

SEKCJA MIERNICTWA ELEKTRYCZNEGO.

O WYMIARACH WIELKOŚCI FIZYCZNYCH.

Inż. Czesław Rajski.

Streszczenie. Z analizy własności wymiarów wielkości fizycznych jest wyprowadzone pewne ogólne twierdzenie, które w zastosowaniu prowadzi do redukcji ilości jednostek podstawowych. Równoległe z analizą formalną jest przedstawione fizyczne znaczenie otrzymywanych wyników.

W roku ubiegłym ukazała się na tem miejscu *) interesująca praca prof. Fryzego „Jednostki fizyczne i techniczne”, w zakończeniu której autor wzywa do nawiązania dyskusji na poruszony przez siebie temat. Pozwalam sobie skorzystać z tego wezwania i zgłosić niniejsze skromne uwagi tem chętniej, że temat jest jeszcze daleki od wyczerpania, pomimo istnienia w tej dziedzinie stosunkowo obfitej literatury.

Elektrotechnika teoretyczna jest nie tylko oparciem dla wiedzy praktycznej, lecz również działem fizyki, w ramach której żyje i rozwija się niezależnie od swych zastosowań. Dlatego też elektrotechnika teoretyczna jest nie do pomyślenia w oderwaniu od całości fizyki. Ewolucja fizycznych koncepcji i poglądów musi przenikać elektrotechnikę teoretyczną niezależnie od przyzwyczajień i potrzeb codziennego życia. Ewolucja ta może nieść za sobą zmiany pojęć, jednostek i teorii, które w zastosowaniu praktycznym mogą się wydawać obce, sztuczne i niezrozumiałe, mogą się okazać w najwyższym stopniu niewygodne, jednak nie będą przez to mniej celowe i logiczne z punktu widzenia fizycznego. Z drugiej strony potęga życiowa dzisiejszej elektrotechniki, bezwładność myślowa wielu tysięcy elektryków oraz potrzeby prostoty i szybkości myślenia praktycznego dają niewielkie szanse teoretycznie najbardziej słusznym, lecz trudno zrozumiałym lub praktycznie zbędnym ideom do prześlągnięcia w obieg nie tylko powszedni, ale nawet nieco odświeżony. Dlatego też trzeba jasno oddzielać sprawy praktyczności tych lub innych ujęć elektrotechniki teoretycznej od ich poprawności. Trudno byłoby przypuszczać, że ewolucja teoretyczna nauk przyrodniczych idzie w kierunku ułatwienia manipulacji pojęciami i wielkościami, interesującymi w praktyce; rozwój fizyki świadczy nieledwie we wszystkich dziedzinach o czemś wręcz odwrotnym.

Wysuwa się zarzut przeciwko wymiarom C. G. S. wielkości elektrycznych, że wykładniki w symbolach wymiarów są ułamkowe, przez co wymiary są niewygodne w użyciu. Jest to zarzut zupełnie racjonalny z punktu widzenia praktycznego, gdybyśmy jednak my, elektrycy, poszli do fizyków z pretensją o to, moglibyśmy otrzymać słuszną odpowiedź: „Cieszcie się, że te wykładniki nie są niewymierne”. Gdy jednak dwoistość wymiarów wielkości elektrycznych w układach elektrostatycznym i elektromagnetycznym, nie tylko jest dla nas kłopotliwa, ale niepokojąca i niezrozumiała, wówczas mamy prawo żądać od fizyków wyjaśnienia. Fizycy mogą nam swój punkt widzenia wyłożyć

lub przyznać się do niewiedzy, ale nie mogą nas wyprosić za drzwi, tak jak w pierwszym wypadku.

Rozróżnienie powyższe jest, zdawałoby się, tak oczywiste, że prawie nie warto zaznaczać. W rzeczywistości dzieje się inaczej — systemy jednostek C. G. S. elektrostatyczny i elektromagnetyczny posłużyły za podstawę (głównie ten drugi) dla układu jednostek praktycznych. W końcu ubiegłego stulecia określono i nazwano osiem jednostek: amper, kulomb, om, wolt, farad, henr, joule, wat. Zostały one określone, jako pewne wielokrotności jednostek C.G.S. Maxwell zauważył, że te osiem jednostek można otrzymać wprost z jednostek długości, masy i czasu, wychodząc z jednostki długości, wynoszącej 10^9 cm, jednostki masy 10^{-11} gr. i jednostki czasu 1 sek. Gdyby chciano zrobić z tego konsekwentny użytek i traktować zespół tych ośmiu jednostek, jak układ, oparty na zmienionych jednostkach podstawowych, to wówczas dalsze jednostki pochodne wypadłyby praktycznie nie do przyjęcia, np. jednostką gęstości prądu byłby amper na 10^{18} cm² i t. p.

W miarę rozwoju elektrotechniki i powiększania ilości pojęć i ich jednostek możliwości powstawania podobnie niemiłych konsekwencji są coraz większe. Pomimo tego uczyniono i czyni się nadal szereg prób oparcia jednostek praktycznych na kilku odpowiednio dobranych jednostkach podstawowych, np. proponowano, jako jednostki podstawowe metr, kilogram, sekundę, om (Giorgi), centymetr, 10^7 gramów, sekundę (Dellinger i Bennett), om, amper, sekundę, centymetr (Blondel), centymetr, 10^9 gramów, 0,1 kulomba, sekundę (Germani). Każdy z tych układów posiada jakieś wady, wykluczające możliwość jego zastosowania, zaś wszystkie charakteryzuje jeden wspólny szczegół — nieodróżnianie dwóch zasadniczo różnych momentów: doboru wielkości podstawowych i doboru jednostek tych wielkości. Dobranie jednostek podstawowych jest zagadnieniem, co do którego wagi teoretycznej mogą istnieć różne zdania, ale w każdym razie sprawa doboru jednostek dla tych wielkości jest najzupełniej odrębna od poprzedniej. Wszystkie proponowane systemy mają ambicję podniesienia grupy używanych w praktyce jednostek elektrycznych z rangi zespołu do rangi układu, nie określają jednakże, czemu się wyrażał zysk udania się podobnego przedsięwzięcia. Otóż, zdaniem naszym, o wiele lepiej jest zostawić sytuację w takim stanie, w jakim znajduje się ona obecnie. Jednostki praktyczne stoją w określonym stosunku do jednostek układu C. G. S., ale pozatem same w sobie stanowią scharmonizowany wewnętrznie układ, oparty mocno na własnych wzorcach, żywy, zdolny do dalszego rozwoju i czynienia zadość potrzebom praktycznym pojęć i pomiarów. Teoria jednostek i ich wymiarów musi się zasadniczo rozwijać swoją drogą, a praktyka — swoją. Niewątpliwie nonsensem byłoby wyciągnięcie konsekwencji ze wspomnianego poprzednio faktu, że układ praktyczny można uważać jako układ bezwzględny o jednostce długości równej jednej czwartej ziemskiego południka (10^9 cm) i liczenie średnicy

*) „Przegląd Elektrotechniczny”, 1933, zeszyty 11, 13, 14, 15 i 16.

drutów nawojowych w stosunku do obwodu ziemi, ale równie wielkim nonsensem teoretycznym jest obieranie *oma*, jako jednostki podstawowej. Bowiem z punktu widzenia fizycznego oporność jest pewnym wyrażeniem kombinowaniem, w skład którego wchodzi współczynnik, charakteryzujący pewne własności ciała (oporność właściwa) oraz wymiary geometryczne tego ciała. Takie wyrażenie nie występuje poza równaniem definicyjnym oporności (prawo Ohma) w żadnych innych równaniach fizycznych.

Jeśli chodziłoby o zamianę podstawowych jednostek długości, masy i czasu częściowo lub całkowicie przez jednostki innych wielkości, to, być może, wchodziłyby w grę energia, moment magnetyczny, ładunek, potencjał grawitacyjny i inne, ale na takiej liście napewno nie znalazłaby się oporność. Dlatego też *om*, który w praktyce może naprawdę jest najbardziej często używaną jednostką, nie może mieć żadnych pretensyj do wzbudzania dla siebie zainteresowań teoretycznych. Trudno o bardziej jaskrawy przykład sprzeczności wymagań teorii i praktyki, bowiem *om*, jako jedna z jednostek, posiadających wzorzec podstawowy dla praktyki pomiarowej, jest siłą rzeczy jednostką podstawową, niezależnie od koncepcji teoretycznych.

Często można się spotkać w literaturze z zarzutem, skierowanym w stronę teorii wymiarów, że różne wielkości posiadają te same wymiary. Otóż symbol wymiaru pewnej wielkości fizycznej posiada jedno i tylko jedno znaczenie: wskazuje, w jakim stosunku zmieniają się jednostki pewnych wielkości uznanych, jako pochodne, przy zmianie jednostek innych, niezależnych od siebie wielkości, uznanych za podstawowe. Jeśli pewna wielkość fizyczna posiada wymiar

$$A^a B^b C^c,$$

gdzie *A*, *B*, *C* są symbolami ogólnymi bliżej nieokreślonych jednostek wielkości, niezależnych od siebie i przyjętych za podstawowe, to oznacza to, że przy zwiększeniu jednostki *A* *m* razy, jednostki *B* *n* razy i jednostki *C* *p* razy, jednostka wielkości pochodnej wzrośnie w stosunku

$$m^a n^b p^c,$$

Na tej podstawie jest oparta znana metoda kontroli równań, których wymiary po obu stronach winny być te same.

Żadnego innego znaczenia, poza zawartym w podanym określeniu, symbol wymiaru nie posiada i jakiegokolwiek koncepcje teoretyczne na wymiarach oparte mają znaczenie i wartość li tylko zgadywania.

Z określenia znaczenia wymiaru nie wynika bynajmniej, że dwie lub więcej wielkości nie mogą mieć tego samego wymiaru, bo oznacza to tylko, że ich jednostki są w jednakowy sposób zależne od jednostek podstawowych. Niekiedy wskazuje to na ich jednorodność fizyczną, niekiedy inne czynniki różniczkują je wyraźnie. Np. praca i moment obrotowy mają jednakowe wymiary, ponieważ powstają w jednakowy sposób przez mnożenie wartości siły przez wartość pewnej długości, jednak w jednym przypadku mamy do czynienia z iloczynem skalarowym, w drugim — z wektorowym, co nie znajduje odbicia w wymiarze, który uwzględnia tylko wartości skalarowe.

Nieco trudniej przedstawia się sprawa, gdy ta sama wielkość ma dwa różne wymiary, jak to ma miejsce w stosunku do wszystkich wielkości elektrycznych i magnetycznych. Istotnie, ładunek elektryczny w układzie elektrostatycznym ma wymiar

$$\frac{3}{L^2} M^{\frac{1}{2}} T^{-1}$$

zaś w elektromagnetycznym

$$\frac{1}{L^2} M^{\frac{1}{2}}$$

Jeśli za jednostkę długości przyjmie się najpierw centymetr, a potem metr, to jednostka ładunku w układzie elektrostatycznym wzrośnie przy tej zmianie 1000-krotnie, a w układzie elektromagnetycznym 10-krotnie. Ta sama jednostka nie może jednak zmieniać się jednocześnie w dwóch odmiennych stosunkach, tkwi w tem jakaś sprzeczność.

