

PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY

ORGAN STOWARZYSZENIA ELEKTROTECHNIKÓW POLSKICH.

WYCHODZI 1-go i 15-go KAŻDEGO MIESIĄCA.

PRZEDPŁATA: kwartalnie zł. 6.— Cena zeszytu 1 zł.	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.	CENNIK OGŁOSZEŃ: 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 (IV) 20% droż. Ogłoszenia strony tytułowej przyjmowane są tylko całostronicowe. Podwyżka cennika ogłoszeń obowiązuje wszystkie już zlecone ogłoszenia od dnia zmiany cen bez uprzedniego zawiadom.
--	--	---

Rok VII.

Warszawa, 15 sierpnia 1925 r.

Zeszyt 16.

Materiały izolacyjne.

Prof. K. Drewnowski.

A. Materiały izolacyjne lotne. Powietrze.

Z ciał lotnych, które mogą mieć praktyczne znaczenie w elektrotechnice jako materiały izolacyjne, najważniejszą rolę odgrywa powietrze. Występuje ono jako naturalny izolator wszędzie tam, gdzie nie zachodzi potrzeba innego bezpośredniego odizolowania części metalowych, znajdujących się pod napięciem (np. przy przewodach napowietrznych poza miejscami umocowania). Jego własności izolacyjne mogą być jednak także specjalnie wyzyskane przy niektórych konstrukcjach (izolatory przepustowe i t. d.). Dokładna zatem znajomość własności izolacyjnych powietrza, a głównie jego wytrzymałości, jest niezbędna we wszystkich prawie przypadkach, kiedy mamy do czynienia z wysokim napięciem.

Badanie zjawisk, zachodzących w powietrzu pod wpływem pola elektrycznego i praw temi zjawiskami rządzących, należy właściwie do fizyki; tutaj zajmujemy się tą sprawą ogólnie, zatrzymując się zato dłużej na praktycznej stronie zagadnienia w zastosowaniu do wysokich napięć przemysłowych. Najwięcej obchodzi nas elektryczna wytrzymałość powietrza przy rozmaitej postaci układów i w rozmaitych warunkach, oraz sposoby mierzenia tej wytrzymałości. Naprzód jednak musimy ustalić określenia zjawisk, zachodzących pod wpływem wysokiego napięcia w powietrzu.

1. Wyładowania elektryczne w powietrzu.

Jakkolwiek powietrze w normalnych warunkach jest dobrym izolatorem, to jednak izolatorem doskonałym nie jest. Przewodzi ono zawsze w mniejszym lub większym stopniu t. zn. że pod wpływem napięcia panującego między elektrodami zawsze płynie przez dielektryk (powietrze) większy lub mniejszy prąd.

Prąd elektryczny w gazie związany jest z ruchem cząstek gazu, naładowanych dodatnio lub ujemnie, które, ile możności, dążą w kierunku pola elektrycznego (mówiąc popularnie „wzdłuż linii pola”) do bieguna przeciwnego. Przy tym ruchu napotykają one inne cząsteczki gazu, o które się uderzają i przez to tracą na prędkości; ostatecznie prędkość ich jest mniej więcej proporcjonalna do natężenia pola w danym miejscu.

Jonizacja powietrza następuje albo skutkiem zewnętrznych czynników jonizacyjnych (jonizatorów), jak promienie pozajądowe, rentgenowskie, radioaktywne, rozżarzone cząstki ciała i t. d., które rozkładają obojętne cząsteczki na jony, — i wtedy nazywamy ją niesamodzielną, albo też powodują ją swobodne jony, będące zawsze, choć w drobnej ilości, w powietrzu, które pod wpływem dostatecznie dużego natężenia pola nabierają stosunkowo dużej prędkości, uderzają o cząsteczki obojętne i rozbijają je na jony, — taka jonizacja nazywa się samodzielną czyli bodźczą.

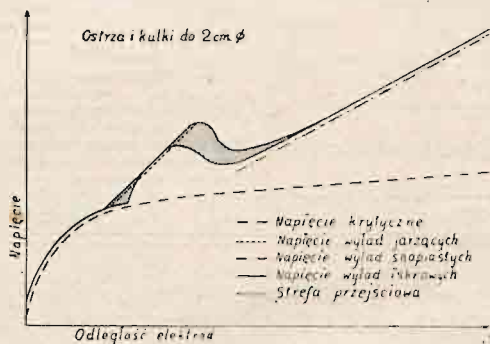
Jeżeli natężenie pola jest dostatecznie duże, to zjawisko powstawania nowych swobodnych jonów skutkiem ciągłego ich uderzenia o cząsteczki gazu, potęguje się lawinowo, a powietrze traci zdolności izolacyjne, stając się stosunkowo dobrym przewodnikiem, i wreszcie może nastąpić zupełny zanik izolacyjności skutkiem wytworzenia niejako kanału przewodzącego między elektrodami w postaci iskry lub łuku elektrycznego, a więc zwarcie elektrod.

Do wytworzenia tych zjawisk potrzebna jest zatem jonizacja powietrza oraz pewna minimalna prędkość jonów, a przeto dostatecznie duże natężenie pola, a więc i napięcie, przyłożone do elektrod. Z licznych badań wynika jednak, że na wywołanie zjawiska gwałtownego wyładowania między elektrodami wpływa nie tylko bezwzględna wysokość napięcia tam panującego, lecz w bardzo dużym stopniu także i kształt tych elektrod, a przez to i układ pola.

Postać wyładowań. Zależnie od kształtu i odstępów elektrod wyładowania mogą przybrać różną postać w miarę zwiększania napięcia. Wyładowanie może być zupełne, jeżeli następuje zwarcie między elektrodami w postaci iskry lub łuku elektrycznego, — jest to wyładowanie iskrowe lub łukowe, — przy czym wyładowaniu iskrowemu towarzyszy charakterystyczny trzask, a łukowemu huczenie. Jeżeli do zupełnego zwarcia nie dojdzie, to wyładowanie będzie niezupełne; wtedy przybiera ono postać jarzenia się elektrod, z których, o ile napięcie jeszcze się zwiększy lub o ile na nich znajdują się ostre występy, — wyskakują snopy iskier, — mówimy wtedy o wyładowaniu jarzącym lub snopiastym.

