

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN STOWARZYSZENIA ELEKTROTECHNIKÓW POLSKICH.

Wychodzi 1-go i 15-go każdego miesiąca.

Przedpłata:
rocznie Mk. 1200,—
półrocznie " 600,—
kwartalnie " 300,—
Cena numeru niniejszego Mk. 60,—
Sprzedaż numerów pojedynczych
we wszystkich większych księgarniach.

Biuro Redakcji i Administracji: Warszawa, ul. Czackiego (daw. Włodzimierska) № 5, m. 28, III piętro, (Gmach Stowarzyszenia Techników), telefon № 90-23.

Administracja otwarta codziennie od godziny 11-ej do 2-ej i od 5-ej do 8-ej wieczorem.

Redaktor przyjmuje we wtorki od godziny 7-ej do 8-ej wieczorem.

Konto Nr. 363 Pocztovej Kasy Oszczędności.

Cennik ogłoszeń od 1 sierpnia r. b.:
Ogłosz. Jednoraz. na 1/4 str. Mk. 7500,—
" " na 1/2 " " 4000,—
" " na 3/4 " " 2300,—
" " na 1 " " 1500,—
Strona tytułowa (I) 100 proc. drożej,
okładki zewn. (IV) 50%
" wewnątrz (II i III) 20% droż.
Ogłoszenia strony tytułowej przyjmowane są tylko całostronicowe.
Ogłoszenia przyjm. Administracja, Czackiego 5, III p., m. 28, tel. 90-23 i biura ogłosz.

Rok III.

Warszawa, dnia 1 sierpnia 1921 r.

Zeszyt 14.

T R E Ś Ć:

- | | |
|---|--|
| 1. Fizyczne podstawy wytrzymałości elektrycznej materiałów izolacyjnych — inż. pułk. K. Drewnowski. | 5. „Przegląd Elektrotechniczny“ na Targu Poznańskim. |
| 2. Kooperatywy elektryczne — inż. Wacław Puwłowski. | 7. Wiadomości bieżące. |
| 3. Spawanie elektryczne — M. | 8. Przegląd czasopism. |
| 4. Składnice węgla — inż. Stefan Mazur. | 8. Nowe wydawnictwa. |

OD ADMINISTRACJI.

Pomimo wciąż wzrastających kosztów wydawnictwa Administracja „Przeglądu Elektrotechnicznego“ dotychczas nie podniosła cen prenumeraty, wyznaczonych jeszcze w końcu roku zeszłego. Ceny te, nieproporcjonalnie niskie w porównaniu do cen innych wydawnictw, nie stoją już obecnie w żadnym stosunku do kosztów wydawnictwa. Pragnąc prowadzić nadal pismo nie tylko w dotychczasowym rozmiarze, ale je jeszcze możliwie rozszerzyć tak, aby mogło rzeczywiście ono odpowiadać wymaganiom współczesnej elektrotechniki, Administracja widzi się zmuszoną podnieść obecnie cenę prenumeraty do wysokości 300 mk. kwartalnie, począwszy od 1 sierpnia r. b.

II Zjazd Elektrotechników Polskich w Toruniu

odbędzie się od 8 do 11 września r. b.

Komitet Gospodarczy Zjazdu w Toruniu (inż. A. Hoffmann, Mostowa 13^{III}) prosi o niezwłoczne zgłaszanie uczestnictwa w Zjeździe celem zapewnienia mieszkań.

Fizyczne podstawy wytrzymałości elektrycznej materiałów izolacyjnych.

Napisał inż. pułk. K. Drewnowski¹⁾.

1. Zagadnienia techniki wysokich napięć. Ubiegły dziesiątek lat zaznaczył się w elektrotechnice wysunięciem na porządek dzienny całego szeregu kwestji, związanych z przesyłaniem energii elektrycznej w coraz większych ilościach, na coraz dalsze odległości, co pociągało za sobą stosowanie coraz to wyższych napięć. Przed elektrotechnikiem, tak praktykiem, jak teoretykiem, stawały różne zagadnienia, które należało rozwią-

zać, aby zapewnić sobie prawidłowy i spokojny ruch urządzeń elektrycznych, służących do wytwarzania, przesyłania i odbierania energii elektrycznej, który przy stosowaniu wyższych napięć narażony był na częste zaburzenia, wynikające z przebicia izolacji, nadmiernych prądów i t. p.

Z szeregu wylaniających się tu zagadnień, największą uwagę zwróciły trzy następujące sprawy:

1. sprawa wytrzymałości izolacji przewodów, maszyn i t. p. w normalnych warunkach,
2. sprawa ochrony urządzeń elektrycznych od nagłych podskoków napięcia czyli przepięć i
3. sprawa zabezpieczenia tych urządzeń od nadmiernych prądów czyli przetężeń.

Przy niskim napięciu sprawy te były stosunkowo łatwe do rozwiązania:

¹⁾ Odczyt wygłoszony w Warszawskim Kole Stow. Elektrotechników dn. 31 maja 1921 r.

— izolacja była prawie że zapewniona, gdyż jej wielkość, uwarunkowana względami wytrzymałości mechanicznej, przekraczała wymiary wymagane przez wytrzymałość elektryczną;

— przepięcia nie dawały się silniej odczuwać przy małych odległościach; zresztą z punktu widzenia wysokiego napięcia można uważać urządzenie o niskim napięciu — a więc mające zwykle małą oporność izolacyjną — prawie jako uziemione, tak, że np. wyładowania statyczne były odrazu odprowadzane do ziemi; przetężenia zaś przy małej ilości energii były stosunkowo niewielkie i zwykle zabezpieczenia wystarczały w zupełności.

Przy wyższym napięciu, dużych odległościach i znacznej mocy powyższe sprawy komplikowały się niepomniernie. Proste zwiększanie grubości izolatorów, stosowanie ochronników o zwiększonych wymiarach (rozładowanych lub innych), względnie bezpieczników lub wyłączników samoczynnych — nie wystarczało. Należało rzecz zbadać głębiej, poznać dokładnie mechanizm zjawiska i obmyśleć środki zapobiegawcze i zabezpieczające.