Tę samą sprzeczność prof. Fryze uwidocznia przez przyrównanie do siebie pewnego ładunku elektrycznego, wyrażonego w jednostkach ES i EM. Na str. 420 wspomnianego artykułu czytamy: „Jednakże po uproszczeniu wypada z tej drugiej równości

$$1 = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm/sek.}$$

czyli prędkość światła równa jedności, czego po pierwsze nie zakładaliśmy ani w układzie ES, ani w układzie EM, a po drugie nie rozumiemy”. Jest to niezmiernie trafne ujęcie trudności sytuacji. Właśnie naszym zdaniem jedyną rzeczą do zrozumienia jest to, że szybkość światła musimy przyjąć, jako równą jedności. Dowodzić tego nie trzeba, wystarczy przypomnieć podstawowe rysy szczególnej teorii względności.

Czas i przestrzeń istniały w fizyce klasycznej, jako dwie formy poznania apriorycznego, niezależne od siebie. Teoria względności pokazała, że ta niezależność nie da się utrzymać. Koniecznym się stało uznanie, że świat, w którym żyjemy, stanowi czterowymiarowe continuum przestrzenno-czasowe, w którym czas i przestrzeń przenikają się nawzajem w taki sposób, że pewne zjawisko, obserwowane z jednego układu, ma tylko składowe przestrzenne, obserwowane z drugiego układu, ma również składowe czasowe, zaś wartość bezwzględna mają tylko orzeczenia, dotyczące określonej kombinacji stosunków przestrzennych i czasowych. Rozbicie tej kombinacji na składowe przestrzenne i czasowe zależy od stanu ruchu, obserwatora w stosunku do układu obserwowanego. Różni obserwatorzy, osadzając z różnych układów, otrzymają różne wyniki, jeśli będą je rozbijali na składowe przestrzenne i czasowe, osądzone ze swoich układów; dopiero pewna kombinacja wyników obserwacji każdego z nich posiada wartość bezwzględną, jest niezmiennikiem, to jest tem, co zostanie jednakowo zmierzane we wszystkich układach. Trójwymiarowa kinematyka przechodzi w czterowymiarową geometrię, ciało nieruchome kreśli linię prostą, równoległą do osi czasu, ciało w ruchu jednostajnym kreśli jakąś prostą, pochyloną względem osi czasu, ciało w ruchu przyspieszonym kreśli jakąś krzywą i t. p. Skoro jednak czas i przestrzeń nie są niezależne od siebie, jednostka długości określa jednostkę czasu i na odwrót. Jedną z tych jednostek możemy obrać dowolnie, druga jest tem samem ściśle określona. Jeśli obierzemy dowolnie jednostkę długości, to jednostką czasu będzie czas, który zużywa światło na przejście tej jednostki długości. Jeśli jednostką długości będzie 1 cm, to jednostką czasu będzie czas, w ciągu którego światło przechodzi drogę 1 cm. Zatem mamy możliwość mierzenia czasu wprost w centymetrach. Zwykle mierzymy czas w sekundach. Sekunda jest jedną miarą czasu, centymetr inną miarą. Pomiedzy temi miarami czasu istnieje jednoznaczna zależność

$$1 \text{ sek.} = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm} \quad \dots \quad (1)$$

Te same jednostki mierzą odległość. Długość odcinka można wyrażać zarówno w centymetrach, jak w sekundach. Jest to konsekwencją równouprawnienia oraz izotropowości czasu i przestrzeni. Izotropowość continuum przestrzennego — czasowego upatrujemy w tem, że dwa układy, znajdujące się względem siebie w ruchu, mają pochylone względem siebie osie czasu. Oś czasu niema ogólnie określonego

położenia, zaś miara czasu musi być zawsze ta sama niezależnie od położenia osi czasu w continuum przestrzenno-czasowym. Jedyną miarą, która czyni zadość temu warunkowi, jest ta sama miara, co w przestrzeni, miara długości. Gdyby szybkość światła była nieskończenie wielką, oś czasu miałaby ten sam kierunek we wszystkich układach odniesienia, niezależnie od stanu ich wzajemnego ruchu, czas i przestrzeń byłyby niezależne od siebie, można byłoby stosować dowolne niezależne od siebie jednostki długości i czasu. Ponieważ szybkość światła, największa, jaką znamy, jest skończona, jednostki długości i czasu muszą być te same. Szybkość jest zatem bez wymiaru, szybkość światła jest równą jedności, każda inna szybkość fizyczna mierzy się ułamkiem właściwym. Ilość ruchu ma wymiar masy, ginie różnica wymiarów i jednostek w układach elektrostatycznym i elektromagnetycznym, do czego wrócimy później, energia otrzymuje wymiar masy i może być mierzona w gramach ($1 \text{ kWh} = 40 \mu\text{gr}$) i t. p.

W ten sposób dochodzimy do tego samego wyniku, który został otrzymany poprzednio niejako wypadkowo drogą porównywania wielkości elektrycznych, wyrażonych w dwóch różnych układach. Jednak ten wynik, który wydaje się nieledwie nonsensem, gdyż otrzymany ad hoc nie wiąże się ze współczesnymi mu pojęciami, staje się czemś oczywistym, gdy zostanie związany z innymi faktami. Gdyby nie rewizja pojęć przestrzeni i czasu, spowodowana przez negatywny wynik doświadczeń Michelsona, równanie (1) byłoby dla nas równie niezrozumiałe, jak przed trzydziestu laty.

Opierając się na zyskanym w tym przypadku doświadczeniu, pozwalamy sobie sformułować następujące ogólne twierdzenie z dziedziny teorii wymiarów: „Jeśli, wychodząc z pewnych jednostek, przyjętych za podstawowe, dochodzimy do różnych wyrażen na jednostki pochodne, oznacza to, że jednostki podstawowe nie są niezależne od siebie”.

Przez porównanie różnych wymiarów jednostek pochodnych otrzymujemy pewną zależność pomiędzy jednostkami podstawowymi. Zależność może być dla nas całkowicie niezrozumiała z punktu widzenia naszych pojęć fizycznych, ale będzie wówczas wskazywała na to, że jeszcze czegoś nie wiemy.

Raz już byliśmy w takiej sytuacji. Przez porównanie wymiarów w układach ES i EM doszliśmy do równania wymiarowego

$$T = L \quad (2)$$

którego znaczenie fizyczne wyjaśniła nam szczególna teoria względności. Na podstawie tej równości dwa układy wymiarów i jednostek, elektrostatyczny i elektromagnetyczny, redukują się do jednego układu. W załączonej tabeli w trzech rubrykach figurują wymiary wielkości, w innych trzech rubrykach — wartości jednostek tych wielkości, przy jednostkach podstawowych centymetr, gram i sekunda, względnie centymetr i gram.

Jako drugi z kolei przykład zastosowania wymienionego twierdzenia rozpatrzmy wymiar siły. Z prawa bezwładności określamy wartość siły

$$F = am, \quad (3)$$

co wyrażamy słownie: wartość siły jest równa iloczynowi wartości masy przez wartość przyspieszenia.

Na tej zasadzie jednostką siły nazywamy taką jej wartość, która jednostkowej masie nadaje jednostkowe przyspieszenie. Następnie siłę przyciągania wzajemnego dwóch ciał prawo grawitacji określa w postaci

$$F = C_1 \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (4)$$

gdzie C_1 oznacza współczynnik proporcjonalności. Słownie

ostatnie równanie wyrażamy w ten sposób: siła, z jaką przyciągają się dwa ciała, jest proporcjonalna do iloczynu wartości ich mas i odwrotnie proporcjonalna do kwadratu ich odległości. Siła jest niezmiennym pojęciem fizycznym niezależnie od tego, czy jej źródłem są działania grawitacyjne, czy jakiegokolwiek inne, wobec czego równanie (4) możemy napisać bez współczynnika proporcjonalności

$$F = \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (5)$$

słowami: siła przyciągania się dwóch ciał jest równa iloczynowi z wartości ich mas podzielonemu przez kwadrat odległości. Stąd określamy jednostkę siły, jako równą siłę przyciągania się dwóch jednostkowych mas, umieszczonych od siebie na jednostce odległości. Wówczas równanie bezwładności napisalibyśmy przez analogię w postaci

$$F = C_2 am, \quad (6)$$

i, wyrażając je słownie: siła, jaką należy użyć, aby zmienić szybkość ciała, jest proporcjonalna do iloczynu z wartości masy przez wartość przyspieszenia. Mamy zatem dwie alternatywy: albo z równania bezwładności (3) określić jednostkę siły i wprowadzić ją przy pomocy odpowiedniego współczynnika proporcjonalności do równania grawitacji (4) (jak to robimy zwykle), albo z równania grawitacji (5) określić jednostkę siły (układ astronomiczny) i wprowadzić ją przy pomocy innego współczynnika proporcjonalnie do równania bezwładności (6).

Jest oczywiście, że obie metody postępowania są równie dobre, a właściwie równie złe, skoro nie mamy kryteriów do uznania jednej z nich za słuszniejszą od drugiej. Jeśli nie mamy jednak żadnych motywów, któreby skłaniały nas do uznania prawa bezwładności za bardziej nadające się do oparcia na niem jednostki siły od równania grawitacji lub naodwrot, musimy obie alternatywy odrzucić. Jakie są inne możliwości? Prawo bezwładności możemy wyrazić równaniem (3) lub (6), prawo grawitacji — równaniem (4) lub (5); do jednoczesnego wyrażenia obu praw mamy do wyboru cztery kombinacje; z pośród nich dwie, t. zn. (3), (4) i (5), (6), odrzuciliśmy, jako niezadowalające; pozostają nam alternatywy (3), (5) i (4), (6).

Ostatnia wprowadza współczynniki proporcjonalności do obu praw: bezwładności i grawitacji. Logiczniejsza od poprzednich nowa koncepcja również się nie da utrzymać, ponieważ współczynniki proporcjonalności, aczkolwiek związane ze sobą zależnością

$$\frac{C_1}{C_2} = K \quad (K — stała grawitacji),$$

pozostają nieoznaczone, tak że jednostki siły wogóle nie możemy zdefiniować bez dodatkowych założeń, wprowadzających moment dowolności. W szczególności założenia

$$C_1 = 1 \text{ lub } C_2 = 1$$

prowadzą do poprzednio odrzuconych kombinacji (5), (6) i (3), (4), tak że trzecia alternatywa zawiera dwie pierwsze, jako wypadki szczególne*). Pozostaje do rozpatrzenia jedynie czwarta kombinacja (3), (5). Jej przyjęcie oznacza fizycznie, że ta sama jednostka siły może być równie dobrze

*) Jest to identycznie to samo, co w elektrotechnice. Stała dielektryczna próżni i przenikalność magnetyczna próżni są związane ze sobą zależnością

$$\epsilon \mu = c^2$$

Jeśli założyć $\epsilon = 1$, to się otrzymuje układ elektrostatyczny, jeśli założyć $\mu = 1$, to się otrzymuje układ elektromagnetyczny. Dowolność obu założeń wprowadza do współistnienia dwóch różnych układów wymiarów i jednostek. Dopiero równanie (2) usuwa chaos, doprowadzając do równości $\epsilon = \mu = c = 1$

określona z prawa grawitacji, jak i z prawa bezwładności. Jest to niewątpliwie najbardziej logiczne postawienie sprawy, należy jednak zbadać, do jakich konsekwencji ono nas prowadzi.

