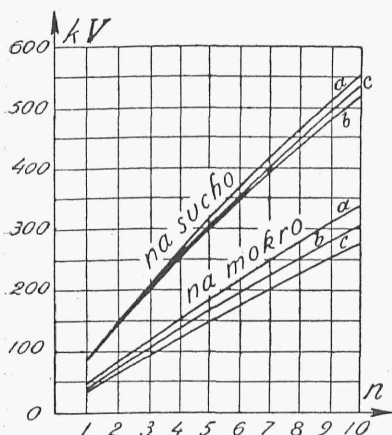
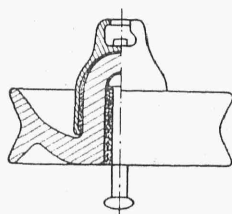


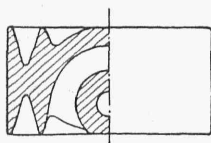
dują się one w pozycji nie pionowej, jak wiszące, lecz ukośnej lub poziomej. Z tego powodu izolatory takie są bardziej narażone na zmoczenie części spodnich, niż wiszące; wyładowania powierzchniowe powstają



Rys. 52.



Rys. 53.



Rys. 54.

u nich wcześniej. Stąd kształt ich jest tego rodzaju, aby woda łatwo z nich spływała i nie ułatwiała przeskołu iskry. Przeto liczba takich izolatorów, przypadająca na łańcuch, jest o 1—2 większa, niż wiszących przy tem samym napięciu.

Nowoczesny izolator odciągowy typu kolpakowego przedstawia Rys. 53, a typu łańcuchowego Rys. 54.

Dla większego bezpieczeństwa stosuje się też izolatory odciągowe dwu — a nawet trójrzędowe.

Typem izolatorów, zasadniczo odmiennym od przewodowych, są izolatory przepustowe, służące do przeprowadzania przewodów np. przez ścianę budynku lub pudła transformatora, oraz w s p o r c z e, służące do podtrzymywania szyn zbiorczych, przewodów i t. p., przeważnie w miejscach zamkniętych.

Przy tych izolatorach sprawa wytrzymałości na przeskok wysuwa się na pierwszy plan.

## 5. Izolatory przepustowe.

Pierwotna forma izolatorów przepustowych wysokiego napięcia powstała z formy, stosowanej przy napięciu niskim, t. j. z walca porcelanowego, w któ-

rego osi przeprowadzony był przewód; w środku walca był umocowany kołnierz, względnie kryza, za pomocą której umocowywało się izolator w otworze pudła transformatora. Przez proste zwiększenie grubości izolatora, a przede wszystkim przez wydłużenie go i zaopatrzenie w rowki lub karby, starano się przystosować izolator do wysokiego napięcia, zwracając głównie uwagę na utrudnienie drogi prądom upływowym. Oczywiście, można było tą drogą iść tylko do pewnych, stosunkowo niskich, granic napięcia. Poznanie praw, rządzących zjawiskami przeskoku, spowodowało zasadniczą zmianę kształtu izolatora przepustowego.

Przewód elektryczny, przechodzący przez otwór w ścianie lub w pudle transformatora, wytwarza pole elektryczne, które jest ukształtowane stosownie do położenia przewodu względem ściany. Wewnątrz samego otworu można je uważać za zbliżone do prostolinijnego pola kondensatora walcowego. Dalej pole przestaje być prostolinijnym. Zwykle otwór w ścianie zamknięty jest materiałem izolacyjnym, czyli właściwym izolatorem. Wtedy w części swej, wystającej poza otwór, izolator naprężany jest na przebicie i na przeskok.

*Naprężenia na przebicie.* — Najprostszy izolator przepustowy przedstawia Rys. 55, gdzie w otwór, np. w ścianę pudła transformatorowego, wstawiony jest walec izolacyjny o stałej dielektrycznej  $\epsilon$ , otaczający ściśle przewód, umieszczony spółśrodkowo w osi otworu. W polu, wytworzonem przez napięcie  $V$ , a objętem przez boki ścianki (w miejscu  $A$ ), występują naprężenia, łatwo dające się obliczyć, jak w przypadku kondensatora walcowego.\*)

Na powierzchni przewodu:

$$F_1 = \frac{V}{r_1 \log_n \frac{r_2}{r_1}}, \quad (9)$$

a na wewnętrznej powierzchni otworu:

$$F_2 = \frac{V}{r_2 \log_n \frac{r_2}{r_1}}$$

Gdyby między kołnierzem i materiałem izolacyjnym znajdowała się warstwa powietrza, to — według

\*) p. str. 23.