W niektórych razach mogą te postacie wyładowań zjawiać się kolejno w miarę wzrostu napięcia. Np. przy małych elektrodach kulkowych i dosta-

tecnie dużym odstępem, zobaczymy przy pewnym napięciu wyładowanie jarzące, które przejdzie przy zwiększaniu napięcia w snopiaste, a wreszcie w iskrowe lub, gdy źródło prądu jest dostatecznie zasobne—w łukowe (Rys. 1). W innych razach znowu, np. przy elektrodach o dużym promieniu



Rys. 1.

krzywizny i przy niewielkim odstępem, zjawiają się odrazu wyładowania iskrowe wzgl. łukowe, bez innych postaci poprzedzających.

Napięcie, przy którym występuje pierwszy objaw wyładowania nazywa się napięciem krytycznym lub początkowym. Może ono wpadać w napięcie przebiccia, przy którym następuje wyładowanie zupełne czyli przebiccie, lub też poprzedzać je, a zatem wpadać w napięcie jarzenia lub wyładowań snopiastych. Natężenie pola odpowiadające napięciu krytycznemu, nazywamy natężeniem krytycznym i sprawia ono naprężenie krytyczne, które określa największą wartość naprężenia, do jakiego nie powinno się dopuścić, aby układ wytrzymał jeszcze panujące na nim napięcie. Napięcie krytyczne warunkuje zatem wytrzymałość układu, jakkolwiek przy nim do przebiccia zupełnego może jeszcze nie dojść. W niektórych jednak razach układy mogą pracować—przynajmniej przejściowo—podczas wyładowań jarzących, a nawet snopiastych, bez widocznego uszczerbku dla ich wytrzymałości (zjawisko ulotu elektrycznego przewodów napowietrznych). Normalnie jednak o ile te wyładowania mogą nadpsuć izolację układu, nie należy do nich dopuszczać.

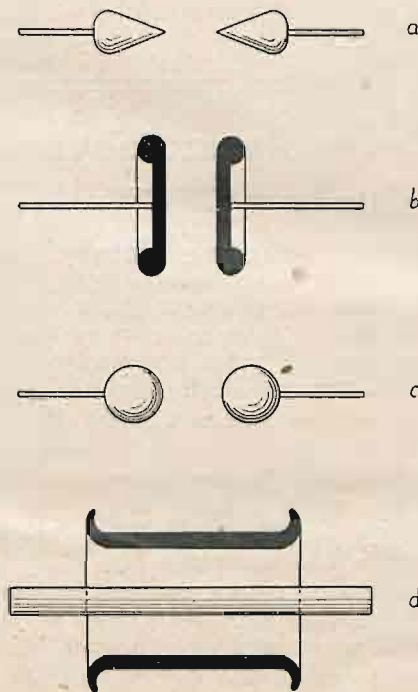
2. Napięcie krytyczne.

Chwilę występowania napięcia krytycznego przy wyładowaniu niepełnym naogół tylko z trudnością można dokładnie uchwycić i to wzrokiem lub także słuchem, jako słaby, suchy trzask. W niektórych przypadkach, np. przy elektrodach cylindrycznych spóśrodkowych, daje się ten trzask dosyć wyraźnie usłyszeć; pochodzi on z pierwszego gwałtownego rozrywania cząsteczki pod wpływem pola elektrycznego; na tej zasadzie zbudowane iskierniki pomiarowe dają dobre wyniki. Przy wyładowaniu zupełnym o ile występuje ono przy napięciu krytycznym, można względnie dokładnie określić wysokość tego napięcia; np. przy iskiernikach kulistych.

Wyznaczenie napięcia krytycznego jest szczególnie ważne przy badaniu wytrzymałości układów. Dla prądu zmiennego (mierzonego zwykle w wartościach skutecznych), przebiccie jest zależne od wartości maksymalnej, która odpowiada naogół wysokości odpowiedniego napięcia prądu stałego. Najle-

piej zatem (przy badaniu wytrzymałości układu) podawać wartości napięcia krytycznego lub przebiccia przy prądzie zmiennym w wartościach maksymalnych. Jest to wskazane zwłaszcza, gdy mamy do czynienia z odkształconą krzywą napięcia, co często występuje skutkiem dużych pojemności układu badanego.

Pomiar napięcia krytycznego uskutecznia się za pomocą iskierników pomiarowych o elektrodach kulistych, cylindrycznych, płaskich, rzadziej śpiczastych (Rys. 2.) Elektrody śpiczaste



Rys. 2.

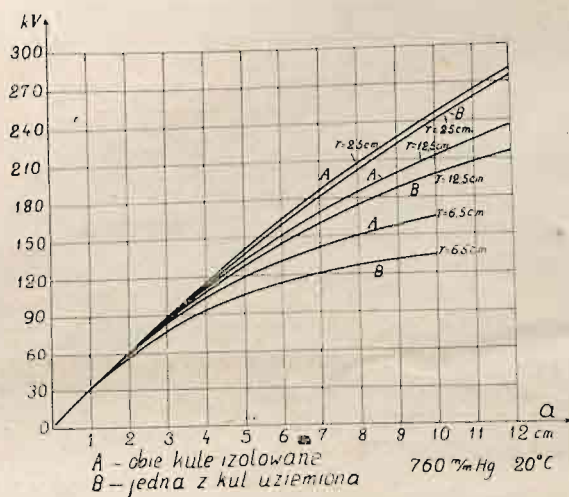
(a) stosuje się według przepisów amerykańskiego Instytutu inżynierów elektryków do napięć poniżej 30 kV. Takie ograniczenie w stosowaniu tych elektrod jest stawiane ze względu na stapianie się ostrzy pod wpływem łuku przy wyższych napięciach, co powoduje przy pomiarach znaczne błędy. Zjawisko wyładowań jarzących i snopiastych, występujących przy tych elektrodach, wpływa także ujemnie na dokładność pomiarów.