Wymiary siły, określone z równania (3).

$$F = L M T^{-2}$$

i z równania (5)

$$F = L^{-2} M^2,$$

muszą być sobie równe, skąd wyprowadzimy

$$M = L^3 T^{-2},$$

czyli jednostki masy, długości i czasu przestają być niezależne od siebie.

Jeśli przyjmiemy jednostkę masy za pochodną, to łatwo obliczymy, że pomiędzy nową jednostką masy a masą jednego grama zachodzi zależność

$$1 \text{ gr} = 6,585 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ sek.}^{-2}$$

Eliminując czas, przy pomocy równań (1) i (2) otrzymamy równanie wymiarowe

$$M = L \dots \dots \dots (7)$$

oraz zależność liczbowa

$$1 \text{ gr} = 7,3 \cdot 10^{-29} \text{ cm.}$$

Fizyczne znaczenie tych równań jest niezrozumiałe, aż do interpretacji zjawisk ciężenia przez ogólną teorię względności. Podstawowe równanie tej teorii mówi nam, że pewna miara krzywizny (wymiar L^{-2}) czterowymiarowej rozciągłości przestrzenno-czasowej jest równa gęstości masy (i energii).

Wymiarowo równanie to

$$M L^{-3} = L^{-2}$$

daje nam wprost wynik (7).

Tablica wymiarów i jednostek.

Jednostki podstawowe	L, M, T				L, M	
Układ	Elektrostatyczny		Elektromagnetyczny		Zredukowany	
Wielkość	Wymiar	Jednostka	Wymiar	Jednostka	Wymiar	Jednostka
Czas	T	sek	T	sek	L	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-10}$ sek
Szybkość	$L T^{-1}$	cm/sek	$L T^{-1}$	cm/sek	—	$3 \cdot 10^{10}$ cm/sek
Siła.	$L M T^{-2}$	dyna	$L M T^{-2}$	dyna	$L^{-1} M$	$9 \cdot 10^{21}$ dyn
Energja	$L^2 M T^{-2}$	erg	$L^2 M T^{-2}$	erg	M	$9 \cdot 10^{29}$ erg
Moc.	$L^3 M T^{-3}$	10^{-7} w	$L^3 M T^{-3}$	10^{-7} w	$L^{-1} M$	$27 \cdot 10^{23}$ w
Ładunek.	$\frac{3}{2} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$ Cb	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2}$	10 Cb	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2}$	10 Cb
Potencjał elektrostatyczny	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	300 V	$\frac{3}{2} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	10^{-8} V	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2}$	$9 \cdot 10^{12}$ V
Pojemność	L	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F	$L^{-1} T^2$	10^{-9} F	L	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F
Indukcja pola elektrycznego.	$L^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$ Cb/cm ²	$L^{-\frac{3}{2}} \frac{1}{M^2}$	10 Cb/cm ²	$L^{-\frac{3}{2}} \frac{1}{M^2}$	10 Cb/cm ²
Natężenie pola elektrycznego	$L^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	300 V/cm	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	10^{-8} V/cm	$L^{-\frac{3}{2}} \frac{1}{M^2}$	$9 \cdot 10^{12}$ V/cm
Stała dielektryczna.	—	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F/cm	$L^{-2} T^2$	10^{-9} F/cm	—	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$ F/cm
Natężenie prądu	$\frac{3}{2} \frac{1}{M^2} T^{-2}$	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-9}$ A	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	10 A	$L^{-\frac{1}{2}} \frac{1}{M^2}$	$3 \cdot 10^{11}$ A
Oporność	$L^{-1} T$	$9 \cdot 10^{11}$ Ω	$L T^{-1}$	10^{-9} Ω	—	30 Ω
Indukcyjność.	$L^{-1} T^2$	$9 \cdot 10^{11}$ H	L	10^{-9} H	L	30 H
Strumień magnetyczny	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2}$	$3 \cdot 10^{10}$ M	$\frac{3}{2} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	1 M	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2}$	$3 \cdot 10^{10}$ M
Indukcja pola magnetycznego	$L^{-\frac{3}{2}} \frac{1}{M^2}$	$3 \cdot 10^{10}$ G	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	1 G	$L^{-\frac{3}{2}} \frac{1}{M^2}$	$3 \cdot 10^{10}$ G
Natężenie pola magnetycznego	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2} T^{-2}$	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-10}$ Ő	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	1 Ő	$L^{-\frac{3}{2}} \frac{1}{M^2}$	$3 \cdot 10^{10}$ Ő
Przenikalność	$L^{-2} T^2$	$9 \cdot 10^{20}$ G/Ő	—	1 GŐ	—	1 G/Ő
Masa magnetyczna fikcyjna.	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2}$	$3 \cdot 10^{10}$ M	$\frac{3}{2} \frac{1}{M^2} T^{-1}$	1 M	$\frac{1}{2} \frac{1}{M^2}$	$3 \cdot 10^{10}$ M

Jako trzeci przykład rozpatrzmy wymiar potencjału elektrostatycznego.

Już dawno został wypowiedziany pogląd, że jednostki elektryczne winny być oparte nie tylko na podstawowych jednostkach wielkości mechanicznych długości, masy i czasu, ale również winna pomiędzy nimi figurować jakaś podstawowa wielkość elektryczna, np. ładunek, tak samo, jak w termodynamice figuruje ilość ciepła. Rzeczywiście ładunek elektryczny jest jak gdyby predestynowany do figurowania jako wielkość podstawowa, ze względu na to, że wielkość ładunku jest wprost miarą ilości elektronów i na odwrót, a elektron stanowi elementarną i bodaj najlepiej znaną cegiełkę, z której jest zbudowany nasz świat. Dlatego też układ jednostek i wymiarów, oparty na czterech jednostkach podstawowych L, M, Q i T , jest szczególnie interesujący.

Nawet w tym wypadku jednak wymiary wielkości elektrycznych nie są jednoznacznie określone. Potencjał elektrostatyczny określa się w sposób dwójaki. Po pierwsze, jako stosunek pracy do ładunku, zatem wymiarowo, po uwzględnieniu równania (2)

$$V = MQ^{-1},$$

po drugie, jako stosunek ładunku do długości, wymiarowo

$$V = QL^{-1}$$

Przyrównując do siebie prawe strony tych obu równości, otrzymamy zależność pomiędzy jednostkami długości, masy i ładunku

$$MQ^{-1} = QL^{-1}$$

Rugując stąd jednostkę masy przy pomocy równania (7), otrzymamy

$$Q = L^* \quad (8)$$

Po raz trzeci nie rozumiemy, co to znaczy. Tym razem jednakże fizyka nam nic prawie nie wyjaśni. Prawie, t. zn. oficjalnie nic, a półoficjalnie moglibyśmy się dowiedzieć, że istnieją teorie (Weyl, Eddington, Einstein i Mey-

*) To samo można otrzymać wprost z tablicy.

er), usiłujące sprowadzić zjawiska elektryczne do własności przestrzeni, ale te teorie są w chwili obecnej czysto spekulacyjne, bez oparcia o materiał doświadczalny. To też nie mają one w fizyce prawa obywatelstwa chociażby dlatego, że różnią się w swych założeniach, a brak jest podstaw do rozstrzygnięcia pomiędzy nimi. W każdym razie równanie (8) stanowi pewnego rodzaju przewidywanie związku pomiędzy wielkościami elektrycznymi a geometrycznymi, tem samem jest usprawiedliwieniem powstawania wspomnianych teorii. Gdyby te teorie nie istniały, to równanie (8) byłoby wyrazem żądania geometryzacji elektrotechniki, żądaniem geometrycznej interpretacji pól elektrycznego i magnetycznego.

Na zakończenie niech nam wolno będzie dla uniknięcia nieporozumień zaznaczyć z całym naciskiem, że równania (2), (7) i (8) w najmniejszej mierze nie stosują się do samych wielkości, ale wyłącznie do ich jednostek. Nie można z tych trzech równań wyciągnąć wniosku w tym rodzaju, że „w gruncie rzeczy zatem czas, masa, ładunek i długość, to jedno i to samo”. Byłoby to najfatalniejszą interpretacją tych równań. Sprawa wymiarów jest tylko sprawą arytmetyki obliczeń. Dopóki zostajemy w ograniczonej dziedzinie zjawisk (elektrostatyka, magnetostryka, mechanika, astronomia), dopóty możemy wielkości jednostek podstawowych obierać dowolnie; z chwilą gdy łączymy ze sobą niektóre dziedziny, tworząc działy obszerniejsze (nauka o elektryczności, teoria grawitacji), dowolność ta musi ulec ograniczeniu, w przeciwnym wypadku bowiem dochodzimy do różnych sprzeczności arytmetycznych. Jedyny i wyłączny sens równań (2), (7) i (8) jest ten, że z określonymi wartościami czasu, masy i ładunku są związane określone wartości długości, tak że odstęp czasu, masy ciała i ładunki elektryczne możemy jednoznacznie mierzyć jednostkami długości.

Dział Studiów
Państwowych Zakładów Tele-
i Radjotechnicznych.
Luty—marzec, 1934.

OSCYLOGRAF KATODOWY

Dr. Inż. Samuel Dunikowski.

Streszczenie: W poniższym referacie autor przedstawia w krótkim zarysie podstawy fizyczne i wykonania techniczne nowoczesnych oscylografów katodowych, dostosowanych do potrzeb współczesnej elektrotechniki pomiarowej.

Ze względu na szczupłość miejsca i wielki materiał, który należało podać, referat ten ma charakter raczej opisowy. Autor uważa, że tego rodzaju ujęcie całości zagadnień, dotyczących oscylografów katodowych, aczkolwiek niezupełnie kompletne, powinno być jednak celowe i to szczególnie ze względu na to, że w Polsce zagadnienia powyższe są naogół mało znane.

Omówienie różnych szczegółów oraz danych liczbowych, które mogłyby ewentualnie zainteresować czytelników, autor uważa za najwłaściwsze przenieść do dyskusji na Zjeździe Stowarzyszenia Elektryków Polskich.

1. Rozwój historyczny oscylografów katodowych.

W roku 1859 Plücker¹⁾ zaobserwował poraz pierwszy promienie katodowe jako niebieskawą fluorescencję na

ściankach rurki Geislerowskiej, sporządzonej ze szkła, zawierającego sole ołowiu. Szereg dalszych badań nad powyższymi promieniami dał możliwość określenia ich natury fizycznej oraz własności odchylania się ich toru pod wpływem pól elektrycznych i magnetycznych.

Praktyczne zastosowanie promieni katodowych do badań oscylograficznych przeprowadził poraz pierwszy Hess²⁾ w roku 1894. Przepuszczał on promienie katodowe przez okienko Lenard'a do komory próżniowej, w której ulegały one odchyleniu pod wpływem pola magnetycznego, a następnie padały na płytę fotograficzną, przesuwającą się z określoną szybkością.

W roku 1897 Braun³⁾ skonstruował poraz pierwszy t. zw. rurę braunowską, w której promienie katodowe, otrzymywane z zimnej katody, ulegały dwum prostopadłym przesunięciom i padały na ekran świetlający. Jedno z przesunięć związane było z badaniami przebiegami perjodyczne-

²⁾ Hess A.: Sur une application des rayons cathodiques à l'étude des champs magnétiques variables, C. R. Acad. Sci. Vol. 119, p. 57. Paris 1894.