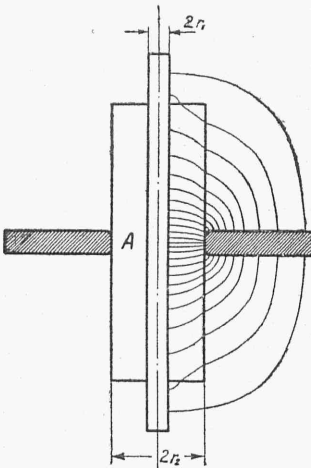
praw naprężeń dielektryków uwarstwionych — naprężenie w powietrzu na powierzchni izolatora byłoby:

$$F_2' = \frac{\varepsilon V}{r_2 \log_n \frac{r_2}{r_1}} \quad (10)$$

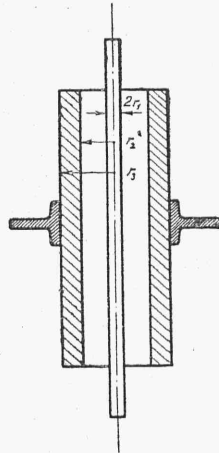
Naprężenie byłoby więc tam  $\varepsilon$  razy większe, niż w części izolatora, przylegającej do otworu:

$$F_2' = \varepsilon F_2$$

Naprężenie to będzie zatem tem większe, im większa jest stała dielektryczna izolatora. Wskazuje to na korzyść stosowania do izolatorów przepustowych materiałów izolacyjnych o małej stałej dielektrycznej, gdyż utrudnia się przez to powstawanie wyładowań krawędziowych i powierzchniowych.



Rys. 55.



Rys. 56.

Przy obliczaniu izolatorów przepustowych sprawdzamy, czy naprężenia nie przekraczają wartości krytycznych, względnie, przepisanych dla danego układu i to — w tym przypadku —  $F_1$  dla porcelany, a  $F_2'$  dla powietrza. Przytem naprężenie  $F_2'$  będzie miażdżące dla wyładowań powierzchniowych, o czym później będzie mowa. Poznanie tych praw doprowadziło do izolatorów dwuwarstwowych. Najprostszy przypadek przedstawiony jest na Rys. 56, gdzie izola-

tor składa się z dwu warstw: zewnętrznej z porcelany i wewnętrznej z powietrza lub z innego materiału izolacyjnego o mniejszej stałej dielektrycznej, niż porcelana. W układzie takim napięcie  $V$ , panujące między przewodem a uziemioną osłoną, rozkłada się na  $V_1$  — w powietrzu i  $V_2$  — w porcelanie, wytwarzające naprężenia, łatwo dające się obliczyć na podstawie wzorów dla naprężeń w układach walcowych uwarstwionych. A mianowicie:

naprężenie na powierzchni przewodu

$$F_2 = \frac{\varepsilon_2 V}{r_1 \left( \varepsilon_1 \log_n \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \log_n \frac{r_2}{r_1} \right)}, \quad (11)$$

a naprężenie na wewnętrznej powierzchni walca porcelanowego

$$F_2 = \frac{\varepsilon_1 V}{r_2 \left( \varepsilon_1 \log_n \frac{r_3}{r_2} + \varepsilon_2 \log_n \frac{r_2}{r_1} \right)}. \quad (12)$$

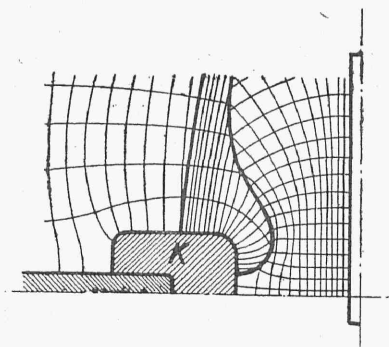
Przy pomocy pierwszego wzoru sprawdzamy, czy naprężenie powietrza, względnie innego materiału, znajdującego się wewnątrz izolatora, nie doprowadzi do wyładowań wewnątrz izolatora (na powierzchni przewodu). Z równania zaś drugiego można stwierdzić, czy naprężenie w porcelanie pozostaje w dopuszczalnych granicach.

