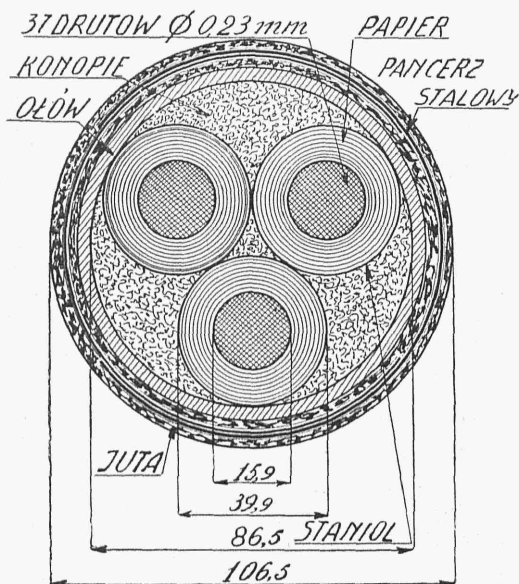
\*) Konfer. wielk. sieci elektr. Paryż, 1925; p. Przegl. Elektr. 1925 Nr. 19.



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



Rys. 71.

W ostatnich latach stosują owinięcie izolacji poszczególnych żył kabla trójfazowego płaszczem metalowym (staniol). W ten sposób otrzymuje się czysto promieniowe naprężenia izolacji tych żył. Przez zastosowanie takiej osłony elektrostatycznej otrzymuje się — pod względem rozkładu pola — niejako 3 oddzielne kable jednożyłowe. Rys. 71 przedstawia

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 przepływania 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 wyrażało 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 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 elektryczne, zależne, w przeciwieństwie do tamtych, od częstotliwości. Straty te, jakkolwiek już dawniej znane, zostały bliżej zbadane dopiero w ostatnich latach, kiedy