Elektrody płaskie (b) wykazują przy pomiarach pewne trudności w równoległym ustawieniu płaszczyzn oraz zakrzywienie pola na ich krańcach, co powoduje tam inne warunki pomiaru niż pośrodku. Mają jednak tę dużą zaletę, że przy nich odrazu występuje przebiccie, napięcie przebiccia wpada odrazu w napięcie krytyczne. Przy zastosowaniu pewnych środków ostrożności (lekką wypukłość płyt, łagodne zakrzywienie krawędzi) można za pomocą nich otrzymać dobre wyniki pomiarów.

Najdogodniejszym jest iskiernik o elektrodach kulistych (c), można go stosować przy wszelkich napięciach (zalecają go np. przepisy szwajcarskie). Używane tu kule w zależności od mierzonego napięcia, mają średnicę od paru do 1000 milimetrów. Napięcie krytyczne wpada odrazu w napięcie przebiccia, o ile odległość jest mniejsza od dwu do trzechkrotnej średnicy.

W. Petersen stosuje iskiernik cylindryczny, składający się z cylindra i pręta wewnątrz niego, przesuwanego równoległe do osi cylindra (d). Iskiernik ten pozwala, łatwiej niż inne, określić przebicie powietrza, bo suchy trzask, oznaczający napięcie początkowe wyładowań widzialnych, jest w nim wcześniejszy i wyraźniejszy. Napięcie początkowe nie jest jednak wtedy napięciem przebicia.

Ze względu na nierówny przebieg pola między rozmaitymi elektrodami należy zawsze, podając odległość przeskołu iskry w iskierniku pomiarowym, odpowiadającą pewnemu napięciu, zaznaczyć rodzaj elektrod, względnie ich promień krzywizny, gdyż dla tego samego odstępów otrzymujemy rozmaite wartości napięcia. Przebieg napięcia krytycznego w funkcji odległości elektrod, dla kul o różnych średnicach przedstawia (Rys. 3 *).



Rys. 3.

Wpływy postronne. Napięcie krytyczne zależy nie tylko od kształtu i odstępów elektrod. Różne czynniki postronne mają na to napięcie większy lub mniejszy wpływ. I tak, nie jest obojętnym, czy elektrody, między którymi mierzymy panujące napięcie, są obie izolowane, czy też jedna z nich uziemiona; czy wreszcie środek transformatora zasilającego te elektrody jest uziemiony czy też nie.

Uziemienie środka uzwojenia górnego napięcia transformatora daje symetryczny podział napięcia względem ziemi, wtedy na elektrodach mamy jednakowe $\pm 1/2 V$ względem ziemi. W przeciwnym razie napięcia te układają się nierównomiernie i zależne są od pojemności elektrod i przyległej części uzwojenia; przy małych jednak odstępach (mniejszych niż promień elektrody) nie daje się to odczuć. W razie uziemienia jednej elektrody otrzymuje się wartości napięcia krytycznego niższe, niż przy symetrycznym rozdziale napięcia np. przy kulach 12,5 cm i 10 cm przeskołu—197 kV wobec 213 kV.

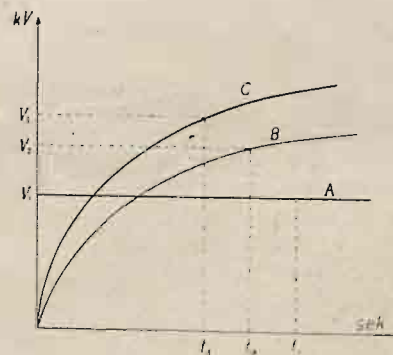
Temperatura ma wpływ na napięcie krytyczne, o ile przy tem zmienia się gęstość powietrza. Przy stałej prężności jest ono odwrotnie proporcjonalne do temperatury bezwzględnej. Prężność powietrza zwiększa napięcie krytyczne proporcjonalnie. Natomiast wilgotność w normalnych granicach nie ma

*) Według F. W. Peeka

na nie prawie żadnego wpływu. Podobnie i częstotliwość w normalnych granicach. Pole wytworzone przez napięcia, panujące między elektrodami, jest bardzo czułe na obce pola, względnie obce ładunki. Przeważnie przyspieszają one wyładowania, t. zn. zmniejszają napięcie krytyczne.

Obce ładunki mają bardzo duży wpływ na usunięcie zjawiska opóźniania się wyładowania iskrowego. Łatwo bowiem można zauważyć, że między chwilą przyłożenia do elektrody napięcia odpowiadającego napięciu przebicia a chwilą samego przebicia, upływa pewien, stosunkowo długi, okres czasu (sekundy). W ciągu tego czasu można chwilowo, nawet znacznie (stosunkowo) zwiększyć napięcie ponad napięcie przebicia,—i mimo to, do przebicia od razu nie dojdzie. Wygląda to, jakby wytrzymałość powietrza przy naprężeniach krótkotrwałych była większa niż przy dłuższych trwających. Pochodzi to stąd, że do wytworzenia iskry potrzeba pewnego czasu, zanim powietrze zjonizuje się w dostatecznym stopniu.

Również i szybkość wzrastania napięcia na elektrodach ma wpływ na napięcie krytyczne. Jeżeli np. prosta A (Rys. 4) przedstawia wysokość



Rys. 4.

ustalonego napięcia przebicia, a czas od chwili przyłożenia tego napięcia do chwili przebicia jest t_1 , to, jeżeli napięcie wzrosło według krzywej B, przebicie nastąpi po czasie t_2 krótszym, i przy napięciu V_2 wyższym od V_1 . Podobnie będzie $t_3 < t_2$, a zato $V_3 > V_2$. Im prędzej napięcie przyłożone wzrosło tem napięcie krytyczne bywa większe, i tem prędzej następuje przebicie. Z tego wynika, że fale o dużej częstotliwości, lub fale uskokowe o stromym przebiegu czoła, wywołują przebicie przy wyższych wartościach napięcia krytycznego niż o częstotliwości normalnej.

Przy określaniu wartości napięcia przebicia trzeba więc zwrócić uwagę na przebieg krzywej napięcia, który charakterzuje t. zw. (według F. W. Peeka) stopień impulsu*), równy stosunkowi napięcia krytycznego przy danej krzywej do tego napięcia przy krzywej normalnej. Zależnie od potrzeby można dążyć do dużego (izolatory) lub małego (ochronniki różkowe) stopnia impulsu.