W podobny sposób można przez zastosowanie kilku warstw o różnych stałych dielektrycznych (izolatory wielowarstwowe) osiągnąć wyrównanie spadku napięcia w dielektryku i przez to zmniejszenie grubości izolatora. Stosowanie powietrza jako warstwy wewnętrznej, otaczającej przewód, nie zawsze jest praktyczne, a to ze względu na małą stosunkowo wytrzymałość całego układu.

Podział dielektryku na koncentryczne warstwy walcowe, przedzielone okładkami metalowymi, podnosi również wytrzymałość na przebicie. O izolatorach tego typu, t. zw. kondensatorowych, będzie mowa poniżej.

Izolator przepustowy jest naprężany na przebicie najbardziej w miejscu, przylegającym do pudła transformatora. Kołnierz metalowy, jaki tam się zwykle stosuje do umocowania, powinien mieć przeto kra-

wędlie zaokrąglone, aby nie powodować zwiększenia naprężeń. Przedstawione to jest na Rys. 57, gdzie kołnierz  $K$ , specjalnie zaokrąglony, wrzyna się w porcelanę, która przez to przyjmuje na siebie — zawsze zwiększone na krawędziach, — naprężenia. Obraz pola, przedstawiony tam za pomocą linii indukcji i powierzchni ekwipotencjalnych, uzmysławia rozkład naprężeń w porcelanie i w powietrzu. Jak widać, część izolatora poza kołnierzem znajduje się już pod stosunkowo małym naprężeniem na przebicie, jej kształt i wymiary uwarunkowane są względami na wyładowania powierzchniowe.



Rys. 57.

Zjawiska te szczególnie wyraźnie występują u izolatorów przepustowych, u których powierzchnia izolatora, zarówno zewnętrzna, jak wewnętrzna (zwłaszcza przy izolatorach wypełnionych powietrzem), wystawiona jest na wyładowania powierzchniowe, dążące zwykle od kołnierza do przewodu. Wyładowania te ułatwia znacznie zanieczyszczenie powierzchni, które jest — w mniejszym lub większym stopniu — przewodzące. W ten sposób warstwa zanieczyszczona stanowi niejako jedną okładzinę kondensatora względem przewodu, jako okładziny drugiej.

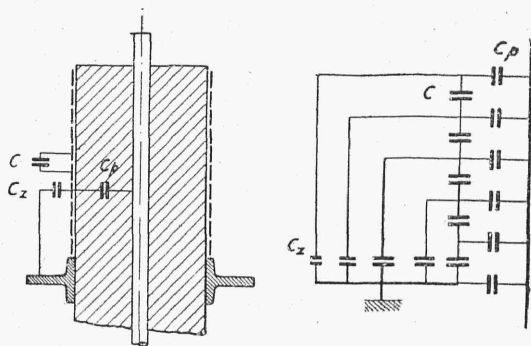
Cały izolator możemy sobie wyobrazić (Rys. 58) złożony z elementów, wykazujących pewną pojemność  $c_p$  względem przewodu,  $C_z$  względem ziemi, oraz  $c$  względem siebie. Powierzchnia zanieczyszczona stanowi niejako kondensator niedoskonały, o pe-

wnej oporności, włączonej równolegle do pojemności  $C$ .

Układ taki jest, jak z rysunku widać, zbliżony do układu łańcucha izolatorów wiszących, przy którym przeważa wpływ pojemności względem przewodu (porcelana!) nad pojemnością względem ziemi (powietrze!), nadto przechodzi tu jeszcze oporność, na rysunku nie uwzględniona).

Z układu takiego widać, że rozdział napięć na poszczególnych kondensatorach  $c$  będzie tem bardziej niekorzystny, im stosunek  $\frac{c_p}{c}$  będzie większy, czyli im

pojemności  $c_p$  będą większe. Pojemności  $c_z$  odciażają wprawdzie układ pod tym względem, wpływ ich jest jednak znacznie mniejszy, niż  $c_p$ ; ponadto pojemności te są tem mniejsze, im dalej od kołnierza leżą elementy. W rezultacie większe naprężenie przypadnie bliżej osłony (ziemi), tam płyną największe prądy pojemnościowe przez elementy  $c$ , tam też zjawia się najwcześniej wyładowania.