³⁾ Braun F.: Ueber ein Verfahren zur Demonstration und zum Studium des zeitlichen Verlaufes variabler Ströme, Wied. Ann. Bd. 60 (1897). S. 552.

¹⁾ Plücker J.: Pogg. Ann. d. Phys. Bd. 107 (1859). S. 77, 111.

mi, podczas gdy drugie powodowane było niezależnym od badanego układem o określonej częstotliwości drgań. Na tej zasadzie Braun otrzymywał na ekranie figury Lissajou'a, które po odpowiednim zanalizowaniu dozwalały na określenie przebiegów czasowych badanych wielkości. Był to zatem pierwszy oscylograf katodowy z elektrycznym przesunięciem czasowym.

Dalsze lata przynoszą ustawiczne doskonalenie rury braunowskiej jako oscylografu katodowego. W roku 1905 Wehnelt⁴⁾ zastosowuje katodę żarzoną, zmniejszając szybkość elektronów w promieniu katodowym i zwiększając jego podatność do odchylen. W roku 1911⁵⁾ Ryan koncentruje promień katodowy przy pomocy równoległej do niego skierowanego pola magnetycznego. W latach 1925—27 Norinder⁶⁾, Rogowski⁷⁾, Berger⁸⁾ i ich współpracownicy opracowują rozmaite systemy wyzwalania i odcinania promienia katodowego, w celu uniknięcia prześwietlania oscylogramów w czasie przed i po rejestracji badanego przebiegu.

Lata ostatnie przynoszą znaczne ulepszenia techniczne w konstrukcji oscylografów. Ostatnie wykonania tych aparatów przez jedną z firm szwajcarskich podług planów Berger'a (rys. 15) stwarzają z oscylografu katodowego aparat pomiarowy już o charakterze technicznym, pewny w działaniu, łatwy do obsługi i transportu. Oscylograf katodowy przestaje być przyrządem czysto laboratoryjnym.

2. Podstawy fizyczne oscylografu katodowego.

Promień katodowy, czyli strumień elektronów poruszających się w określonym kierunku z wielką szybkością, otrzymuje się w technice oscylografów katodowych zasadniczo dwoma sposobami: w oscylografach o zimnej katodzie na zasadzie bombardowania katody jonami i wyzwalaniu z niej swobodnych elektronów, w oscylografach zaś o katodzie żarzonej na zasadzie emitowania elektronów przez rozżarzoną substancję katody.

Elektrony wyzwolone z katody, znajdując się w polu elektrycznym, istniejącym pomiędzy katodą a anodą, nabierają szybkości w kierunku anody i, przelatując przez odpowiednio w niej wyrobione otwory, tworzą właściwy promień katodowy. Warunkiem powstania promienia katodowego, odpowiedniego do celów oscylograficznych, jest istnienie dostatecznej próżni w obszarze, w którym promień przebiega. W przeciwnym razie elektrony uderzałyby o cząsteczki gazu, napotymane na swej drodze, i rozprasałyby się nader szybko. W oscylografach z zimną katodą nie można jednak próżni posunąć zbyt daleko w komorze katodowej, gdyż wówczas zanika zjawisko istniejących tam wyładowań jonowych, warunkujące powstanie dostatecznych ilości jonów, potrzebnych do bombardowania katody. Oczywiście w przypadku katody żarzonej można stosować dowolnie wysoką próżnię w komorze katodowej.

Promień katodowy w obszarze wolnym od pól elektrycznych i magnetycznych ma w znacznym przybliżeniu przebieg prostoliniowy. Elektrony poruszają się w nim na

zasadzie bezwładności z szybkością mniej więcej stałą, jakiej nabyły, przechodząc przez pole elektryczne katoda - anoda. Oczywiście istnieją w promieniu wzajemne siły oddziaływania pomiędzy elektronami, jak również zjawiska spowodowane zderzaniem się niektórych elektronów z cząsteczkami gazu, które komplikują przebieg promienia.

Jeśli w kierunku prostopadłym do osi promienia katodowego wytworzyć pole elektryczne lub magnetyczne, to wówczas promień ulegnie odchyleniu. W przypadku pola elektrycznego będzie się on odchylił w stronę jego elektrody dodatniej, w przypadku zaś pola magnetycznego, będzie się skręcał dokoła osi równoległej do linii pola. Własność ta wynika bezpośrednio z oddziaływania pola elektrycznego, względnie magnetycznego, na poruszające się elektrony, obciążone ładunkami ujemnymi. Odchylenie promienia będzie tem silniejsze, im silniejsze jest natężenie pola odchylającego i im mniejsza będzie szybkość elektronów promienia katodowego.

Powyższa możność oddziaływania na przebieg promienia katodowego ma podstawowe znaczenie dla techniki oscylografów katodowych. Możliwość odchylenia promienia katodowego w kierunkach prostopadłych do jego toru, dozwala na użycie go jako czułego, praktycznie pozbawionego bezwładności, wskaźnika badanych szybkozmiennych przebiegów elektrycznych.

Ze względów praktycznych jest rzeczą nader ważną otrzymanie w niektórych punktach możliwie skoncentrowanego promienia katodowego, czyli wiązki z dużej ilości elektronów, posiadającej przy dużej ich liczbie jaknajmniejszy przekrój poprzeczny.

Koncentrację rozpraszającego się promienia można osiągnąć działaniem pola elektrycznego koncentrycznego, prostopadłego do osi promienia i posiadającego wewnętrzny biegun dodatni. Ten sam rezultat da się osiągnąć przy pomocy pola magnetycznego. W tym ostatnim przypadku rozróżnić wypada dwa możliwe układy: klasyczny, polegający na wytworzeniu pola magnetycznego kołowego w płaszczyźnie prostopadłej do promienia i drugi, obecnie najczęściej stosowany, polegający na zasadzie solenoidu umieszczonego współosiowo z promieniem. Ten ostatni sposób polega na tem, że elektrony, posiadające niewielkie składowe szybkości prostopadłe do zasadniczego kierunku promienia, opisują w jednostajnym polu magnetycznym do niego równoległym spirale cylindryczne i w przypadku, gdy wyszły one ze wspólnego punktu (np. praktycznie katody), to wówczas, po przebiegnięciu pewnego odcinka, schodzą się ponownie razem. W przypadku krótkich solenoidów zjawisko to jest w rzeczywistości dużo bardziej skomplikowane. Badania teoretyczne Busch'a⁹⁾ i doświadczenia kontrolne Ruska i Knoll'a¹⁰⁾ stwierdziły, że działanie krótkiego solenoidu, o osi równoległej do osi promienia, jest analogiczne do działania soczewki w stosunku do promienia świetlnego. Zdolność koncentracyjna takiego solenoidu jest zależna od jego wymiarów i amperozwojów.

Ważnem wreszcie zjawiskiem jest samokoncentracja promienia katodowego, czyli t. zw. zjawisko Bijl'a¹¹⁾. Zjawisko to występuje wówczas, gdy promień katodowy przebiega przez obszar odpowiednio rozrzedzonego gazu. Elektrony promienia, uderzając w napotymane cząsteczki gazu, rozbijają je na jony dodatnie i elektrony. Jony dodatnie,

⁴⁾ Wehnelt A.: Empfindlichkeitssteigerung der Braunschen Röhre durch Benutzung von Kathodenstrahlen geringer Geschwindigkeit. Physik. Z. Bd. 6 (1905). S. 609.

⁵⁾ Ryan: A power diagrams inductor for high-tension circuits. Proc. AIEE, v. 30. 1911. p. 511.

⁶⁾ Norinder: Katodstrålrörets Användning som Hörfrekvensoscillograf Särskilt för Undersökning av Vandringsvägar. Teknisk Tidskrift 55, II, 1925, S. 152.

⁷⁾ Rogowski u. Flegler: Ein Kathodenstrahl-Oscillograph für Aufnahmen in Vakuum. A. f. E. Bd. 15. 1925. S. 297.

⁸⁾ Berger: Ueber die Weiterentwicklung des Kathodenstrahl-Oscillographes von Dufour. Bull. SEV. Bd. 19. 1928. S. 292.

⁹⁾ Busch H.: Ueber die Wirkungsweise der Konzentrierungsspule bei der Braunschen Röhre. A. f. E. Bd. 18. (1927). S. 583.

¹⁰⁾ Ruska E. u. Knoll M.: Die magnetische Sammelspule für schnelle Elektronenstrahlen. Z. techn. Phys. Bd. 12. 1931. S. 389, 448.

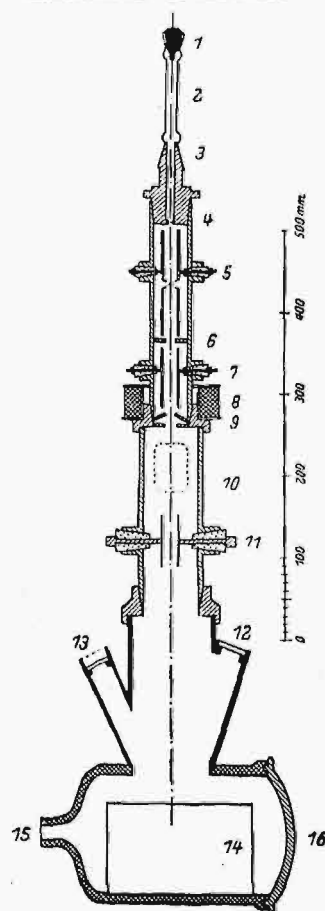
¹¹⁾ van der Bijl J.: Vacuum tube and method of operating the same. Amer. P. 1565873.

jako znacznie cięższe, oddalają się pod wpływem działających na nie pól elektrycznych dużo wolniej od punktu, w którym nastąpiło zderzenie, aniżeli lekkie elektrony. Z tego powodu jony dodatnie grupują się w obszarze wiązki promienia, elektrony zaś powstałe z rozbitcia, są wyrzucane przez odpychanie od elektronów promienia katodowego nazewnątr. W ten sposób ładunki przestrzenne jonów dodatnich i wtórnych elektronów wytwarzają pole elektryczne koncentryczne, powodujące samokoncentrację promienia. Zjawisko samokoncentracji zachodzi tylko przy odpowiednim rozrzedzeniu gazu. Jeśli gaz jest za mało rozrzedzony, następuje za dużo zderzeń pomiędzy elektronami promienia a cząsteczkami gazu i promień się rozprasa, tracąc na tych zderzeniach większość swych elektronów. Odwrotnie, gdy próżnia jest za wysoka, to wówczas zderzenia są za rzadkie i tem samem działania samokoncentracyjne są za słabe.

Umiejąc wytwarzać, odchyłać i koncentrować promień katodowy, rozwiązać należy jeszcze ważne zagadnienie wykrywania końcowego punktu tego promienia, padającego na jakiś układ odczytowy. Wyzyskuje się tu niektóre właściwości fizyczne promieni katodowych. Do najważniejszych należy wzniesienie światła pewnych substancji, przy poddaniu ich działaniu promienia, oraz wrażliwość płyty fotograficznej na elektrony uderzające w jej emulsję światłoczułą. Własność pierwsza stanowi podstawę wszelkich obserwacji wzrokowych przebiegów, rejestrowanych przez oscylografi katodowe, własność zaś druga jest podstawą rejestracji fotograficznej oscylogramów.