Zjawisko opóźnienia się wyładowań może być osłabione lub usunięte przez sztuczne zjonizowanie przeskołu iskrowego za pomocą naświetlenia pro-

*) Journ. A. I. E. E. 1920.

mieniami pozafiołkowymi, radioaktywnymi itp., często wystarczy zwykła lampa łukowa, płonąca w pobliżu iskiernika.

Na podstawie powyższego zjawiska przy wszelkich pomiarach czy doświadczeniach zaleca się utrzymywanie równomiernego i powolnego podwyższania napięcia, aby zbliżyć się do warunków ustalonych. Wtedy można się zadowolnić tylko poprawkami ze względu na temperaturę i ciśnienie barometryczne.

Normalne tablice napięcia krytycznego dla różnych elektrod są podawane dla ciśnienia 760 mm sł. Hg i 25° C (wzgl. 20° C). Wtedy napięcie krytyczne V przy temperaturze $t^\circ\text{C}$ i ciśnienie b mm Hg będzie

$$V = \frac{b}{760} \cdot \frac{273 + 25}{273 + t} V_{(760 \text{ mm}, 25^\circ)} = \frac{0,392 \cdot b}{273 + t} V_{(760 \text{ mm}, 25^\circ)} \quad 1)$$

Zjawisko proporcjonalnego do prężności powietrza wzrostu napięcia przebicia można wyzyskać do otrzymania dużych wartości wytrzymałości powietrza. Np. powietrze o prężności 20 atmosfer ma wytrzymałość 20 razy większą od normalnego, przewyższa więc prawie wszystkie inne znane materiały izolacyjne. Ma to zastosowanie np. przy kondensatorach.

3. Wytrzymałość powietrza przy różnych układach.

Wytrzymałość powietrza, — którą określa się zwykle liczbą woltów, przypadających na centymetr grubości a warstwy powietrza, znajdującej się między elektrodami, pomiędzy którymi występuje napięcie krytyczne V_0 , — nie jest wielkością stałą, gdyż właśnie to napięcie krytyczne zmienia się zależnie od kształtu elektrod i innych wpływów postronnych. Naprężenie krytyczne F_0 , miarodajne dla wytrzymałości powietrza, również — jak poznaliśmy — zależy od tych warunków. O ile zatem $\frac{V_0}{a}$ określi dostatecznie wytrzymałość danego układu o powietrznym dielektryku o tyle, aby z góry można było podać wartość napięcia krytycznego trzeba znać $V_0 = f(V_0)$ dla danego układu. W niektórych przypadkach można oprzeć się na podstawie wzorów doświadczalnych.

Wytrzymałość powietrza jako takiego nie jest zatem wielkością, którąby można było wyrazić jako stałą materiału. Mówiąc przeto o wytrzymałości powietrza musimy zawsze zaznaczyć, do jakiego układu ona się odnosi, albo też zgodzić się z góry na pewien układ, o elektrodach określonego kształtu i określonej odległości.

Przy pomiarach wytrzymałości powietrza (względnie przy pomiarach napięcia krytycznego) używa się iskierników płaskich, cylindrycznych lub kulistych; stanowią one charakterystyczne układy powietrzne.

a) Układ o elektrodach płaskich. Elektrody płaskie, równoległe do siebie ułożono (Rys. 2-b) stanowią kondensator płaski powietrzny, w którego środku panuje pole jednostajne, a zatem występuje tam naprężenie jednakowe w każdym punkcie: $F = \frac{V}{a}$, jeżeli V oznacza napięcie przyłożone do elektrod, a a ich odstęp. (Ściśle biorąc, naprężenie tuż przy powierzchni elektrody jest nieco

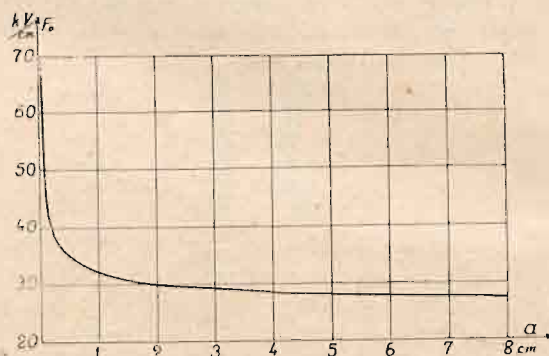
większe niż zdale od niej, a to wskutek specjalnego wpływu elektrod).

Naprężenie krytyczne takiego układu jest przeto;

$$F_0 = \frac{V_0}{a} \dots \dots \dots 2)$$

Znając więc napięcie krytyczne V_0 dla odstępów a , można zawsze obliczyć F_0 według powyższego wzoru. Naprężenie krytyczne (F_0) nie jest jednak wielkością stałą, — zależy bowiem od odstępów elektrod (a).

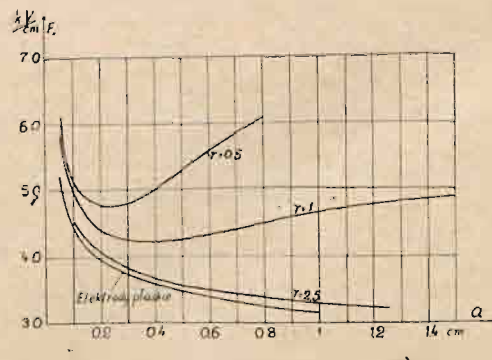
Przebieg naprężenia krytycznego F_0 w V/cm w zależności od odstępów elektrod płaskich w cm przedstawia Rys. 5. Widać z tego, jak naprężenie



Rys. 5.

krytyczne, a więc wytrzymałość powietrza, maleje z rosnącą odległością, czego zresztą można było się spodziewać na podstawie teorii jonizacyjnej wylądowań w powietrzu. Krzywa $F_0 = f(a)$ dąży — jak się zdaje — asymptotycznie do równoległej do osi odciętych, doświadczalnie bowiem nie doszło się jeszcze powyżej 12 cm odstępów elektrod ¹⁾. Wytrzymałość powietrza zmniejsza się zatem w miarę wzrostu grubości jego warstwy między elektrodami płaskimi. Dla grubości 1 cm wynosi około 31 kV/cm, powyżej 12 cm — ok. 26 kV/cm (w wartościach maksymalnych).

b) Układ o elektrodach kulistych. Elektrody kuliste, pomiędzy którymi panuje napięcie V (Rys. 2-c), wytwarzają pole niejednostajne, zależnie od wielkości tych elektrod i od ich odstępów. Przy małych promieniach r kul i małych odstępach a naprężenie krytyczne osiąga bardzo duże wartości, (Rys. 6) następnie z rosnącym odstępem



Rys. 6.