Tak powstały nowe działy nauk elektrotechnicznych z zakresu techniki wysokich napięć, traktujące:

- o *wytrzymałości elektrycznej* i jej zastosowaniu przy budowie izolatorów, kabli, urządzeń i t. p.;
- o *przepięciach* i ochronie przed nimi;
- o *przetężeniach* i urządzeniach zabezpieczających od przetężeń, opierające się na teoretycznym ujęciu zjawisk, występujących w polu elektromagnetycznym, podczas stanu ustalonego i nieustalonego.

Kwestja pola elektrycznego i magnetycznego wysuwa się tu na plan główny, tu bowiem odbywają się wszelkie zjawiska elektryczne. Przy badaniu wytrzymałości elektrycznej obracamy się wyłącznie w polu elektrycznym; przy przepięciach występują pola magnetyczne i elektryczne, przy przetężeniach — prawie wyłącznie pole magnetyczne.

W ten sposób powyższe trzy działy są w sobie zamknięte i wzajemnie się uzupełniają.

W dalszym ciągu po kolei przedstawię w krótkości dzisiejsze poglądy na każdy z tych działów, rozpoczynając od *podstaw wytrzymałości elektrycznej*.

2. **Zjawiska.** Jakkolwiek przepisy bezpieczeństwa określają 250 V jako granicę między napięciem niskim a wysokim, to rozgraniczenie takie ma jedynie na względzie bezpieczeństwo życia ludzkiego przy bezpośrednim zetknięciu się z przewodami elektrycznymi. Dopiero urządzenia na kilka tysięcy woltów wyróżniają się wybitnie pod względem technicznym od urządzeń niskiego napięcia. Następny etap, rzucający się w oczy, zachodzi dopiero przy kilkudziesięciu tysiącach woltów (60–80 kV), gdzie stosujemy inne formy i konstrukcje. Górną granicą tej strefy *bardzo wysokich napięć* jest obecnie stokilkadziesiąt tysięcy woltów, jakie niejednokrotnie spotykamy (150 kV w Ameryce, 110 kV w Europie). Wyżej — to obecnie dziedzina laboratoryjna, chociaż już w Ameryce i w Niemczech

pracują teraz nad wykonaniem praktycznym urządzeń na 220 kV.

W rozmaitych warunkach towarzyszą wysokiemu napięciu różne zjawiska przeważnie świetlne, charakteryzujące stan środowiska. Zwiększając stopniowo napięcie, np. między elektrodami kulkowymi, zaobserwujemy kolejno światełko błękitnawe, jarzące się na okolo elektrody, jest to t. zw. *wyładowanie jarzące* — które stopniowo przejdzie w *wyładowanie snopiaste* w postaci snopu promieni świetlnych, wychodzących z elektrody; wreszcie nastąpi *wyładowanie iskrowe* między obiema elektrodami.

Jeżeli środowisko jest z innego dielektryku, niż powietrze, a mianowicie z materiału izolacyjnego stałego, wyładowanie iskrowe przybrać może formę *przebiecia* dielektryku lub też *przeskoku* naokoło izolatora. Napięcie, jakie potrzebne jest do tego, nazywamy *napięciem przebiecia* wzgl. *napięciem przeskoku* (iskry); może ono zresztą wpaść w napięcie, odpowiadające wyładowaniom snopiastym lub jarzącym. Wogóle napięcie, przy którym występuje iskra, nazywamy *napięciem iskrzenia*. Napięcie to zależne jest od kształtu elektrod, warunków atmosferycznych i t. p. Poznanie wysokości tego napięcia jest szczególnie ważne, gdyż zjawisk towarzyszących mu staramy się właśnie uniknąć; również wyładowania jarzące i snopiaste są, jak to poznamy dalej, niepożądane, a nawet szkodliwe. Elektrodami, między którymi występują powyższe wyładowania, mogą być np. przewody linii elektrycznych, uzwojenia maszyn i transformatorów, wogóle zaś każde 2 punkty urządzenia elektrycznego, mające różnicę potencjałów. Nieprzewidziane wyładowania między temi punktami psują nam izolację, przeszkadzając w ruchu, dążymy więc do uniknięcia takich wyładowań względnie do ich unieszkodliwienia.

Na pierwszy plan wysuwa się kwestja izolacji przewodów i uzwojeń maszyn, transformatorów i wogóle urządzeń elektrycznych i jej wytrzymałość wobec zjawisk wyżej opisanych, czyli *wytrzymałość elektryczna*.

3. **Naprężenia elektryczne.** Stosując coraz wyższe napięcie między elektrodami, doprowadzi się zawsze w ostateczności do przebiecia dielektryku, znajdującego się między nimi. Mówimy, że dielektryk pod napięciem, t. j. znajdujący się w polu elektrycznym, wytworzonym przez to napięcie, jest *naprężany na przebiecie*. Liczbę woltów, przypadających wtedy na 1 cm grubości dielektryku, mierzona wzdłuż prostej, łączącej elektrody, a więc najczęściej prostopadłe do powierzchni dielektryku, nazywamy *naprężeniem na przebiecie* i oznaczamy przez Δ w V/cm.

Ażeby do przebiecia nie dopuścić, trzeba znać granicę, do której jeszcze można podnieść napięcie, czyli *wytrzymałość elektryczną* δ , wyrażoną również w V/cm.

Stosunek wytrzymałości elektrycznej do naprężenia na przebiecie $k_s = \frac{\delta}{\Delta}$, nazywamy *stopniem bezpieczeństwa* danego układu (dielektryku); musi on być zaw-

sze większy od 1. Odgrywa on bardzo poważną rolę przy obliczaniu urządzeń i konstrukcji o wysokim napięciu, warunkuje bowiem granice pewności urządzenia nie tylko przy ruchu normalnym, lecz także przy wszelkich niespodziewanych podskokach napięcia; do niego stosujemy wszelkie urządzenia ochronne od przepięć. Największą pewność ruchu będzie miało urządzenie, które jest wykonane z dużym stopniem bezpieczeństwa w każdej najdrobniejszej jego części składowej.

Przepisy bezpieczeństwa, względnie normy dla urządzeń elektrycznych, zalecają różne granice, w których ma się obracać stopień bezpieczeństwa, stosownie do wysokości napięcia. Przy niższych napięciach jest on wyższy (ok. 5 przy 10 kV), przy wyższych—niższy (ok. 2 przy 110 kV). Różnice te tłumaczy się tem, że wysokość przepięć nie jest zależna tylko od wysokości napięcia roboczego, lecz jeszcze od innych czynników, o których tu na razie mówić nie będziemy.