Rys. 58.

*Naprężenia na przeskoku.* — Prawa, według których odbywają się wyładowania powierzchniowe, nie są jeszcze tak dobrze zbadane, jak prawa wyładowań zwykłych w powietrzu. Ostatnie badania wykazują, że te prawa są naogół takie same, jak prawa wytrzymałości na przebicie powietrza. A więc, w polu jednostajnym — możliwe jest tylko wyładowanie zupełne; rozkład napięć wzdłuż powierzchni — jest taki sam, jak w powietrzu między równoległymi płytami; na-

prężenie krytyczne zmniejsza się z rosnącą odległością i t. d. Krzywa naprężeń krytycznych na przeskoku leży niżej, niż tamta, ale ma prawie identyczny przebieg. Zjawisko przeskoku nie jest przeto czemś innym, niż zjawisko przebicia powietrza iskrą, tylko znajduje się pod wpływem ubocznych zjawisk w środowisku.

Niższe wartości krzywej tłumacza się wpływem wilgotności na powierzchni izolatora. Naprężenie krytyczne na przeskoku maleje ze wzrostem wilgotności. Ponieważ wilgoć występuje naogół zawsze na izolatorach porcelanowych, ułatwia ona powstawanie dłuższych iskier ślizgowych na ich powierzchni. Materiały izolacyjne „tłuste”, np. parafina, zachowują się bardziej odpornie pod tym względem.

Oporność powierzchniowa ma tylko pośredni wpływ na wyładowania powierzchniowe, a to zależnie od stopnia wilgotności, spada ona bowiem dosyć znacznie z rosnącą wilgotnością.

Szerokość smugi wyładowań jarzących zwiększa się prostolinijnie z napięciem. Napięcie zaś, przy którym te wyładowania występują, jest odwrotnie proporcjonalne do stałej dielektrycznej.

Celem uniknięcia lub zmniejszenia wyładowań powierzchniowych unikać należy konstrukcji, powodujących duże składowe styczne pola elektryczne.

Długość izolatora przepustowego uwarunkowana jest wysokością naprężeń powierzchniowych. W tym względzie przedstawienie wykresne rozkładu pola elektrycznego (za pomocą jednostkowych komórek energii) \*) daje dobry obraz naprężeń i umożliwia obliczenie. Warstwa powietrza wzdłuż powierzchni izolatora naprężana jest przez składowe styczne natężenia pola. Składowe te powinny być możliwie równe wzdłuż całej powierzchni i nie mogą przekraczać wartości krytycznej naprężenia powietrza przy wyładowaniach powierzchniowych (ok. 11 kV/cm). Nadmierne naprężenie w jakimś miejscu sprowadza tam lokalne wyładowania, które powodują jonizację powietrza i ułatwiają wyładowania ślizgowe, prowadzące do przeskoku iskry. Występy i kołnierze na izolatorze, umieszczane prostopadle do kierunku na-

---

\*) p. str. 25.

teżenia pola, działają tłumiąco na prądy powierzchniowe i utrudniają wyładowania.

Długość izolatora przepustowego nie jest jednak tak istotnym czynnikiem ze względu na wyładowania powierzchniowe, jakby się to mogło wydawać. Powiększanie jej nie pociąga za sobą w tym samym stopniu zwiększenia wytrzymałości na przeskok. Raczej można to osiągnąć przez zwiększenie średnicy izolatora u kołnierza, bo wtedy zmniejszają się naprężenia krawędziowe, będące przyczyną wyładowań powierzchniowych.

*Rodzaje izolatorów przepustowych.* — Poznanie powyższych zjawisk doprowadziło do stosowania przy nowoczesnych izolatorach przepustowych materiałów o małej stałej dielektrycznej. Podstawy do opartej na tej teorii izolatorów przepustowych pochodzą od prof. I. Mościckiego (1908 r.), rozwinięta ona została przez prof. Kuhlmana (Zurych), którego nazwisko teoria ta odtąd nosi.