¹⁾ W. O. Schumann. Arch. F. E. 1922.

maleje i osiąga minimum, a później znów zaczyna rosnąć. Przy dużych promieniach przebieg jest podobny jak dla elektrod płaskich.

Zależność naprężenia krytycznego od promieni kul r w cm i odstepu a w cm da się wyrazić według F. W. Pecka następującym wzorem ¹⁾:

$$F_0 = \beta \frac{V_0}{a}, \text{ wzgl. } F_0 = \beta_0 \frac{V_0}{a} \dots \dots \dots 3)$$

gdzie V_0 jest napięciem krytycznym w wartościach skutecznych β i β_0 są współczynnikami, zależnymi od promieni kul i ich odstepu, β_0 stosuje się do przypadku, kiedy jedna kula jest uziemiona β , kiedy obie są izolowane.

Dla a zawartego w granicach między $0,54 \sqrt{r}$ a $2r$, mamy:

$$F_0 = 19,3 \left(1 + \frac{0,54}{\sqrt{\delta r}}\right) \text{ kV/cm.}$$

Współczynniki β i β_0 są znalezione doświadczalnie i podane w tablicach w zależności od stosunku $\frac{a}{r}$. W granicach $\frac{a}{r} = 0,1 \div 4 - \beta = 1,034 \div 2,686$, $a \beta_0 = 1,055 \div 3,20$.

Pole elektryczne między elektrodami jest bardzo czułe na wpływy pól obcych i to tem bardziej im większy jest odstep. Pochodzi to stąd, że im kule są dalej od siebie, tem mniej na siebie wpływają i tem bardziej jednostajna jest gęstość ładunku na powierzchniach. A zatem np. przewody łączeniowe i doprowadzenia do elektrod muszą znacznie wpływać na zmianę gęstości ładunku, a przeto i na ukształtowanie pola. Wobec tego pręty trzymające kule nie mogą być za cienkie, — mniejsze niż $\frac{1}{10}$ średnicy kuli, odstep elektrod nie większy niż dwukrotna średnica kul, a odległości elektrod od reszty konstrukcji iskiernika, od ziemi, względnie części uziemionych, ścian, transformatora itp. nie za małe, równe przynajmniej podwójnej długości odstepu. Wtedy dopiero można posługiwać się tablicami wzgl. wykresami, które zostały sporządzone dla normalnych, lecz ściśle określonych warunków pracy iskiernika.

Pomiar wytrzymałości powietrza za pomocą iskiernika kulistego daje różne wartości, wytrzymałość zatem powietrza i w tym przypadku nie jest stałą materiału lecz w znacznym stopniu zależną od kształtu i układu elektrod i innych warunków pomiaru. W porównaniu z pomiarami za pomocą iskierników płaskich otrzymujemy dla kul stosunkowo dużych (np. 25 cm i więcej) podobny przebieg naprężenia krytycznego jak dla płaskich, tylko wyżej leżący. Dla dużych odstepów, ponad 10 cm, naprężenie krytyczne dąży asymptotycznie do osi odciętych; osiągając wartorci nieco wyższe niż 30 kV/cm (maksym.)

c) Układ o elektrodach cylindrycznych. Najbardziej regularne pole, wolne od wpływów zewnętrznych ładunków i dające się dosyć ściśle obliczyć, daje układ złożony z cylindra wydrążonego i pręta okrągłego, umieszczonego wewnątrz spółśrodkowo (Rys. 2-d). Iskiernik taki, syst. Petersena ²⁾ można wobec tego stosować

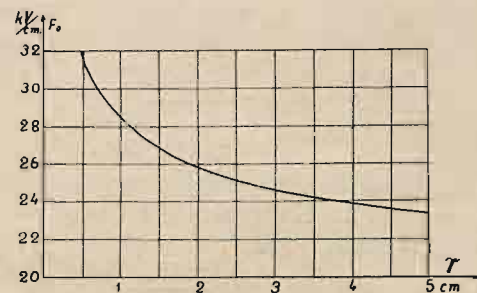
dla pomiarów dokładnych. Długość cylindra zewnętrznego musi być przynajmniej dwa razy większa niż jego średnica, a wewnętrznego przynajmniej jeszcze dwa razy tak duża.

Napięcie krytyczne takiego układu występuje prawie dokładnie, jak wypada z obliczenia lub z innych, ściślejszych pomiarów. Jest ona zależna od promieni obu elektrod: r — wewnętrznego i R zewnętrznego walca i wyraża się znanym wzorem:

$$F_0 = \frac{V_0}{r \lg \frac{R}{r}} \dots \dots \dots 4)$$

Naprężenie krytyczne takiego układu jest w większym stopniu zależne od promienia wewnętrznego walca niż zewnętrznego.

Z licznych pomiarów wypośrodkowaną krzywą zależności $F_0 = f(r)$ przy $R = \text{const}$ przedstawia Rys. 7. Przebieg jest prawie niezależny od R , a więc stosuje się do każdych wartości R .



Rys. 7.

Z poprzednich trzech przypadków pomiaru wytrzymałości powietrza widać, że nie jest ona stałą materiału, że raczej trzeba mówić o wytrzymałości układów powietrznych. Najlepsze wyniki pomiarów tej wytrzymałości dają elektrody płaskie. Na podstawie różnych pomiarów wypośrodkować można 25,7 kV/cm jako najprawdopodobniejszą wartość wytrzymałości powietrza przy dużych odstepach (przynajmniej kilkanaście centymetrów elektrod. Przy obliczeniach z grubsza i przy polach niezbyt odbiegających od jednostajnych orientacyjnie można ją przyjąć.