Z praktyki wiadomo, że naprężenie na przebicie zależy od natężenia pola elektrycznego, przenikającego dielektryk, które wszak zależne jest od wysokości napięcia. Zagadnienia podstawowe z nauki o wytrzymałości elektrycznej opierają się zatem w głównej mierze na znajomości układu pola elektrycznego w dielektryku, a więc na prawach elektrostatyki.

Z prawa Coulomba natężenie pola H , pochodzące od ładunku Q kulombów w odległości r cm od tego ładunku, wypada:

$$H = \frac{1}{\epsilon} \frac{Q}{r^2} \cdot 3 \cdot 10^9 \text{ bezw. jedn. elektrostat.}$$

gdzie ϵ jest stałą dielektryczną środowiska. Z powyższego wzoru dla natężenia pola bezpośrednio wynika wzór dla naprężenia na przebicie — Δ . Przez odpowiednie podstawienie jednostek, możemy łatwo ten wzór wyrazić w V/cm:

$$\Delta = \frac{1}{\epsilon} \frac{Q}{r^2} \cdot 9 \cdot 10^{11} \text{ V/cm.}$$

Jest to wzór podstawowy, wyrażający równocześnie (tylko w innych jednostkach) natężenie pola czyli liczbę linii siły na cm^2 w tem miejscu.

Przy obliczaniu naprężeń jest bardzo niedogodne posługiwać się ładunkami, wprowadzamy zatem do wzoru pojemność C w cm, uwzględniając, że

$$Q = C \cdot V \cdot \frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$$

i otrzymamy wzór dla Δ następujący:

$$\Delta = \frac{1}{\epsilon} \frac{C V}{r^2} \text{ V/cm,}$$

gdzie C jest pojemnością badanego układu, obliczoną w centymetrach z jego geometrycznych własności, a V —jest napięcie w woltach, pod którym znajduje się dielektryk. Każdy układ, złożony z dielektryku i elektrod, rozpatrywać możemy jako kondensator, więc wzór powyższy wszędzie łatwo daje się zastosować.

Dyskusja ostatniego równania, zastosowanego do układów różnego rodzaju, prowadzi zawsze do stwier-

dzenia, że największe naprężenie elektryczne układu występuje w miejscu o najmniejszej krzywiznie elektrod, co zresztą można było z góry przewidzieć, gdyż tam panuje największa gęstość linii pola elektrycznego. Tak np. dla kabla o grubości izolacji $r_2 - r_1$, który rozpatrujemy jako kondensator cylindryczny,

$$\Delta = \frac{V}{r_1 \log \frac{r_2}{r_1}} \text{ V/cm.}$$

a Δ_{max} występuje na powierzchni żyły kablowej¹⁾.

Aby uniknąć zatem nadmiernego naprężenia izolacji tuż przy żyłce kabla, staramy się tę żyłę zrobić możliwie grubą, przez zastosowanie „duszy“ (z konopi), lub przez użycie materiału gorzej przewodzącego (niż miedź). Doświadczeniem możemy przekonać się o tem naocznie. Na elektrodzie o mniejszym promieniu krzywizny wcześniej pojawia się światełko jarzące, jako pierwsza widoczna postać wyładowania (niezpełnego). Między elektrodami ostrzei prędzej następuje przebicie, niż między kulistemi, a zwłaszcza płaskimi.

Stąd ważne правило techniki wysokich napięć: unikać ostrych krzywizn, krawędzi, rysów, ostrzy i t.p. gdyż one zmniejszają wytrzymałość elektryczną układu.

4. Naprężenia elektryczne w złożonych układach. O ile idzie o wytrzymałość układów prostych, t.j. utworzonych z jednolitego materiału izolacyjnego, w postaci łatwo obliczalnej, to wyznaczenie ich wytrzymałości nie przedstawia większych trudności. Sprawa się natomiast komplikuje, gdy mamy do czynienia z układami, złożonymi z kilku dielektryków, lub więcej niż dwu elektrod, a zwłaszcza, jeżeli postać układu wyklucza zastosowanie prostych wzorów dla kondensatorów.

Jako układ złożony uważać będziemy każdy układ (foremny), posiadający dwie elektrody i dielektryk z kilku warstw o różnych stałych dielektrycznych. Obliczenie wytrzymałości takiego układu, względnie naprężeń elektrycznych tu występujących, daje nam szereg ciekawych wniosków, mających duże znaczenie w praktyce. Najprostszym jest przypadek kondensatora płaskiego (Rys. 1), złożonego z dwóch dielektryków o różnych stałych ϵ_1 i ϵ_2 , grubości d_1 i d_2 ; V_1 i V_2 spadki potencjałów w poszczególnych dielektrykach.

Naprężenia w dielektrykach, według wzorów poprzednich, wypadną:

$$\Delta_1 = \frac{V_1}{d_1} \text{ i } \Delta_2 = \frac{V_2}{d_2},$$

a podstawiając wartość $V = V_1 + V_2$, otrzymamy ostatecznie:

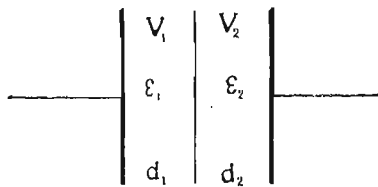
$$\Delta_1 = \frac{\epsilon_2 V}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1}, \text{ a } \Delta_2 = \frac{\epsilon_1 V}{\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1} \text{ skąd } \frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1},$$

t.j. naprężenia elektryczne w dielektrykach są odwrotnie proporcjonalne do stałych dielektrycznych.

¹⁾ por. artykuł prof. Staniewicza w „Przeglądzie Elektrotechnicznym“ № 1, 1921 r.

Poszczególne warstwy dielektryku mogą więc być różnie naprężane, zależnie od stałej dielektrycznej. Warstwa o większej stałej jest mniej naprężona i odwrotnie.