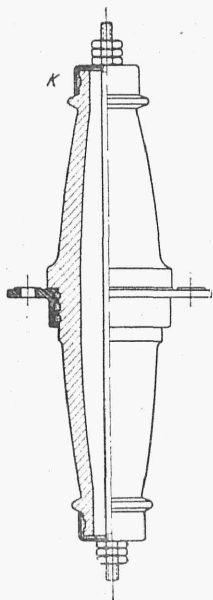
Izolatory *porcelanowe*, wyrabiane stosownie do tej teorii, mają jako główny dielektryk powietrze, olej lub masę izolacyjną o małej stałej dielektrycznej (*Rys. 59*); porcelana zaś daje u nich głównie wytrzymałość mechaniczną, odporność na wpływy atmosferyczne i t. p. Ścianki porcelanowe są zatem cienkie, tyle, ile wymagają względy mechaniczne. Izolatory takie mają mniej więcej postać dwóch stożków, złączonych podstawami w miejscu przepustu przez ścianę i są złożone przy większych rozmiarach zwykle z dwóch części. Jeżeli jedna część ma być pogrążona w środowisku o większej wytrzymałości, niż powietrze (np. w oleju lub masie zaizolowanej), to robi się ją wtedy odpowiednio krótszą.

Izolatory przepustowe wyrabia się obecnie także z *papieru twardego*. Te ostatnie stosuje się w pomieszczeniach zamkniętych, tu wypierają one izolatory porcelanowe. Dzieje się to skutkiem łatwości obrabiania izolatorów papierowych i skutkiem ich mniejszej stałej dielektrycznej. Nawet pod gołym niebem zjawiają się już izolatory papierowe, pokryte płaszczem porcelanowym.

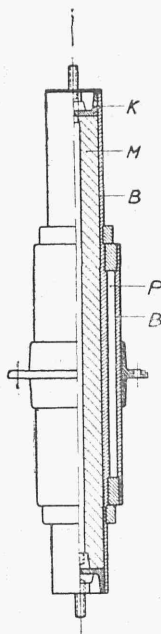
Oryginalnym typem izolatora przepustowego, który odpowiada wyżej wymienionym postulatom, jest izolator przepustowy z *płaszczem powietrznym* (*P*) systemu Haeffely'ego (*Rys. 60*), gdzie warstwa powietrza umieszczona między warstwami z papieru



bakelizowanego ( $B$ ) (t. zw. hefelitu) utrudnia wyładowania powierzchniowe z powodu jej małej stałej dielektrycznej. Wnętrze izolatora wypełnione jest masą ( $M$ ) również o małej stałej dielektrycznej. Izolator ten opatrzony jest u końców kołnierzami ( $K$ ), połączonymi z przewodem, wychodzącym z izolatora. Kołnierz wystaje nieco poza krawędź izolacji i powoduje w ten sposób lepszy rozkład pola wzdłuż powierzchni izolatora. Konstrukcja ta ma zapewnić opóźnienie wyładowań ślizgowych (są one proporcjonalne do trzeciej potęgi napięcia), powstawaniu których sprzyja nadmierne natężenie pola na powierzchni przewodu. Raczej dopuszcza ona do wyładowań smużystych (te rosną tylko z pierwszą potęgą napięcia).



Rys. 59.



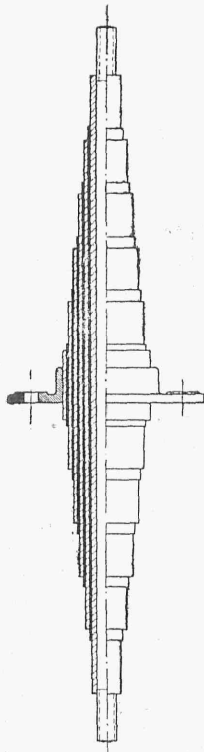
Rys. 60.

U izolatorów porcelanowych (Rys. 59) powyższą rolę kołnierza spełniają kołpaki ( $K$ ), nasadzone u ich końców.