4. Ulot elektryczny.

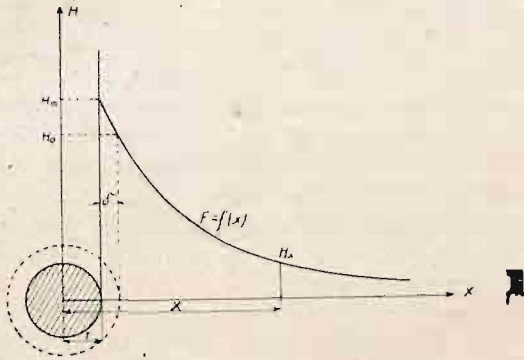
Drut pod wysokim napięciem po przekroczeniu pewnej granicy tego napręcia, zaczyna świecić w ciemności. Są to wyładowania jarzące, zachodzące między nim a drugą elektrodą, np. drugim drutem, ziemią lub przedmiotem uziemionym. Przewody linii elektrycznych zwykle wykazują te zjawiska przy napięciach powyżej 80 kV. Zjawisko jarzenia się przewodów może przybrać postać wyładowań snopiastych, wytryskujących z nierówności i występów na przewodach, zwłaszcza przy linkach. Pociąga to za sobą stałą stratę energii, która uchodzi w powietrze. Nazywamy to ulotem elektrycznym i mówimy, że linja posiada ulotność.

Zjawisko takie występuje, jeżeli napięcie robocze jest nieco — o określoną wartość większe od napięcia krytycznego V_0 danego układu. Napięcie to przy którym zaczyna się zjawiać ulot, nazywa się napięciem ulotu — V_u .

¹⁾ Proc. Amer. Inst. E. E. 1914.

²⁾ Petersen — Hochspannungstechnik, 1911.

Zawsze $V_u > V_0$. Tłumaczymy to sobie w sposób następujący (według H. J. Ryan'a)¹⁾: Naprężenie powstaje, otaczającego przewód cylindryczny przedstawia się w funkcji odległości x od przewodu jako pewna krzywa $F_x = f(x)$ (Rys. 8). Dla prze-



Rys. 8.

wodu izolowanego od ziemi i zawieszono w odległości a od niej (równolegle), funkcja ta posiada postać:

$$F_x = \frac{V}{x \log_n \frac{a}{r}},$$

gdzie V jest napięciem względem ziemi, r — promieniem przewodu. Naprężenie największe będzie na powierzchni przewodu.

$$F_m = \frac{V}{r \cdot \log_n \frac{a}{r}}$$

Jednakowoż jarzenie się nie zjawi się od razu, skoro tylko naprężenie na powierzchni drutu osiągnie tę wysokość; do tego potrzebna jest jeszcze jonizacja, która wystąpić może dopiero wtedy, skoro jony mają do dyspozycji pewną drogę do przebiecia, aby nabrać prędkości odpowiedniej do wywołania jonizacji lawinowej. Droga ta jest zależna od grubości drutu; przy cienkich jest ona mniejsza, a zato naprężenie potrzebne do wywołania wyładowania — większe; przy grubych odwrotnie. (Przy wszystkich drutach grubszych niż 0,5 cm ta droga jest prawie jednakowa i wynosi ok. 1,6 ÷ 1,8 mm).

Jarzenie na drutach przejawia się w postaci warstwy świecącej o grubości równej owej drodze przebiegu jonów. Warstwa ta, będąc dobrą przewodzącą, przedstawia niejako zwiększenie średnicy przewodu, na granicy zewnętrznej tej warstwy panuje właśnie naprężenie krytyczne:

$$F_0 = \frac{V_0}{(r+\delta) \log_n \frac{a}{r+\delta}} \dots \dots \dots (5)$$

Im bliżej przewodu tem naprężenie jest większe, przeto naprężenie na powierzchni drutu (F_m) musi być większe od F_0 ; $F_m > F_0$.

Na podstawie licznych pomiarów znaleziono, że między F_m i F_0 zachodzi związek:

$$F_m = F_0 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) \dots \dots \dots (6)$$

gdzie δ jest znanym współczynnikiem korekcyjnym ze względu na temperaturę (p. wzór 1) i ciśnienie barometryczne, a r — promieniem przekroju drutu

Jako naprężenie krytyczne F. W. Peek podaje wartość 29,8 kV/cm dla drutów i 25,7 kV/cm dla linek siedmiożyłowych tego samego przekroju. W wartościach skutecznych dla prądu zmiennego te naprężenia wyniosą odpowiednio 21,1 i 18,2 kV/cm.

Stosunek m naprężenia krytycznego dla pewnego przewodu do naprężenia krytycznego dla przewodu doskonale gładkiego wynosi

dla nowych, gładkich drutów $m = 1$

„ drutów chropowatych $= 0,98 \div 0,88$

„ linek $= 0,89 \div 0,72$

Napięcie maksymalne, przy którym występuje zjawisko jarzenia się drutów, czyli napięcie ulotu, przy uwzględnieniu współczynników korekcyjnych wynosi.

$$V_u = F \cdot m \cdot \delta \cdot r \log_n \frac{a}{r}$$

Uwzględniając wzór (6) i wartość F_0 .

$$V_u = 29,8 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{\delta \cdot r}} \right) m \delta r \log_n \frac{a}{r} \dots (7)$$

Powyższy wzór wyraża napięcie ulotu dla przewodu względem ziemi, w wartościach maksymalnych. Przy układzie dwuprzewodowym trzeba otrzymaną wartość pomnożyć przez 2, a przy trójfazowym — przez $\sqrt{3}$.

Napięcie ulotu zmniejsza się z rosnącym promieniem, t. zn. ulot występuje prędzej przy cienkich drutach niż przy grubych. Pozatem zależy od rodzaju i stanu przewodów, oraz stanu atmosfery. W razie silnych opadów, odwilży i tp. bierze się V_u ok. 0,8 wartości V_u , obliczonej dla ładnej pogody. Ulotność powoduje straty energii, którą można zmierzyć. Wprawdzie teoretycznie powinna ona występować przy każdym napięciu panującym między dwoma przewodami, lecz zwykle jest ona bardzo mała. Dopiero kiedy napięcie robocze przekroczy wartość napięcia ulotu straty stają się wyraźne i zależą od kwadratu różnicy tych napięć. Prócz tego zależą od średnicy drutu, odległości przewodów częstotliwości (są do niej proporcjonalne w granicach częstotliwości technicznej), stanu atmosfery, i t. d.