3. Budowa techniczna oscylografu katodowego.

W działaniu oscylografu katodowego rozróżnić należy następujące podstawowe fazy: wytwarzanie, koncentrowanie, odcinanie i odchyłanie promienia katodowego, oraz rejestrowanie położenia punktu zetknięcia się promienia katodowego z układem odczytowym. Odpowiednio do tego



Rys. 1.

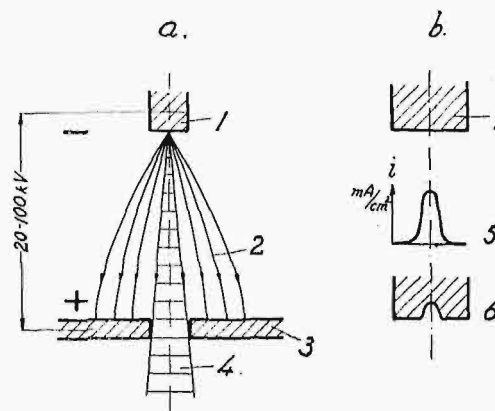
Schemat nowoczesnego oscylografu katodowego (pg Klamperer'a).

- | | | |
|-------------------------------------------------------|---|----------------------|
| 1. Katoda | } | komora katodowa |
| 2. Obszar wyładowań | | |
| 3, 4. Anoda | } | komora odcinająca |
| 5, 7. Elektrody odcinające | | |
| 6, 9. Przesłony odcinające | } | układ koncentracyjny |
| 8. Cewka koncentrująca | | |
| 10, 11. Elektrody odchyłowe | } | komora odchyłowa |
| 12. Okienko obserwacyjne | | |
| 13. Okienko do rejestracji fotograficznej zewnętrznej | } | komora dotyłowa |
| 14. Układ rejestracji fotograficznej wewnętrznej | | |
| 15. Połączenie z pompą | } | |
| 16. Pokrywa zdejmowalna do wymiany filmów | | |

oscylograf katodowy dzieli się pod względem konstrukcyjnym na komorę katodową, urządzenie koncentracyjne, komorę odcinającą, komorę odchyłową i komorę odczytową (Rys. 1). Pod względem elektrycznym w skład oscylografu wchodzi jeszcze układ odchyłowy czasowy, który tu zostanie rozpatrzony oddzielnie.

Jak już zaznaczono powyżej, we współczesnych oscylografach katodowych otrzymuje się promień katodowy bądź z katody zimnej, bądź też żarzonej.

Oscylografi o katodzie zimnej (np. oscylograf Rogowskiego lub Berger'a) wymagają wysokich napięć anoda-katoda, wahających się w granicach 20—100 kV. Jako ma-



Rys. 2.

Zimna komora katodowa.

1 — Katoda. 2 — Całkowity strumień elektronów wyzwolonych z katody. 3 — Anoda. 4 — Użyteczny strumień elektronów wyzwolonych z katody, tworzący promień katodowy. 5 — Rozkład prądu, wydzielonego przez katodę w postaci elektronów. 6 — Zużyta katoda z kraterem.

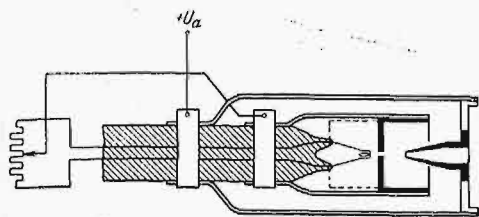
terjału katody używa się najczęściej aluminium. Jony dodatnie uderzające o katodę (rys. 2) tworzą, ze względu na właściwości fizyczne wyładowania świetlającego, strumień o bardzo małej średnicy i dlatego wyzwalamie elektronów z katody odbywa się na bardzo małej powierzchni o średnicy rzędu dziesiątych części milimetra. Skupione bombardowanie katody ma dużą zaletę w bardzo skoncentrowanej emisji elektronów, co powoduje łatwość dalszej koncentracji promienia (koncentracja promienia katodowego patrz dalej). Z drugiej jednak strony katoda szybko zużywa się w miejscu wyzwalamia elektronów i wytwarza się w niej stopniowo coraz większy krater. Powstanie krateru na katodzie odbija się ujemnie na końcowej koncentracji promienia katodowego w punkcie zetknięcia się jego z układem odczytowym. Oscylogramy przestają być ostre i wymiana katody staje się konieczna. Nowoczesne katody aluminiowe mogą pracować bez zmiany zaledwie parę godzin.

W celu uzyskania wyzwolenia dostatecznej liczby elektronów z katody bombardowanej jonami, należy utrzymać w komorze katodowej ciśnienie mniejszej rzędu 0,01 mm Hg. W przypadku próżni wyższej, ilość jonów, otrzymywana z wyładowań pomiędzy anodą i katodą, jest niedostateczna, co powoduje zamało intensywne bombardowanie katody.

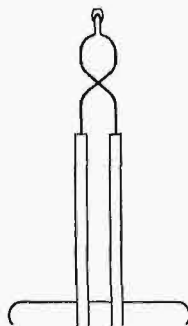
Wskutek konieczności stosowania wysokich napięć katodowych, elektrony wyzwalamie w zimnych komorach katodowych osiągają znaczne szybkości, przez co otrzymany promień katodowy jest twardy, t. j. mało podatny odchyłającemu działaniu pól elektrycznych, względnie magnetycznych.

Komory katodowe żarzone (np. oscylografi Wehnelt'a, lub Johnson'a) posiadają z reguły próżnię rzędu wyższego

od komór zimnych (rys. 3). Zjawiska wyładowań jonowych nie grają tu roli. Napięcia katodowe są znacznie niższego rzędu niż poprzednio i wynoszą około kilkuset woltów. Wskutek niskich napięć katodowych, elektrony w polu katoda - anoda nabierają niewielkich szybkości, a więc otrzymywane promienie są miękkie. Ilość elektronów emi-



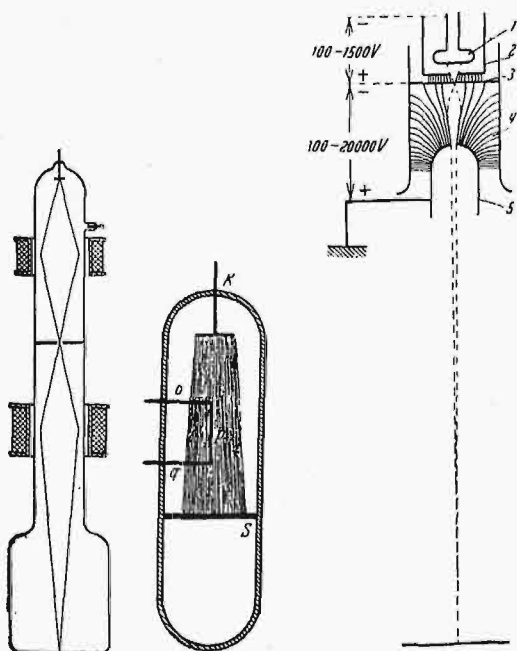
Rys. 3a.
Komora katodowa żarzona.
a — Typowy układ elektrod komory katodowej żarzonej (pł. Sommerfeld'a), b — Nowoczesna katoda żarzona, punktowa.



Rys. 3b.

nowanych przez katody żarzone jest znacznie większa, niż w przypadku katod zimnych. Własność ta sprawia, że promień katodowy zawiera bardzo dużo elektronów i energia, jaką przenosi oraz wywołuje na układzie odczytowym, jest znaczna pomimo małych szybkości elektronów i może dorównywać energii przeniesionej przez promienie, wydzielane przez katody zimne.

W komorach żarzonych występują trudności z koncentracją promienia katodowego. Wynikają one z jednej strony ze względu na mniejsze szybkości elektronów promienia i na mniej skoncentrowane wytwarzanie go na katodzie, z drugiej zaś ze względu na słabsze, albo pomijalne działanie samokoncentracji, spowodowane wysoką próżnią istniejącą w komorze.



Rys. 4a.

Rys. 4b.

Rys. 4c.

Rys. 4d

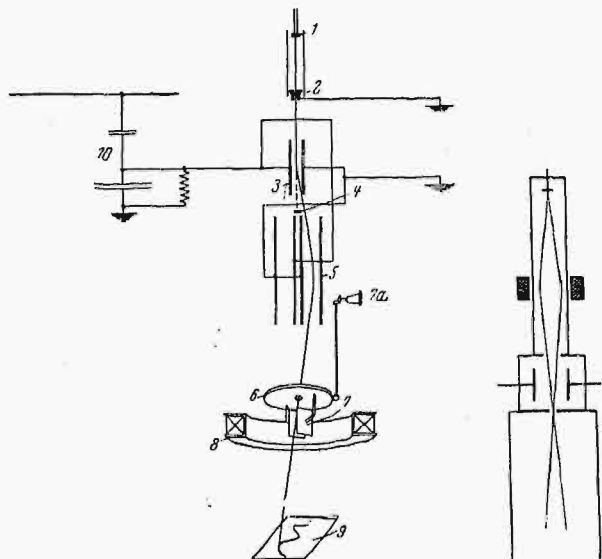
Koncentracja promienia katodowego.

a — Koncentracja magnetyczna przy pomocy pola magnetycznego o osi równoległej do promienia katodowego. b — Koncentracja magnetyczna przy pomocy kołowego pola magnetycznego. c — Koncentracja elektryczna przy pomocy odpowiednio ukształtowanej przesłony. d — Koncentracja elektryczna przy pomocy elektrod koncentrycznych.

Dla wprowadzenia działania samokoncentracyjnego stosuje się niekiedy komory żarzone gazowe (np. w oscylografach Westphal'a oraz Bijl'a), gdzie rozmyślnie obniża się próżnię. Istnienie gazu w komorze katodowej wpływa jednak ujemnie na trwałość katody żarzonej, która pod wpływem bombardowania jej jonami zużywa się nader szybko. Należy w takich konstrukcjach przewidzieć specjalne osłony żarzeniowego drucika katody, chroniące go przed uderzeniami jonów. W komorach gazowych napięcia katodowe są normalnie rzędu paru tysięcy woltów.

Przy otrzymywaniu w komorze katodowej strumienia elektronów, tylko mała jego część zostaje wyzyskana dla utworzenia promienia katodowego. Znaczna część elektronów zubożnia się, napotykając po drodze jony dodatnie, część wreszcie dobiega do anody.

W celu powiększenia intensywności promienia katodowego, stosuje się sztuczne środki, mające na celu skierowanie jaknajwiększej ilości elektronów w kierunku otworu w anodzie. To oddziaływanie na tor elektronów w komorze katodowej, czyli t. zw. koncentracja wstępna, może się odbywać na drodze elektrostatycznej, przez dobranie odpowiednich kształtów katody, anody, oraz, ewentualnie, elektrod pomocniczych, albo też na drodze magnetycznej,



Rys. 5.

Układy odcinające.

a — Układ mechaniczny (Norinder'a), b — Układ elektryczny (Boekels'a).

przez zastosowanie odpowiednich koncentrujących pól magnetycznych (rys. 4). Przy koncentracji wstępnej odgrywa w przypadku zimnych katod i żarzonych katod gazowanych pierwszorzędną rolę zjawisko samokoncentracji, opisane poprzednio.