Ideę równomiernego naprężenia izolatora przepustowego na przebicie i na przeskok bardzo oryginalnie próbował rozwiązać Nagel (1906 r., Siemens-Schuckert). Jego izolatory (Rys. 61) są złożone z kon-

centrycznych warstw o małej stałej dielektrycznej, podzielonych okładzinami metalowymi (czarne kresy na Rys. 61). W ten sposób otrzymuje się szereg kondensatorów walcowych spóśrodkowych, połączonych posobnie; stąd nazwa izolatorów *kondensatorowych*. Przypadające wtedy na każdy kondensator napięcie, jest odwrotnie proporcjonalnie do jego pojemności. O ile pojemności tych kondensatorów są równe, to i napięcia na nich są te same. Jeżeli pozatem dielektryki kondensatorów są jednakowo grube, to i naprężenia na przebicie wypadną prawie jednakowe.

Równomierne naprężenia wzdłuż powierzchni, a więc na przeskok, chciał Nagel uzyskać przez wyprowadzenie okładzin kondensatorów na zewnątrz powierzchni izolatora. Tego jednak — przy równomiernym naprężeniu promieniowym (na przebicie) — osiągnąć nie można z powodu nierówności promieni poszczególnych kondensatorów.



Rys. 61.

Aby otrzymać równomierne naprężenia osiowe (na przeskok), trzeba odstąpić od równości pojemności przy równych grubościach kondensatorów. Reymers (1909 r.) osiąga to przez odpowiednie stopniowanie długości przy równej grubości warstw. Pojemności kondensatorów są wtedy różne. Inny znów sposób (Coates, 1921 r.) dąży, przez stopniowanie grubości, raczej do zupełnej równomierności naprężeń osiowych, rezygnując z równomierności naprężeń promieniowych.

Jakiemu systemowi dać przewagę, narazie trudno jeszcze orzec; rozważania teoretyczne i studia praktyczne nad tą kwestją są w toku, świadcząc

o tem, że technika izolatorów przepustowych idzie w kierunku izolatorów kondensatorowych.

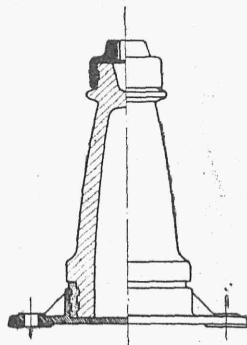
Takie izolatory przepustowe, budowane obecnie do napięć najwyższych, mają np. przy 500 kV nomin., długość 3—4 m, a średnicę 40—50 cm.

Izolatory przepustowe, stosowane w urządzeniach napowietrznych, mają zasadniczo ten sam kształt, co umieszczone pod dachem. Odpowiednio zwiększone wymiary kołnierzy okapowych, zabezpieczają je od wpływu opadów atmosferycznych.

## 6. Izolatory wsporcze.

Izolatory wsporcze służą do umocowania szyn zbiorczych, odłączników i t. p. przyrządów wysokiego napięcia. Co do kształtu, podobne są do izolatorów przepustowych, stanowiąc niejako ich górną część (Rys. 62). Pod względem elektrycznym są jednak zupełnie inaczej naprężane, gdyż nie posiadają we wnętrzu części, pozostających — jak u tamtych — pod napięciem.

Jedną ich elektrodą jest szyna lub t. p. przewodnik, umocowany do jednego końca, drugą zaś elektrodą jest uziemiona konstrukcja wsporcza. Rozkład pola, a przez to i naprężeń jest u nich znacznie dogodniejszy, niż u przepustowych. Naprężenia na przebicie i przeskok wpadają bowiem prawie w ten sam kierunek i są prawie równe. Naprężenia krytyczne jednak znacznie się od siebie różnią, gdyż ma się tu do czynienia z jednej strony z materiałem izolacyjnym stałym (porcelana, papier), naprężanym na przebicie, a z drugiej z warstwą powietrza wzdłuż powierzchni izolatora, naprężaną na przeskok.



Rys. 62.

Wytrzymałość na przebicie jest już zwykle zapewniona względami na wytrzymałość mechaniczną, zależnemi od ciężaru umocowanej na izolatorze konstrukcji, naprężeniami, występującymi w razie zwarcia i t. p. Wytrzymałość zaś na przeskok uwarunkowana jest — podobnie, jak u izolatorów przepustowych — naprężeniami powietrza wzdłuż powierzchni, oraz możliwością wyładowań powierzchniowych.

Pod tym względem występuje jednak pewna różnica między oboma rodzajami izolatorów. Izolatory wsporcze można znowu traktować, jako zbiór elemen-