Te zależności można wyrazić doświadczalnie otrzymanym wzorem Peeka¹⁾

$$p = \frac{344}{\delta} f \sqrt{\frac{r}{a}} \left[V - V_u \right]^2 \cdot 10^{-5} \text{ kW/km} \dots (8)$$

dla jednego przewodu; napięcie tu wchodzi w wartościach skutecznych, w kV, r i a — w cm.

Straty do pewnego stopnia są zależne także od kształtu krzywej napięcia. Dla dwóch bowiem krzywych o tej samej amplitudzie lecz innego kształtu, czas trwania ulotu jest dłuższy przy krzywej płaskiej niż przy ostrej.

Straty z powodu ulotności nie są zbyt wielkie, wynoszą bowiem zwykle zaledwie parę kW na kilometr w niekorzystnych warunkach co przy dużych

²⁾ Trans. Amer. Inst. E. E.

¹⁾ l. c.

mocach przesyłanych na znaczne odległości nie zbyt wiele znaczy. Zawsze jednak 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).

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

5. Wyładowania ślizgowe.

Wyładowania w powietrzu przybierają nieco inną postać, jeżeli odbywają się tuż w pobliżu innego dielektryku, przedewszystkiem—stałego. Mamy wtedy przypadek równoległego połączenia dielektryków między elektrodami. W praktyce technicznej zachodzi to bardzo często, przy każdym izolatorze przewodowym, przepustowym, a przedewszystkiem—wsporczym. Zjawiska te występują obok przepływu prądu (zwykle minimalnego) po powierzchni izolatora stałego, która jest zawsze w pewnym przynajmniej stopniu, przewodzącą; odbywają się jednak w samym powietrzu, a mianowicie w jego warstwie przylegającej do tamtego izolatora, który tylko pośrednio bierze udział w tem zjawisku.

Najlepiej obserwować je można na płycie izolacyjnej między dwiema elektrodami płaskimi o ostrych krawędziach i powierzchni mniejszej niż powierzchnia płyty. Po przyłożeniu napięcia do elektrod narazie płynie tylko prąd powierzchniowy, przy zwiększaniu napięcia na krawędzi elektrody, przylegającej do płytki, pokaże się światelko dosyć jaskrawe; są to wyładowania krawędziowe.

Przy dalszem zwiększaniu napięcia nastąpią na powierzchni płytki tuż przy elektrodach wyładowania smużyste, — smugi światła jarzącego, które rozszerzają się stopniowo, aż zjawią się snopy świetlne wyskakujące z elektrod ku krawędziom i trzymające się tuż przy powierzchni, oraz pojedyncze iskry ślizgające się po powierzchni izolatora; są to wyładowania ślizgowe, które przy dalszym zwiększaniu napięcia dosięgają krawędzi płytki i wywołują przeskoki iskry naokoło dielektryku, o ile przedtem nie nastąpi przebicie.

Z tym zjawiskiem liczymy się przedewszystkiem przy izolatorach. Jakkolwiek przeskoki iskry naokoło izolatora jest niepożądany, to jednak lepiej jest dopuścić do niego niż do przebicia, które psuje izolator zupełnie, podczas gdy przeskoki iskry stanowią tylko chwilowe zwarcie elektrod przez powietrze.

Zjawisko wyładowań ślizgowych występuje z reguły na granicy dwóch dielektryków o różnych stałych dielektrycznych, leżących ukośnie do pola. Zwykle jednym z nich jest powietrze, lecz również i w oleju można obserwować wyładowania po powierzchni stałego izolatora, zanurzonego w oleju. Powstają one skutkiem naprężeń stycznych do powierzchni zetknięcia dielektryków. Jak wiadomo, natężenie pola elektrycznego, przechodzącego z jednego dielektryku do drugiego doznaje odchylenia tem większego im większa jest stała dielektryczna materiału do którego przechodzi¹⁾.

¹⁾ p. Podst. wytr. el. Przegl. Elekt. str. 131.

Natężenie to można rozłożyć na składową prostopadłą do powierzchni zetknięcia, naprężającą dielektryk na przebicie oraz styczną do tej powierzchni, powodującą wyładowania powierzchniowe, a więc naprężającą na przeskoki. Tylko w przypadkach, gdy linie natężenia pola są prostopadłe do powierzchni zetknięcia dielektryków,—do wyładowań powierzchniowych nie dojdzie. Przypadek prostopadłego przechodzenia linii pola elektrycznego przez dielektryk jest bardzo rzadki (w środku między okładzinami kondensatora płaskiego o dielektryku uwarstwionym), najczęściej pole jest skrzywione, przeważnie na krawędziach elektrod. Tam powstaje nadmierne skupienie linii pola i wyładowania wczesne, które powodują wytwarzanie swobodnych jonów; są to właśnie wyładowania krawędziowe.

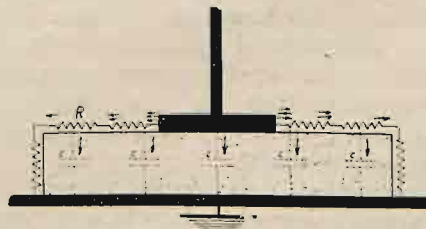
Powstające tu jony przebiegają drogę według linii pola elektrycznego. Jeżeli ośrodek jest jednolity, wyładowania powinny iść według prostych; zwykle powierzchnia izolatora i jej najbliższe otoczenie nie jest jednolite są pory, występy i tp., tak, że droga wyładowań zmienia się roznaicie.

Wyładowania krawędziowe występują szczególnie wyraźnie przy dużej różnicy w wartości stałych dielektrycznych izolatora i powietrza otaczającego. Na krawędzi elektrody, np. przy okładzinach kondensatora, znajduje się zawsze warstewka powietrza, zwłaszcza gdy okładzina odstaaje od dielektryku, gdyż w taką szczelinę wstępuje powietrze (o stałej dielektrycznej mniejszej).