Po przejściu anody, promień katodowy dostaje się do innych części oscylografu, w których próżnia jest z reguły wysoka (rzędu 10^{-5} mm Hg). Elektrony promienia poruszają się tam swobodnie, napotykając bardzo mało cząstek gazu. Mają one, ze względu na istniejące pomiędzy nimi siły odpychające, ciągłą tendencję do rozpraszania się.

Ponieważ przy przejściu niektórych organów odcinających oscylografu, jak również w punkcie zetknięcia się promienia z układem odczytowym, należy uzyskać promień silnie skoncentrowany, przeto wzdłuż osi promienia umieszcza się układy, koncentrujące go sztucznie. W znacznej większości przypadków stosuje się tu w praktyce podłużne

poła magnetyczne, wytwarzane przez solenoidy o osiach równoległych do osi promienia katodowego.

Nader ważna jest koncentracja końcowa promienia, czyli t. zw. *koncentracja głowna*, od której zależy bezpośrednio ostrość otrzymywanych oscylogramów.

W większości przypadków czas trwania rejestrowanych przez oscylograf przebiegów jest bardzo krótki, rzędu mikro- względnie mili-sekund. Jeśli w celu dokonania zdjęcia oscylograficznego tak krótkotrwałych przebiegów, przygotowuje się do pomiaru oscylograf i rzuci promień katodowy na układ obserwacyjny, to przez okres czasu poprzedzający i następujący po samym zdjęciu, promień katodowy będzie naświetlał film fotograficzny stosunkowo bardzo długo, zaczerniając go niemal zupełnie. Aby temu zapobiec, stosuje się specjalne urządzenie, wyzwalaające promień katodowy dopiero w ostatniej chwili przed rozpoczęciem rejestracji badanego przebiegu i odcinające go zaraz po jej ukończeniu. Ponieważ operuje się tu normalnie odstępami czasu wyrażalnymi w mikrosekundach, przeto urządzenia te winny działać niemal bez żadnej bezwładności.

Układy odcinające promień katodowy od komory odczytowej (rys. 5), opierają się na jednej z dwu zasad: albo umieszcza się na drodze promienia przeszkodę mechaniczną, zatrzymującą poruszające się elektrony, albo też odchyła się promień katodowy w ten sposób, że trafia on na ścianki komory odcinającej i nie dochodzi do układu odczytowego.

Układy czysto mechaniczne polegają na wsuwaniu pewnej przesłony mechanicznej, zagrządzającej drogę promienia. Mają one w praktyce jedynie pomocnicze znaczenie, gdyż, ze względu na bezwładność całego urządzenia mechanicznego, nie mogą reagować dostatecznie szybko.

Układy odcinające elektryczne, polegające na zasadzie odchyłania promienia w komorze odcinającej, konstruowane są w dwóch odmianach: a) w stanie normalnym promień katodowy jest zatrzymany jakąś przesłoną mechaniczną i dopiero w chwili wyzwolenia go zostaje odpowiednio odchyłony w komorze odcinającej, celem ominięcia tej przesłony i dotarcia do układu odczytowego; b) w stanie normalnym promień jest odchyłony i zatrzymany na przesłonie, w trakcie zaś oscylografowania odchylenie ustaje i promień przez odpowiedni otwór w przesłonie przechodzi do dalszych części oscylografu. Układy typowe

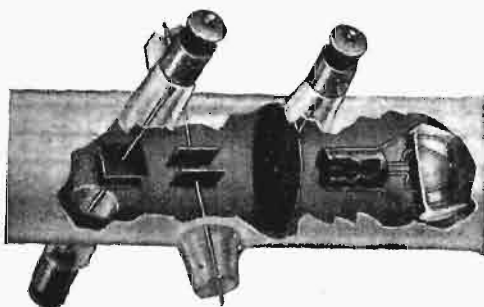
pierwszego typu zostały zaprojektowane przez Norinder'a¹²⁾, zaś do układów typu drugiego zaliczyć wypada najczęściej spotykane systemy Rogowskiego¹³⁾, Boekels'a¹⁴⁾ i Berger'a¹⁵⁾.

Dla układu odcinającego ważną cechą charakterystyczną jest sposób, w jaki pojawia się na układzie odczytowym wyzwolony promień katodowy. W układach starszego typu promień ten w miarę działania układu wyzwalał się z brzegu odscylogramu aż do pewnego punktu normalnego, odpowiadającego całkowitemu wyzwoleniu. W układach nowszych wyzwolenie odbywa się w ten sposób, że promień odrazu zjawia się na oscylogramie w tym punkcie, w którym przy pełnym wychyleniu ma pozostać. Ten drugi system urządzeń wyzwalających jest praktycznie lepszy, gdyż przez czynność wyzwalań nie wprowadza się na oscylogramie żadnej dodatkowej linii i tem samym oscylogram staje się przejrzystszy. Pod tym względem układy Norinder'a i Berger'a wykazują przewagę nad układami Rogowskiego i Boekels'a.

Wychodząc z komory odcinającej (o ile taka komora w danym oscylografie istnieje), promień katodowy przechodzi do komory odchyłowej, gdzie tor jego pod wpływem pól elektrycznych, względnie magnetycznych, doznaje odpowiednich odchylen.

Normalnie *układ odchyłowy* oscylografu (rys. 6) dzieli się na dwie części: na układ związany z badanymi przebiegami, t. zw. *układ pomiarowy*, i na układ związany z pewnymi drganiem, których przebiegi elektryczne są dokładnie znane w czasie, czyli t. zw. *układ czasowy*. Układy te w najczęstszych wykonaniach technicznych oscylografów katodowych dają wychylenia promienia w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych.

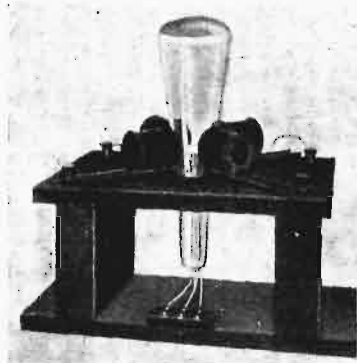
W praktyce stosuje się niemal wyłącznie albo układy odchyłowe elektryczne w postaci elektrod, umieszczonych w próżni w komorze odchyłowej, wytwarzających pod wpływem przyłożonego do nich z zewnątrz napięcia pole elektryczne, prostopadłe do toru promienia, albo też układy magnetyczne, przy których cewki umieszczone są na zewnętrznych ściankach komory odchyłowej i które, zasilane prądem badanym, dają pole magnetyczne również do tego promienia prostopadłe. Układy elektryczne nadają się szczególnie do badań przebiegów napięć, podczas gdy układy magnetyczne do badania prądów. Układy elektryczne pobierają z zasady moc znacznie mniejszą od układów mag-



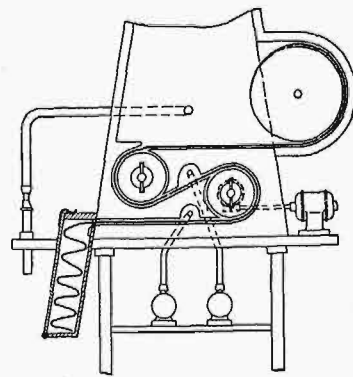
Rys. 6a.

Układy odchyłowe.

a — Układ odchyłowy elektryczny. b — Układ odchyłowy magnetyczny.



Rys. 6b.



Rys. 7.

Komora odchyłowa dla rejestracji fotograficznej wewnętrznej [pł. Matthias'a].

¹²⁾ Patrz odnośnik 6 str. 279.¹³⁾ Patrz odnośnik 7 str. 279.¹⁴⁾ Boekels H.: Strahlsperrenungen beim Kathodenoszillographen. A. f. E. Bd. 25, 1931. S. 497.¹⁵⁾ Patrz odnośnik 8 str. 279.

netycznych. W praktyce układy te są znacznie częściej stosowane od układów magnetycznych.

Jeśli oscylograf ma być przeznaczony do badania napięć wysokich, to wówczas przewiduje się zazwyczaj pro-

mięń katodowy twardy i napięcia między elektrodami odchylowymi układu pomiarowego są znaczne (rzędu kilowoltów). Aby przy tych napięciach uniknąć przeskoków pomiędzy elektrodami, należy stosować (na co zresztą wpływają ze swej strony i względy na koncentrację oraz rozpraszanie się promienia) próżnię dość znaczną. W praktyce próżnia w komorze odchylowej jest zazwyczaj rzędu 10^{-5} mm Hg.

Komora odchylowa wpływa w znacznej mierze na czułość oscylografu katodowego, t. j. na stosunek przesunięcia pomiarowego, wykreślonego przez promień na układzie odczytowym, do przyrostu badanego napięcia czy też prądu, zasilającego układ odchylowy. Czułość zależy od twardości promienia, konstrukcji układu odchylowego (wymiary, położenie i odstęp elektrod w układach elektrycznych, względnie wymiary, położenie i amperozwoje cewek w układach magnetycznych) i wreszcie długości komory odchylowej. Im pola odchylowe, przy zasilaniu pewnem określonym napięciem lub prądem układu odchylowego, są silniejsze i im większa jest długość komory, tem czułość oscylografu jest większa.

Promień katodowy, przechodząc do komory odczytowej, wykonywa w trakcie oscylografowania drgnięcia, odpowiadające przebiegom oscylografiowanym. Zadaniem układu odczytowego jest zarejestrowanie tych drgnień w sposób umożliwiający ich obserwację wzrokową, względnie zdjęcie fotograficzne.

W celu obserwacji wzrokowej wyzyskuje się działanie promienia katodowego na substancje świetlące. Ponieważ przy oscylografowaniu (szczególnie przebiegów nieperjodycznych, uderzeniowych) przesunięcie się promienia po układzie odczytowym jest nadwyraz szybkie, przeto oko ludzkie jest w stanie uchwycić obraz tylko wówczas, gdy substancja świetlająca ekranu posiada własność świetlenia szczątkowego przez parę sekund po przeslizgnięciu się po niej strumienia elektronów. W przypadku tym obraz przebiegu jest łatwy do zaobserwowania w postaci pewnej świetlnej linii ciągłej, nakreślonej przez promień katodowy na ekranie.

Jako substancji świetlającej używa się obecnie najczęściej siarczku cynku z dodatkiem różnych soli. Daje on pod wpływem promieni katodowych silne światło zielonawe, utrzymujące się po odcieciu promienia przez parę sekund. Natężenie świetlenia ekranu zależy od energii, wydzielanej na nim przez promień katodowy na jednostkę długości nakreślonej linii oscylogramu. Efekt optyczny będzie tym silniejszy, im twardszy i bogatszy w elektrony będzie promień i im wolniej będzie kreślił oscylogram. W wykonaniu konstrukcyjnym komory odczytowej przewiduje się zazwyczaj odpowiednie okienko do obserwacji świetlenia ekranu. Próżnia w komorze odczytowej jest jednakowa z próżnią w komorze odchylowej.

Przy rejestracji fotograficznej oscylogramów rozróżnia się dwa podstawowe systemy: fotografowanie wewnętrzne i zewnętrzne.