Załóżmy np., że w przypadku wyżej opisanym, (Rys. 1) warstwa pierwsza będzie z ebonitu ($\epsilon_1 = 2$), druga z powietrza ($\epsilon_2 = 1$), obie po 1 cm grubości, pod ogólnym napięciem $V = 30$ kV. Wtedy poszczególne naprężenia wypadną $\Delta_1 = 10$ kV a $\Delta_2 = 20$ kV. Ponieważ wytrzymałość powietrza ≈ 21 kV, a ebonitu ≈ 100 kV, układ wytrzyma powyższe napięcia. Weźmy jednak na miejsce ebonitu materiał lepiej izolujący i bardziej wytrzymały, np. porcelanę o stałej $\epsilon = 5$. Zdawałoby się, że układ przez to się wzmocni. Tymczasem rzecz ma się przeciwnie, gdyż, jak prosty rachunek wskazuje, naprężenia będą $\Delta_1 = 5$ kV, a $\Delta_2 = 25$ kV, a więc nastąpi bardziej nierównomierny rozdział napięcia i warstwa powietrza zostanie przebita.



Rys. 1.

Otrzymujemy stąd ogromnie ważną wskazówkę, że przy wszelkich konstrukcjach elektrycznych, gdzie mamy do czynienia z wysokim napięciem, należy unikać materiałów izolacyjnych mających różne stałe dielektryczne. Układ jest tem niebezpieczniejszy, im stałe te bardziej różnią się od siebie.

Ponieważ jednym z najczęściej spotykanych dielektryków jest powietrze, nie można więc stosować obok niego materiałów o dużej stałej dielektrycznej, licząc się z tem, że powietrze jako izolator występuje często niezależnie od nas, nawet gdy właściwym izolatorem jest inny materiał.

W takim razie zdarzyć się może, że „na oko” izolacja jest dobra, a tymczasem w warstwach powietrza, nadmiernie naprężonych występują wyładowania. Wyładowania takie często mają postać wyładowań jarzących, stanowiąc na pozór niewinne zjawisko wyładowań między izolatorami. Przypadek taki zająć może np. przy nie ściśle przylegających do siebie zwojach cewki maszyn czy transformatorów na wysokie napięcie, lub przy bańkach powietrza w izolacji kabli. Wystąpić mogą w tych bańkach powietrznych wyładowania jarzące lub nawet iskrowe, nagryzające powoli warstwę izolacyjną i prowadzące wreszcie przebicia zupełne i zwarcia.

W ten sposób tłumaczymy sobie różne zjawiska i wyprowadzamy praktyczne wskazówki konstrukcyjne. Stałe obserwowane zjawisko wyładowań, występujących przedewszystkiem na krawędzi elektrody, t. zw. *wyładowań krawędziowych*, jest właśnie wyładowaniem jarzącym, występującym szczególnie wyraźnie przy dużej różnicy w wartości stałych dielektrycz-

nych izolatora i warstewki powietrza. Taka warstewka znajduje się zawsze na krawędzi elektrody, np. przy okładzinach kondensatora. Skutkiem tych wyładowań następuje nierównomierne lokalne nagrzewanie się dielektryku, osłabiające go i prowadzące wreszcie przebicie. W takich okolicznościach wytrzymałość dielektryku jest mniejsza na krawędziach okładzin, niż zdala od nich. Stwierdzone to zostało dla szkła przez prof. Mościckiego, który, celem zwiększenia wytrzymałości kondensatorów szklanych, zgrubiał miejsca dotykające krawędzi okładzin i otrzymał w ten sposób techniczne kondensatory w postaci cylindrycznej, wytrzymaujące do 60 kV.

W izolatorach napowietrznych mamy warstwy powietrza, znajdujące się w zagłębieniach pomiędzy płaszcami izolatora, w głębokich rowkach. Stanowią one wraz z porcelaną izolatora układ złożony o różnych stałych dielektrycznych. Wyładowania jarzące, które tam powstają, nagrzewają lokalnie izolator i zmniejszają jego wytrzymałość. Z tego względu nowoczesne izolatory mają szerokie szczeliny między płaszcami.

Kształt izolatora napowietrznego do wysokiego napięcia jest szczególnie dostosowany do wyżej opisanych warunków. Przy niskim napięciu czynnikiem, warunkującym konstrukcję izolatora, była głównie dążność do zapobieżenia wpływom elektrycznym po jego powierzchni w stanie mokrym; stąd zwiększenie drogi wpływów przez rowki, karby i t. p. Przy napięciu wysokim dążymy natomiast do możliwie równomiernego rozdziału pola elektrycznego i do unikania nadmiernych skupień linii elektrycznych, względnie do takiego ukształtowania pola, aby ewentualne wyładowania elektryczne poprowadzić po najmniej szkodliwej drodze.

Przebity izolator wysokiego napięcia, psuje całą linię, nie mówiąc już o tem, że jest kosztowny. Lepiej więc dopuścić do wyładowania około izolatora, czyli do przeskoku iskry między przewodem a trzpieniem izolatora przez powietrze, otaczające izolator, poczem linia może być dalej w stanie normalnym, aniżeli do przebicia przez materiał izolacyjny. Zewnętrzna powierzchnia izolatora staje się podczas deszczu dobrze przewodzącą, krople wody spadające poruszają się po liniach siły, mają więc dążność do trzpienia izolatora i zmniejszają wytrzymałość na przeskok iskry. Przez zastosowanie płaszcza zewnętrznego szerokiego, nadajemy kroplom wody kierunek odśrodkowy i zwiększamy wytrzymałość na przeskok; płaszcz wewnętrzny osłania trzpień (izolator deltowy). Przy wyższych napięciach stosujemy jeden lub więcej płaszczy środkowych. Wytrzymałość na przebicie jest zwykle już dostatecznie zabezpieczona względami na wytrzymałość mechaniczną izolatora, o ile tylko nie dopuścimy w jakim miejscu do nadmiernego skupienia linii siły.

Ta okoliczność, że zmoczony płaszcz zewnętrzny izolatora przestaje być izolatorem, prowadzi do stosowania daszków metalowych, połączonych metalicznie

z przewodem. W ten sposób otrzymujemy stale równomierniejszy rozkład linii pola. Poprawi się on jeszcze bardziej, jeżeli zastosujemy u spodu izolatora pierścieni lub kosz ochronny. Wtedy wyładowania odbywać się będą między daszkiem a pierścieniem, zdala od części izolacyjnych, które w ten sposób nie będą narażone na lokalne ogrzania, mogące uszkodzić izolator mechanicznie i elektrycznie.