Przez to wytrzymałość dielektryku jest mniejsza na krawędziach okładzin niż zdala od nich, gdyż skutkiem tych wyładowań następuje nierównomierne lokalne nagrzewanie się dielektryku, osłabiając go i sprowadzając wreszcie przebicie. Intensywność występowania tego zjawiska można zmniejszyć przez zastowanie izolatora o mniejszej stałej dielektrycznej. Na tej zasadzie opiera się budowa nowoczesnych kondensatorów.

Szkodliwy wpływ wyładowań krawędziowych na wytrzymałość izolatora stwierdzony został dla szkła w 1904 r. przez prof. I. Mościckiego,²⁾ który, celem zwiększenia wytrzymałości kondensatorów szklanych, zgrubiał miejsca dotykające krawędzi okładzin i otrzymał w ten sposób techniczne kondensatory w postaci cylindrycznej, wytrzymałające do 60 kV.

Powstawaniu wyładowań ślizgowych sprzyja zanieczyszczenie powierzchni. Nawet słabo przewodząca (zanieczyszczona) powierzchnia izolatora bierze również udział w rozdzieleniu napięcia na izolatorze, tak, że możemy ją sobie wyobrazić jako zbiór elementarnych elektrod (Rys. 9) stanowiących okła-



Rys. 9.

²⁾ E. T. Z. — 1904 str. 527.

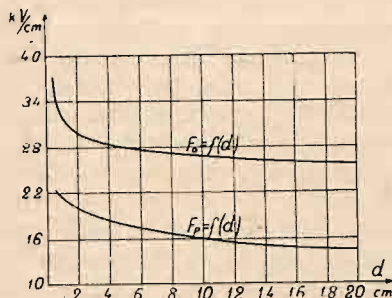
dziny elementarnych kondensatorów z przewodem jako drugą okładziną; okładziny pierwsze są połączone ze sobą równolegle dużym oporem powierzchniowym. Prąd ładujący płynie z jednej elektrody przez kondensatory, a następnie przez opór powierzchniowy R do drugiej elektrody, powodując większe spadki napięcia bliżej okładzin, gdzie też rzeczywiście występują największe naprężenia i zaczynają się wyładowania ślizgowe.

Im większa jest pojemność kondensatorów, tem większe są prądy pojemnościowe i tem wcześniejsze wyładowania ślizgowe. Dla uniknięcia tego zaleca się zmniejszenie pojemności przez stosowanie do budowy izolatorów materiałów izolacyjnych o małej stałej dielektrycznej.

Na tych rozważaniach oparta jest teoria i budowa izolatorów przepustowych i wsporczych, znana pod nazwą teorii prof. Kuhlmana z Zurychu. Podstawę do niej dały prace prof. Mościckiego.

Prawo, według których odbywają się wyładowania ślizgowe nie są jeszcze tak dobrze zbadane, jak wyładowań zwykłych w powietrzu. Ostatnie badania (Schweiger, 1922) 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; naprężenie krytyczne zmniejsza się z rosnącą odległością i t. d.

Rys. 10 przedstawia przebieg krzywej naprężeń



Rys. 10.

krytycznych w funkcji długości izolatora w przypadku izolatora porcelanowego. Dla porównania podana jest krzywa naprężeń krytycznych na przebicie F_0 dla powietrza. Jak widać, krzywa naprężeń krytycznych na przeskok F_p 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.

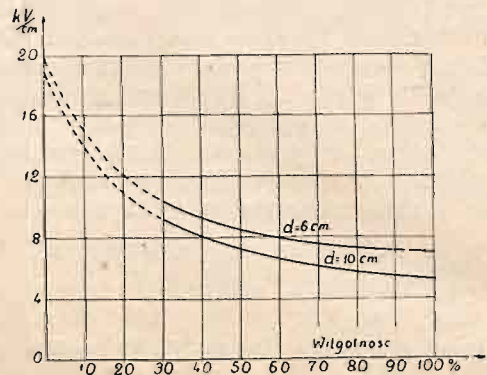
Niższe wartości krzywej F_p niż F_0 tłumaczą się wpływem wilgotności na powierzchni izolatora. Zależność naprężeń krytycznych na przeskok od wilgotności podaje Rys. 11 dla różnych długości przeskoku ($d=6$ i 10 cm). Widać, jak maleje ona ze wzrostem wilgotności.

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 zależ-

nie od stopnia wilgotności, spada ona bowiem dosyć znacznie z rosnącą wilgotnością.



Rys. 11.

Szerokość smugi wyładowań jarzących zwiększa się liniźnie 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 elektrycznego.

Urządzenia do wzorcowania liczników.

inż. J. Rzańnicki.

(Referat, wygłoszony w Warsz. Kole Stow. El. P.)

(Dokończenie).

Drugie podobne urządzenie służy do badania przyrządów jednofazowych, dwu lub trójprzewodowych z zakresem pomiaru 50 A, 380 V i jest zasilane przez podwójną przetwornicę jednofazową.

Prócz tego jest jeszcze urządzenie dla prądu jednofazowego i dwufazowego skojarzonego i nieskojarzonego do 600 V i 100 A. Zasilanie odbywa się prądnicą Oerlikona, za pośrednictwem transformatora Scotta.

Do badania przyrządów prądu stałego w układzie dwu lub trójprzewodowym służy kompletnie urządzona stacja, której obwód napięciowy otrzymuje napięcie w granicach 0—240 V od baterji akumulatorów I, II i III, łączonych po dwie lub napięcie w granicach 240—1500 V od maszyn prądu stałego firmy „Cie de l'industrie électrique et mecanique”. Obwód prądowy jest zasilany baterją IV prądem 0—400 A.

Wszystkie przyrządy lusterkowe, jak: galwanometry, elektrometry, galwanometry wibracyjne, dynamometry wibracyjne, dynamometry i t. d. są ustawione na konsolach, przymocowanych do ścian. Urządzenia odczytowe, składające się z lunet i lampek żarowych dla oświetlenia skal, firmy Hartmanna i Brauna. Lunety odczytowe są umocowane na specjalnych rusztowaniach, wpuszczonych w mur. Przewody, prowadzące do przyrządów lusterkowych są prowadzone swobodnie w powietrzu w celu zapewnienia im dobrej izolacji.