Przy rejestracji zewnętrznej fotografuje się obraz oscylogramu powstały na ekranie świetlącym za pośrednictwem aparatu, umieszczonego nazewnątrz oscylografu. Ponieważ aparat znajduje się wówczas pod ciśnieniem normalnem i jest łatwo dostępny, przeto wszelkie operacje fotograficzne są bardzo ułatwione. Wadą tego systemu jest mała jego czułość. Obraz świetlający na ekranie musi być bardzo intensywny, co pociąga za sobą konieczność stosowania oscylografów o wielkiej energii, przenoszonej na układ odczytowy przez promień katodowy.

Przy rejestracji wewnętrznej elektrony padają bezpośrednio na emulsję filmu fotograficznego (rys. 7). Układ ten

jest fotograficznie dużo czulszy. Przy normalnym promieniu katodowym można osiągać w tym wypadku szybkość rejestracji (szybkość kreślenia linii oscylogramu przez promień katodowy), dochodzącą do dziesiątek tysięcy kilometrów na sekundę. Układ taki ma poważną jednak wadę ze względu na to, że, znajdując się w próżni komory odczytowej, jest trudno dostępny. W celu wymiany filmów musi się zatrzymać oscylograf i wpuścić do niego powietrze. Powoduje to przerwy w pracy oscylografu, dochodzące do kilkudziesięciu minut. W praktyce przy wykonywaniu większych seryj zdjęć wymiana filmu jest konieczna po zdjęciu kilku lub kilkunastu oscylogramów.

Pewną modyfikacją zewnętrznej rejestracji fotograficznej jest układ, w którym film umieszcza się nazewnątrz komory odczytowej, bezpośrednio za okienkiem Lenard'a, przez które przedostają się elektrony promienia katodowego i padają na emulsję filmu. System ten przedstawia zalety, związane z rejestracją zewnętrzną, jednak przy przejściu przez okienko Lenard'a elektrony tracą dużo energii i rozpraszają się, przez co zarówno szybkość rejestracji, jak i ostrość oscylogramów jest mniejsza niż przy rejestracji wewnętrznej.

Do rejestracji fotograficznej używa się zwyczajnych filmów fotograficznych o możliwie wielkiej czułości. Wywoływanie i utrwalanie tych filmów odbywa się w sposób normalny.

4. Układ czasowy oscylografu katodowego.

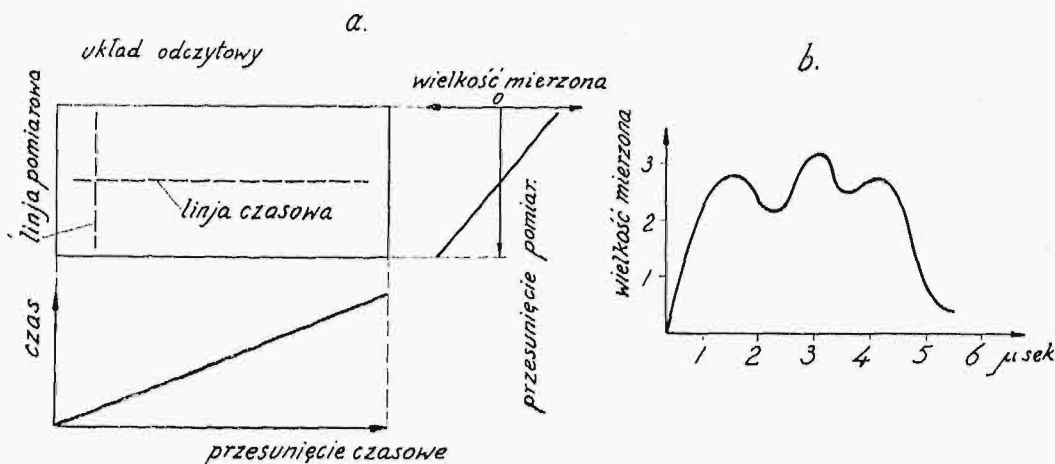
W normalnym oscylografie katodowym, jeśli załączony będzie do układu badanego jedynie odchylowy układ pomiarowy, wszystkie zaś układy czasowe oscylografu będą nieczynne, to promień katodowy będzie ulegał pewnemu przesunięciu w stosunku do układu odczytowego, t. zw. *przesunięciu pomiarowemu*, i nakreśli na układzie odczytowym pewną linię, którą w miarę drgań wielkości badanych będzie przebiegał tam i z powrotem. Linja ta, t. zw. linja pomiarowa danego układu oscylograficznego, pozwoli jedynie na określenie maksymalnej amplitudy wychyleń promienia, czyli wartości szczytowej badanej wielkości szybkozmiennej. Ze znajomości samej tylko linii pomiarowej nie można nic wnioskować o zmianach w czasie badanych wielkości.

W celu poznania przebiegu czasowego wielkości badanej należy spowodować dodatkowe przesunięcie promienia katodowego względem układu odczytowego, t. zw. *przesunięcie czasowe*. Przesunięcie to musi się odbywać w czasie w sposób ściśle określony i znany. Przy jednoczesnem działaniu przesunięcia pomiarowego i czasowego zostaje wykreślony oscylogram, po zanalizowaniu którego staje się możliwe poznanie przebiegów czasowych wielkości badanych.

W normalnym oscylografie katodowym promień musi ulegać zatem dwóm przesunięciom względem układu odczytowego: pomiarowemu i czasowemu. Jeśli istnieje tylko przesunięcie pomiarowe, to wówczas na oscylogramie otrzymuje się tylko *linję pomiarową*, jeśli naodwrot istnieje tylko przesunięcie czasowe, wówczas promień kreśli jedynie *linję czasową*. W razie gdy wielkość badana posiada wartość stałą i równą zeru, wówczas nakreślona w tych warunkach linja czasowa jest t. zw. *linją zerową*.

W najczęstszych wykonaniach oscylografów katodowych linje pomiarowe i czasowe są linjami prostymi do siebie prostokątami. Dzięki temu otrzymuje się oscylogram w postaci wykresów prostokątnych badanej wielkości w funkcji czasu. Kwestja skali tych wykresów zależy od charakteru przesunięć promienia katodowego względem

układu odczytowego. W nowoczesnych oscylografach dąży się do otrzymania przesunięcia pomiarowego niemal ściśle proporcjonalnego do badanej wielkości i do możliwie stałej szybkości przesunięcia czasowego. Oscylogram otrzymany w takich prostokątnych układach oscylograficznych jest nadwyraz przejrzystym wykresem prostokątnym badanej wielkości w czasie, przyczem zachowane są skale proporcjonalne zarówno czasu jak wielkości badanej (rys. 8).



Rys. 8.

Układ oscylograficzny prostokątny o skalach proporcjonalnych. a — analiza przesunięcia zerowego i pomiarowego, b — otrzymany oscylogram.

Nadmienić należy, że dla wyrazistości oscylogramu w układzie powyżej opisanym konieczne jest dobranie takiej szybkości przesunięcia czasowego, aby była ona tego samego rzędu, co i szybkość przesunięcia pomiarowego. Ponieważ szybkości przesunięcia pomiarowego są tego rodzaju, że promień katodowy doznaje pełnego wychylenia niejednokrotnie w ciągu mikrosekundy, przeto przesunięcie czasowe musi się odbywać również bardzo szybko, w przeciągu czasu tego samego rzędu.

Jeśli rejestracja badanego przebiegu ma się odbywać długo i bez przerwy, a szybkość przesunięcia czasowego ma być wielka, to zachodzi konieczność wydłużenia linii zerowej. Stosuje się wtedy niejednokrotnie *linje zerowe sinusoidalne* (rys. 9) o osi równoległej do linii pomiarowych. Niekiedy wreszcie stosuje się układ współrzędnych biegunowych oscylogramu, przy którym linia zero jest kołem, linie zaś pomiarowe są do niej ustawione promieniowo.

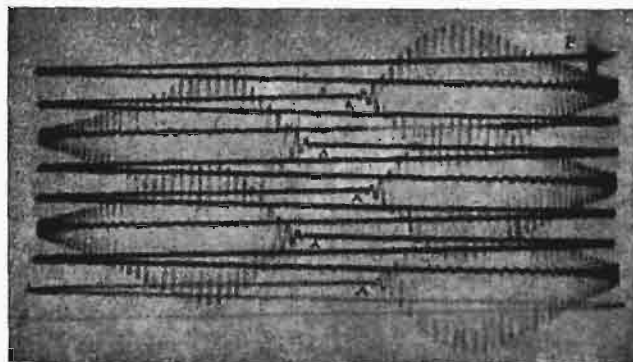
W rozwiązaniu technicznym sprawy przesunięcia czasowego są możliwe dwie alternatywy. Albo układ czasowy nie będzie działał na promień katodowy i jedynie układ odczytowy będzie przesuwany w stosunku do niego mechanicznie, albo też układ odczytowy pozostanie nieruchomy, promień zaś katodowy otrzyma dodatkowe odchylenie czasowe. Pierwszy system prowadzi do konstrukcji *układów czasowych mechanicznych*, drugi do *układów elektrycznych*. W praktyce kombinuje się czasami te układy, tworząc układy czasowe mieszane, mechaniczno-elektryczne.

Wszystkie dotychczas znane układy mechaniczne czasowe odznaczają się stosunkowo małą szybkością otrzymywanego przesunięcia. Nadają się więc one jedynie do oscylografowania zjawisk wolnozmiennych o częstotliwościach, nie przekraczających paru tysięcy okresów na sekundę. Przy przejściu do zjawisk udarowych i szybkozmiennych ma się do czynienia z czasem trwania zjawiska, wyrażanym w mikrosekundach. W tym ostatnim przypadku konieczne jest stosowanie układów elektrycznych.

Z pośród licznych czasowych układów mechanicznych ma znaczenie w nowoczesnych oscylografach niemal jedynie system, polegający na przewijaniu z określoną szybkością wstęgi filmu fotograficznego w układzie odczytowym. Układ taki stosuje się zazwyczaj jako pomocniczy w połączeniu z podstawowym układem czasowym elektrycznym. Nadaje się on szczególnie podczas rejestracji długotrwałej, gdy stosuje się sinusoidalną linię zerową.

Wykonanie czasowych układów elektrycznych polega na wbudowaniu w komorze odchyłowej dodatkowego układu odchyłowego czasowego i na zasilaniu go w sposób ściśle wiadomy pewnymi znanymi przebiegami szybkozmiennymi.