Dochodzimy w ten sposób do innego „paradoксу elektrycznego“, że przez wprowadzenie metalu do konstrukcji izolacyjnej, wytrzymałość izolatora się zwiększa.

5. Naprężenia w układach skojarzonych. Pewną odmianę wyżej opisanych układów złożonych stanowią układy, które możemy uważać jako szereg kondensatorów, skojarzonych pojemnościowo między sobą; będziemy je nazywać krótko układami skojarzonymi. Do nich zaliczają się przede wszystkim izolatory wiszące, które przy bardzo wysokich napięciach zastępują izolatory stojące. Powyżej 70 kV zwykły izolator deltowy przybiera zbyt duże wymiary, pociągające za sobą wzrost kosztów i ciężaru, które naogół rosną od 60 kV z 3 potęgą napięcia; np. dla 66 kV izolator ma wysokość 40 cm, średnicę największą 32,5 cm, a ciężar około 15 kg. Wymaga to silnych masztów i t. p.

Ażebymy więc mieć do czynienia z mniejszymi izolatorami, łączymy szeregowo kilka izolatorów, które w ten sposób wytrzymują w sumie większe napięcie, gdyż rozkłada się ono na poszczególne ogniwa. Taki szereg izolatorów, zawieszonych na słupie, dźwiga przewód. Rozdział napięcia na izolatorach wiszących nie jest jednak równomierny; nie wynosi on dla każdego

z n izolatorów $\frac{V}{n}$, jeżeli całe napięcie jest V , lecz — jak uczy doświadczenie — największy spadek napięcia przypada na izolator, znajdujący się najbliżej przewodu. Tłumaczymy to sobie szczególnym rozdziałem prądów pojemnościowych w takim układzie.

Szereg izolatorów wiszących można przedstawić schematycznie (Rys. 2) jako szereg kondensatorów C_1, C_2, C_3 , połączonych posobnie, przez które płynie prąd pojemnościowy od przewodu P do uziemionego masztu M . Prócz tego, każde ogniwo izolatora wykazuje pewną pojemność względem ziemi, co można sobie przedstawić jako grupę kondensatorów c_1, c_2, c_3 , połączonych równolegle jedną okładziną do ziemi.

Z rysunku widzimy wyraźnie, że przez izolator C_1 płynie największy prąd, bo tu mamy prąd przepływający szereg kondensatorów C_1 , jak i wszystkie prądy, płynące przez izolatory C . Przez każdy zaś następny izolator płynie prąd odpowiednio mniejszy. Największy więc spadek napięcia będzie na izolatorze C_1 i tu najprędzej mamy przebicie, wzgl. przeskok iskry; następne izolatory wykazują coraz mniejsze napięcia.

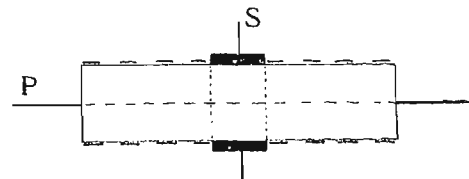
Nierównomierny rozdział napięcia będzie tem wybitniejszy, im większe będą prądy uboczne, czyli im

większe będą pojemności c_1, c_2 , t. j. im bliżej masztu wiszą izolatory. Staramy się więc otrzymać możliwie mały stosunek $\frac{c}{C}$, a więc małe c a duże C . Osiągamy to przez zwiększenie odległości zawieszenia przewodu od masztu tak, aby c nie grało roli, albo przez zwiększenie pojemności izolatorów, znajdujących się bliżej przewodu (stopniowo zmniejszając grubości dielektryku), albo stosowanie obok ogniw, wykazujących małą pojemność, typy o dużej pojemności, które zawieszamy bliżej przewodu.

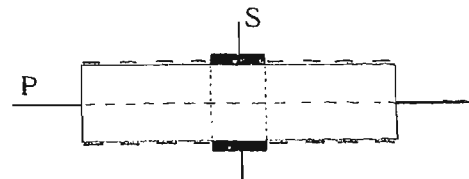
Układy podobne możemy rozpatrywać nie tylko jako skojarzone pojemnościowo względem masztu, ale także względem przewodu, wprowadzając pojemności poszczególnych ogniw izolatora względem przewodu; ma to przeciwny wpływ, niż poprzednio opisany, ale znacznie słabszy.

Jako układy skojarzone możemy rozpatrywać bezpieczniki przepięciowe rolkowe, zawory Giles'a i t. p.

6. Naprężenia powierzchniowe. Oprócz naprężeń na przebicie, występujących w dielektrykach pod wpływem pola elektrycznego w kierunku prostopadłym do powierzchni, zachodzą jeszcze naprężenia wzdłuż powierzchni, których skutkiem są wyładowania powierzchniowe w postaci iskier ślizgowych, rozchodzących się w różnych kierunkach po powierzchni dielektryku od elektrody, a sięgających do 2 i więcej metrów długości.



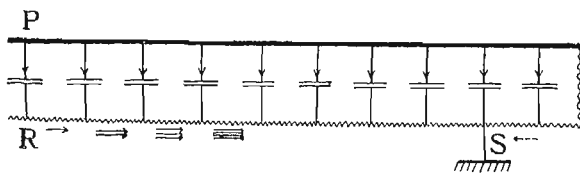
Rys. 2.



Rys. 3.

Powstawanie takich iskier tłumaczymy sobie w sposób następujący: powierzchnia izolatora nie jest nigdy doskonale czystą, zawsze mamy na niej warstwę przewodzącą, utworzoną z pyłu, brudu, wilgoci. Warstwa ta ma jednak zwykle pewien — bardzo znaczny — opór dla prądu i skutkiem tego wzdłuż jej występują spadki napięcia, zależne od wielkości tego oporu na danej przestrzeni. W ten sposób powierzchnia izolatora nie jest powierzchnią ekwipotencjalną. Między poszczególnymi punktami powierzchni występują znaczne różnice potencjałów, mogące przekroczyć granice wytrzymałości powietrza, co pociąga za sobą wyładowania i iskry ślizgowe.

Wyładowania powierzchniowe szczególnie dają się wznaki przy izolatorach przepustowych, przez ściany metalowe (np. osłony transformatorów). Taki izolator (rys. 3) stanowi układ pojemnościowy, którego jedną elektrodą (okładziną) jest przewód P , drugą — ściana metalowa S , dielektrykiem izolator. Słabo przewodząca (zanieczyszczona) powierzchnia izolatora, bierze również udział w rozdziale napięcia na izolatorze, tak że możemy ją sobie wyobrazić jako zbiór elementarnych elektrod, (Rys. 4) stanowiących okładziny elementarnych kondensatorów z przewodem jako drugą okładziną; okładziny pierwsze są połączone ze sobą równolegle dużym oporem powierzchniowym. Prąd ładujący płynie z przewodu przez kondensatory a następnie przez opór powierzchniowy R do osłony, względnie ziemi, powodując większe spadki napięcia bliżej osłony, gdzie też rze-



Rys. 4.

czywiście występują największe naprężenia i wyładowania powierzchniowe. Im większa jest pojemność kondensatorów, tem większe są prądy pojemnościowe i tem wcześniejsze wyładowania powierzchniowe. Dla uniknięcia ich zaleca się zmniejszenie pojemności przez stosowanie materiałów izolacyjnych o małej stałej dielektrycznej.

Na tych rozważaniach oparta jest teoria i budowa nowoczesnych izolatorów przepustowych i wsporczych, znana pod nazwą teorii Kuhlmana, profesora Politechniki w Zurychu¹⁾. W takich izolatorach nowoczesnych nie spotykamy już rowków, tworzących dłuższą drogę wyładowań powierzchniowych, charakteryzujących dawniejsze izolatory przepustowe i wsporcze. Powierzchnia ich jest prawie gładka, w kształcie stożków ściętych, o stosunkowo cieniwej warstwie powierzchniowej z porcelany, i wewnątrz z masy izolacyjnej, posiadającej małą wartość stałej dielektrycznej lub wprost wprost pustych w środku t. j. wypełnionych powietrzem. Porcelana stanowi tu tylko osłonę mechaniczną.

Bardzo dowcipnie na podstawach teoretycznych rozwiązuje Nagel kształt izolatorów przepustowych. Dielektryk jego izolatorów jest przedzielony koncentrycznymi warstwami metalowymi, tworzącymi niejako szereg kondensatorów cylindrycznych, koncentrycznych do przewodu. Przez odpowiedni dobór pojemności otrzymuje się równomierny rozdział naprężeń izolacji

¹⁾ Nieznaną jest zapewne szerszemu ogółowi elektrotechników ta okoliczność, że podstawą tej teorii były poglądy prof. Mościckiego, który ich udzielił prof. Kuhlmannowi, gdy ten zwiedzał jego pracownię we Fryburgu. Następstwem tej rozmowy był artykuł Kuhlmana w ETZ.

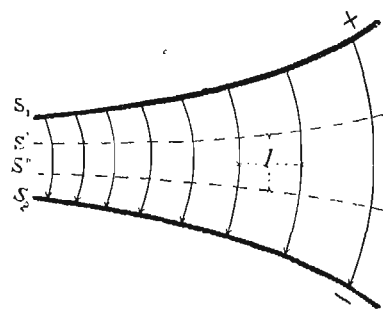
w kierunku prostopadłym. Ponieważ pojemność takich kondensatorów jest tem większa, im większą jest średnica (przy tej samej grubości dielektryku), przeto aby te pojemności zrównać, wzgl. odpowiednio ustopniować, robi się kondensatory stopniowo coraz krótsze, tak że tworzą one izolator przepustowy w postaci 2 stożków o powierzchni schodkowej, złączonych podstawami.

Przy tem otrzymuje taki izolator jeszcze inną ważną własność. Przez to, że okładziny poszczególnych kondensatorów, tworzących izolator przepustowy, dochodzą aż do powierzchni izolatora, a między nimi panują jednakowe napięcia, mamy przez to samo i równomierne rozłożenie napięć wzdłuż powierzchni izolatora. Przez dobór dostatecznie dużych odstępów między krawędziami okładzin, ewent. przez nasadzenie na okładziny pierścieni metalowych, możemy zapewnić sobie dostateczną wytrzymałość na wyładowania powierzchniowe.

Izolatory przepustowe takiego typu, budowane dla napięć do 500 kV, mają długość 4—5 m, a średnicę 40—50 cm.

7. Naprężenia w układach pojemnościowo nieforemnych. — Wyznaczanie naprężeń w układach, stanowiących kondensatory foremne, których pojemność łatwo obliczyć, jak widzieliśmy, jest rzeczą dosyć prostą. Inaczej się rzecz ma, jeżeli mamy do czynienia z kształtami, których pojemności niepodobna wyznaczyć prostym wzorem. Uciekamy się wtedy do innych sposobów i posługujemy się linjami elektrycznymi, które charakteryzują nam naprężenia, występujące w danym przekroju; im większa jest indukcja elektryczna w dielektryku, tem większe naprężenie.

Przedewszystkiem musimy przedstawić wykreślenie przebieg i gęstość linii indukcji elektrycznej. W tym



Rys. 5.

celu rozpoczynamy od wykreślenia powierzchni ekwipotencjalnych, co przychodzi stosunkowo łatwo, jeżeli mamy (rys. 5) dany kształt elektrod (S_1 i S_2), między którymi istnieje pole elektryczne. Powierzchnie elektrod są zwykle powierzchniami ekwipotencjalnymi; między nimi rysujemy na oko szereg innych powierzchni ekwipotencjalnych (S' , S''). Linje indukcji elektrycznej przebiegają prostopadle do powierzchni ekwipotencjalnych. Kreślimy je w odległości od siebie równej odstępowi dwu sąsiednich powierzchni ekwipoten-

cyjonalnych; utworzą one wtedy jednostkowe rurki indukcji, złożone w przybliżeniu z sześciątów, przedstawionych na rysunku w przekroju jako kwadraty. Konstrukcja tych kwadratów pozwala na dosyć dokładne wyznaczenie układu pola elektrycznego (powierzchni ekwipotencjalnych i linii indukcji) i przy pewnej wprawie idzie dosyć szybko.

Mając taki rozkład pola, możemy wyznaczyć jego natężenie w każdym punkcie według wzoru: $H = \frac{v}{l}$, dzieląc napięcie, panujące między dwiema powierzchniami ekwipotencjalnymi (v), przez odstęp tych powierzchni, wzg. szerokość rurki indukcji (l). Wyraz ten przedstawia również napięcie elektryczne Δ .

Daje nam to możność wyznaczenia pojemności takiego układu nieforemnego. Opór bowiem dielektryczny rurki o długości l i przekroju s , $W = \frac{l}{\epsilon \cdot s}$, jest w pewnym stosunku do pojemności rurki ($C_0 = \epsilon \frac{s}{4\pi l}$), a mianowicie: $C_0 = \frac{1}{4\pi W}$. Przez dodanie pojemności rurek jednostkowych C_1 , otrzymamy w przybliżeniu pojemność całego układu, $C = \Sigma(C_1)$.

Wytrzymałość układów izolacyjnych zależy zatem — jak poznaliśmy — od ich kształtu i stałej dielektrycznej materiału. Po za tem ma na nią znaczny wpływ ustrój samego materiału i czynniki zewnętrzne. Rozpatrzmy pokrótce kolejno trzy rodzaje materiałów izolacyjnych: lotne, ciekłe i stałe.

8. Materiały izolacyjne lotne. — Najważniejszym materiałem tej grupy jest powietrze. Jest ono zawsze w większym lub mniejszym stopniu przewodzące. Stopień przewodzenia zależy od stopnia zjonizowania powietrza. Pod wpływem pola elektrycznego, panującego między elektrodami, występuje ruch jonów dodatnich do katody a ujemnych do anody, czyli przewodzenie elektryczności, które, z razu niewidoczne, z rosnącym napięciem przybrać może formę wyładowań jarzących snopiastych, iskrowych.

Jonizacja powietrza następuje albo pod wpływem zewnętrznych czynników jonizacyjnych, jak promienie pozafioletowe, röntgenowskie i t. p. i wtedy nazywa się takie przewodzenie niesamodzielnem, albo też powodują je swobodne jony, które zawsze — choć i w drobnej ilości — są w powietrzu. Pod wpływem stosunkowo znacznego napięcia nabierają one dużej prędkości, uderzają o cząstki niezjonizowane i rozdziela ją na jony. W ten sposób jonizacja potęguje się lawinowo i powstaje samodzielne przewodzenie. Do tego potrzebną jest jednak pewna minimalna prędkość swobodnych jonów, a więc pewne minimalne napięcie, wywołujące minimalne natężenie pola, które wynosi przynajmniej około 100 gausów, co odpowiada około 30kV/cm.

Średni spadek potencjału na jednostkę odległości między elektrodami nie określa dostatecznie wytrzyma-

łości elektrycznej powietrza. Poznaliśmy, że wyładowania zależą także od kształtu elektrod; na ostrych krawędziach pojawiają się wyładowania wcześniej, t. j. przy niższym napięciu, niż przy łagodnie zakrzywionych. Po za tem wyładowania te przybierają rozmaite formy, zależnie od elektrod. To też podając skok iskry w iskierniku pomiarowym, spowodowany pewnem napięciem, należy zawsze zaznaczyć rodzaj elektrod, wzgl. ich promień krzywizny. Zwykle przyjmujemy elektrody kulkowe o średnicy 1, 2, 5, 10 cm i jako napięcie przebicia uważamy napięcie początkowe wyładowań jarzących, które zwłaszcza w iskierniku cylindrycznym można według Petersena — dokładnie spostrzec uchem, jako charakterystyczny suchy trzask, zjawiający się przed wyładowaniami widzialnemi.

Tak wyznaczona wytrzymałość powietrza nie jest jednak niezależna od odległości elektrod. Jonizacja bodźca przez zderzenie cząsteczek może bowiem wystąpić tylko w razie dostatecznej prędkości jonów swobodnych, co wymaga pewnej długości ich drogi biegu (odstęp elektrod); musi zatem istnieć pewne minimum odległości. Wynika z tego, że przy słabych polach potrzebna jest dłuższa droga do wywołania wyładowania, przy małym odstępie elektrod potrzebne jest większe napięcie do przebicia. Wytrzymałość powietrza zmniejsza się więc ze zwiększeniem grubości dielektryku (powietrza); dąży ono dla powietrza do 29 kV/cm, czyli ok. 21kV/cm skutecznego napięcia.

9. Materiały izolacyjne ciekłe. — Najważniejszym materiałem tej grupy jest olej, stosowany głównie w transformatorach i wyłącznikach. W oleju występują zjawiska podobne, jak w powietrzu, a więc mogą nastąpić wyładowania jarzące, snopiaste i iskrowe. Przy tem powstają jednak pewne zjawiska uboczne, jak rozkład materiału izolacyjnego podczas wyładowań jarzących i snopiastych, co zmienia znacznie granice przebicia, a więc wytrzymałość elektryczną. Do pomiarów wytrzymałości używamy iskiernika o elektrodach płaskich, przy których nie występują wyładowania jarzące i snopiaste, lub cylindrycznych Petersena.

Wytrzymałość oleju na przebicie jest bardzo zależna od stopnia wilgoci; spada ona dosyć szybko z rosnącą zawartością wody. Powyżej 0,3% wody utrzymuje się już prawie w jednakowej wysokości. Przy 0,3% wilgoci wytrzymałość spada o 50%.

Wytrzymałość dobrych oleji transformatorowych wynosi do 100kV/cm.

10. Materiały izolacyjne stałe. Jest ich ogromna różnorodność; najlepszymi są porcelana (izolatory) i papier impregnowany (kable). Wszystkie te materiały mają współczynnik termiczny oporu ujemny. Jeżeli zatem jakieś miejsce ogrzeje się bardziej, niż sąsiednie, np. skutkiem przepływania prądu, to tam opór się zmniejsza, a przez to prąd zwiększa się, ogrzanie znowu wzrasta i t. d., aż nastąpi przepalenie lub stopienie i przez to przebicie. Wytrzymałość takiego izolatora

jest więc mniejsza, niż gdyby się znajdował w normalnych warunkach. Podobnym jest wpływ wilgoci; materiały higroskopijne mają mniejszą wytrzymałość. Wytrzymałość elektryczna szkła osiąga: 1000 kV/cm, porcelany — 100 kV/cm, papieru — 200 kV/cm.

Ogrzewanie dielektryku następuje skutkiem przepływu prądu (ciepło Joule'a) lub skutkiem histerezy elektrycznej. Lokalne ogrzanie może powstać skutkiem wyładowań jarzących, np. na krawędzi elektrod, bankach powietrznych w izolacji kabli lub cewek maszyn, o czym wyżej była mowa. Takie wyładowania są bezwzględnie szkodliwe i należy ich unikać, a przy obliczaniu wytrzymałości uwzględniać.

Badanie wytrzymałości materiałów izolacyjnych stałych daje bardzo niejednolite wyniki, zależnie od składu chemicznego materiału, stopnia zanieczyszczenia jego, spoistości, stosowanej metody pomiarów i t. p. Stąd są różne dane co do wytrzymałości tych materiałów i jej zależności od grubości dielektryku.

Spotykane wzory tej zależności u różnych autorów są rozmaite i oparte na więcej lub mniej przekonujących tłumaczeniach. Prawie wszyscy godzili się na to, że zależność ta jest podobna, jak u ciał lotnych i ciekłych, t. j. że wytrzymałość maleje z rosnącą grubością dielektryku. Jakkolwiek doświadczenia to potwierdzały, to jednak nie można szukać wytłumaczenia tego zjawiska w teorii jonizacji i jej wpływie na przewodzenie elektryczności, gdyż jest ono inne u ciał stałych.

Najbardziej przekonującymi były badania Mościckiego, który znalazł, że wytrzymałość szkła jest na krawędzi okładzin kondensatora mniejsza i zmniejsza się z grubością, podczas gdy pośrodku okładzin jest wprost proporcjonalna do grubości. Wytłumaczenie pierwszego jest proste na podstawie podanych wyżej faktów wyładowań krawędziowych, wzgl. jarzących; drugie zjawisko tłumaczyć sobie można właśnie brakiem tych wyładowań, czyli dokładnym przyleganiem elektrod do dielektryku. To potwierdza również ta okoliczność, że zwiększenie ciśnienia elektrod na dielektryk zwiększa jego wytrzymałość na przebicie, gdyż warstwa powietrza (mała stała dielektryczna!) między okładzinami a dielektrykiem (duża stała!) zmniejsza się.

W ostatnich paru latach profesor Politechniki w Karlsruhe (Schwaiger*) przez zastosowanie nowych metod badania, które mu pozwoliły uniemożliwić powstawanie wyładowań jarzących podczas próby, stwierdził, że wytrzymałość materiałów stałych niehigroskopijnych, *jest niezależna od grubości* kawałka badanego. Stosuje on dwie równoległe elektrody płytowe, zanurzone w oleju o tej samej stałej dielektrycznej i wytrzymałości większej, niż badany materiał. Założeniem jednak jest, że ma się do czynienia z materiałem jednolitym; niejednolite wykazują znacznie mniejszą

wytrzymałość i z tej racji powinny być zarzucone w technice wysokiego napięcia.

Z tych badań wynika, że wytrzymałość materiałów izolacyjnych stałych jest naogół większa, niż dotąd powszechnie pojmowano. Wprowadzenie tego do praktyki stanowi znaczną oszczędność materiałów, pod warunkiem atoli, że materiały te będą najlepszej jakości, jednolite w swej strukturze chemicznej i mechanicznej i że zachowane będą wskazania, wynikające z teorii doświadczenia, co do zapobiegania wyładowaniom jarzącym i t. p. przyczynom, zmniejszającym wytrzymałość elektryczną.

Kwestja wytrzymałości elektrycznej materiałów izolacyjnych wysunęła się w ostatnich latach na pierwszy plan, przy stosowaniu co raz to większych napięć przy przesyłaniu energii elektrycznej. Co raz silniej podkreśla się obecnie potrzebę doskonałej izolacji, jako najlepszego środka ochronnego przeciw skutkom przepięć elektrycznych.

Dokładność obliczeń, wysoka dobroć materiałów, staranność wykonania, a nie projektowanie „na oko“ i „z doświadczenia“ — oto hasła dzisiejszej techniki wysokich napięć!

Kooperatywy elektryczne.

Podał inż. elektr. **Wacław Pawłowski.**

Czasopismo „Samorząd“ (Tygodnik Związku Sejmików Powiatowych Rzeczyposp. Polskiej) zamieścił w N^o 15, 16, 17 i 18 r. b. szereg artykułów, poświęconych elektryfikacji, pióra inż. D. Sokolcowa. Aktualność sprawy i sposób ujęcia jej przez autora zasługują na to, aby z treścią tych artykułów zapoznać czytelników „Przeglądu Elektrotechnicznego“.

W formie prostej i zrozumiałej dla szerokich kół niefachowych wyjaśnia autor na wstępie istotę sprawy, wskazuje racjonalne sposoby wyzyskania naturalnych źródeł energii i podkreśla doniosłość elektryfikacji dla polityki gospodarczej Państwa Polskiego, które winno w tej mierze kierować się zasadą samopomocy, a które posiada w kraju wszystkie potrzebne warunki, aby pod względem gospodarczym dorównać najbardziej przodującym krajom Europy i Ameryki. Pożytek, płynący z elektryfikacji, która bywa nieraz wywoływana przez konieczność, został już dawno zrozumiany przez inne państwa, a przedewszystkiem przez Niemcy.

Dając szkic historyczny rozwoju elektryzacji w Europie, autor podkreśla głównie tę okoliczność, że doniosłość sprawy została szybko zrozumiana przez działaczy na polu kooperacji. Nic bardziej naturalnego. To też znów, niestety, w Niemczech — już przed wojną znajdowały się w Prusach Wschodnich trzy duże elektrownie, zbudowane na zasadach współdzielczych. To jest myślą przewodnią autora, który, będąc dobrym znawcą tych stosunków i gorącym zwolennikiem kooperacji, popiera bardzo przekonującymi argumenta-

*) Schwaiger: „Lehrbuch der elektrischen Festigkeit“ 1919.