Najczęściej, dla otrzymania linii zerowej i pomiarowej wzajemnie prostopadłych, stosuje się w komorze odchyłowej system czasowy, przesunięty geometrycznie (pod względem oddziaływania na promień katodowy) o kąt prosty w stosunku do pomiarowego układu odchyłowego. Jak już podano poprzednio, jest pożądane, aby przesunięcie promienia katodowego, spowodowane przez układ czasowy, odbywało się ze stałą szybkością. W tym celu pole elektryczne lub

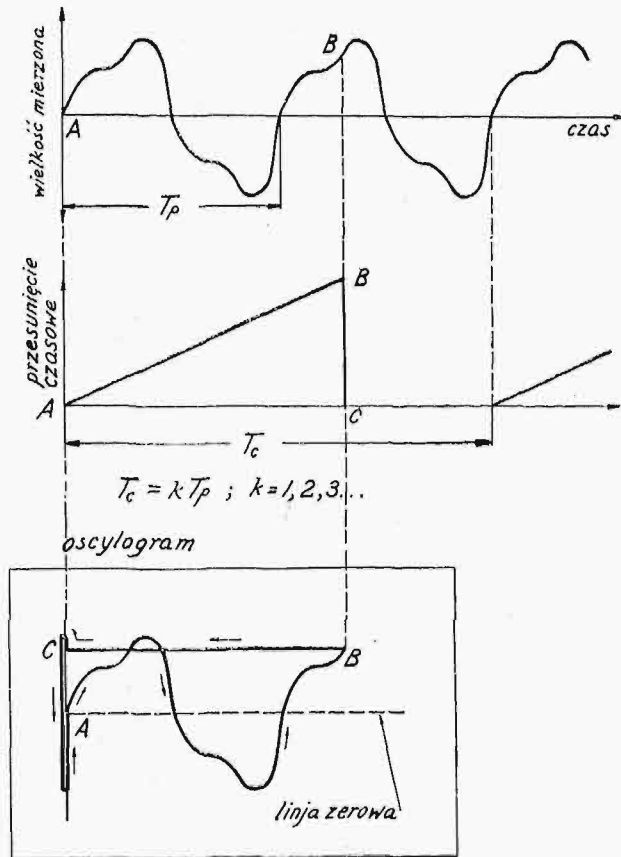


Rys. 9.

Przykład oscylogramu przy zastosowaniu linii zerowej sinusoidalnej.

magnetyczne, powodujące odchylenie czasowe, powinno wzrastać lub maleć z szybkością jednostajną. Dla uzyskania tego stosuje się specjalne układy elektryczne, zasilające układ odchyłowy czasowy. Z układów tych otrzymuje się napięcie, względnie prąd, zmieniający się w przeciągu pewnego czasu z szybkością jednostajną.

Jeśli chodzi o ustalenie wymagań stawianych układowi, zasilającemu elektryczny układ czasowy oscylografu, to należy rozróżnić dwa podstawowe przypadki. Pierwszy, gdy chodzi o zoscylografowanie przebiegów periodycznych i drugi, gdy należy zoscylografować przebiegi pojedyncze, udarowe.



Rys. 10.

Oscylografowanie przebiegów okresowych przy przeprowadzeniu synchronizacji układu czasowego (na układzie odczytowym obraz stojący).

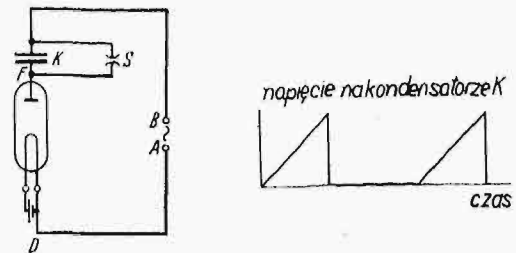
W wypadku badanych przebiegów *periodycznych*, pożądaną jest, aby zsynchronizować przesunięcia czasowe i pomiarowe promienia katodowego. Dzięki temu można uzyskać na oscylogramie stojącą linię zamkniętą, obieganą w koło przez koniec promienia. Dla otrzymania jasnego wykresu oscylograficznego, o stałej skali czasu, najidealniejszym byłoby takie przesunięcie czasowe, przy którym promień katodowy przesuwający się pod wpływem układu czasowego z jednostajną prędkością od jednego krańca oscylogramu do drugiego i następnie z nieskończonej wielką prędkością wracałby do krańca pierwszego, aby nanowo rozpocząć ten sam przebieg. Wówczas oscylogram składałby się z wykresu prostokątnego badanej wielkości o stałej skali czasu, narysowanego w trakcie przesuwania się promienia od krańca pierwszego do drugiego i z pewnej linii czasowej (niekoniecznie zerowej), kreślonej przy jego nieskończeniu szybkim powrocie do pozycji wyjściowej. Dla przebiegania promienia katodowego stale wzdłuż tej samej linii po oscylogramie musiałaby częstotliwość przebiegu czasowego być wielokrotnością częstotliwości przebiegu mierzonego (rys. 10).

Techniczne wykonania układów elektrycznych, zasilających układ czasowy w sposób opisany powyżej, opierają się na zasadzie działania lamp świetlnych, względnie na specjalnych układach lamp katodowych. Na rysunku po-

dano najbardziej typowy schemat takiego urządzenia (rys. 11).

Przy wielokrotnym przebieganiu promienia po tej samej krzywej oscylogramu energia, dostarczana przez promień katodowy układowi odczytowemu na jednostkę długości narysowanej krzywej, może być znacznie mniejsza, aniżeli w przypadku, gdy promień raz tylko jeden przebiega po krzywej oscylogramu. Wreszcie moment rozpoczęcia i zakończenia oscylografowania jest przy takim badaniu przebiegów periodycznych w znacznej mierze dowolny. Ze względu na to stosowanie w tym przypadku urządzeń, odcinających promień katodowy, ma znaczenie drugorzędne.

Sprawa jest znacznie trudniejsza w razie oscylografowania *przebiegów udarowych*. Wówczas badany przebieg występuje tylko raz jeden i musi być zdjęty właśnie ściśle w tej chwili, w której się pojawia. Zazwyczaj przebieg, któ-

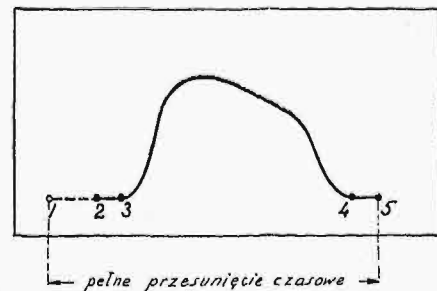


Rys. 11.

Czasowy układ proporcjonalny synchronizowany (pg. Rogowskiego), a — Schemat układu, b — Wykres.

ry należy zdjąć, trwa tak krótko, że wystarczy dla jego rejestracji jedynie czas, w ciągu którego promień otrzymuje jedno pełne przesunięcie czasowe. Rzecz jasna, iż prędkość tego przesunięcia jest w pewnych granicach dowolna, gdyż niema tu mowy o synchronizacji.

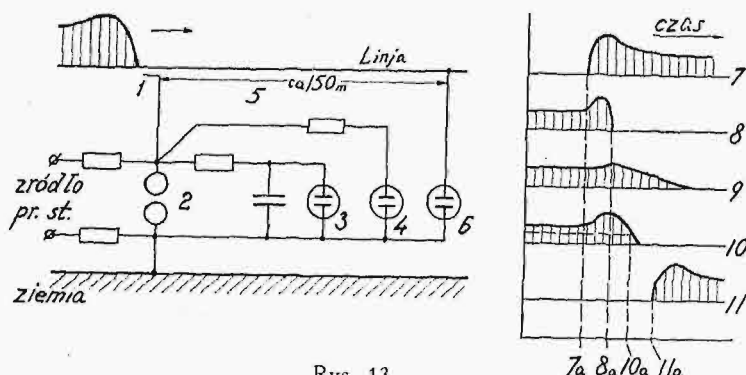
W przypadkach szczególnych, gdy zależy na długiej rejestracji przebiegu pojedynczego, stosuje się układ czasowy o sinusoidalnej linii zerowej. Przesunięcie czasowe rozkłada się na dwie składowe prostopadłe. Pierwsza z nich daje przesunięcie o prędkości sinusoidalnie zmiennej, prostopadłe do osi sinusoidy, — przesunięcie to jest otrzymywane przez układ elektryczny, druga zaś daje przesunięcie o prędkości jednostajnej, rzędu mniejszego od poprzedniej i o kierunku do osi sinusoidy równoległym. To ostatnie przesunięcie otrzymuje się zazwyczaj mechanicznie, przez przewijanie filmu. W układzie takim przesunięcie, powodowane przez elektryczny układ czasowy, jest prostopadłe do przesunięcia pomiarowego, przesunięcie zaś czasowe mechaniczne jest do niego równoległe. Oscylogram nie ma oczywiście stałej skali czasu i musi być odpowie-



Rys. 12.

Koordinacja działania poszczególnych elementów oscylografu. 1 — Uruchomienie układu czasowego. 2 — Wyzwolenie promienia katodowego. 3 — Początek rejestracji przebiegu. 4 — Koniec rejestracji przebiegu. 5 — Odcięcie promienia katodowego.

dnio zanalizowany. Na tej drodze udaje się czytelnie rejestrować przebiegi bardzo szybkie przez niewspółmiernie dłuższy przeciąg czasu (rys. 9). Otrzymanie sinusoidalnie zmiennego prądu lub napięcia, zasilającego w tym przypadku elektryczny układ czasowy, nie nastręcza trudności.



Rys. 13.

Układ elektryczny oscylografu przy zdejmowaniu przebiegów udarowych. 1—Sprężenie układów oscylografu z linią. 2—Iskiernik. 3—Układ czasowy. 4—Układ odcinający. 5—Linia opóźniająca. 6—Układ odchyłowy. 7—Przebiegi w punkcie sprężenia. 8—Napięcie na iskierniku (2). 9—Napięcie na układzie czasowym (3). 10—Napięcie na układzie odcinającym (4). 11—Przebiegi na układzie odchyłowym (6).

Przy badaniu przebiegów jednorazowych kwestia rozpoczęcia zdjęcia i zakończenia go jest jednym z najtrudniejszych zagadnień. Ponieważ energia, przenoszona

przez promień katodowy, jest tak dobrana, aby w czasie niezmiernie krótkiego jednorazowego przesunięcia się promienia po układzie odczytowym przebieg ten mógł być zarejestrowany, przeto promień, padający przed rozpoczęciem przebiegu na film fotograficzny w czasie nawet paru milisekund, zaczerpnie początek oscylogramu w zupełności. Promień ten może być wyzwolony dopiero już przed rozpoczęciem się badanego przebiegu i natychmiast po jego ukończeniu musi być odcięty.

Co do układu czasowego, to w celu wyzyskania możliwie jaknajwiększej części oscylogramu dla rejestracji badanego przebiegu, należy rozpocząć przesunięcie czasowe również w ostatniej chwili przed rozpoczęciem zdjęcia.

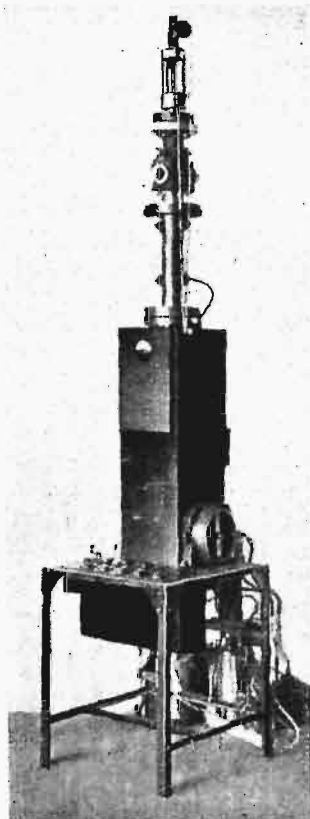
Idealne skoordynowanie działania poszczególnych elementów oscylografu jest w tym przypadku następujące: 1) rozpoczyna działać układ czasowy, 2) następuje wyzwolenie promienia katodowego, 3) rozpoczyna się rejestracja przebiegu badanego, 4) kończy się rejestracja przebiegu, 5)

układ czasowy daje pełne przesunięcie czasowe i promień zostaje odcięty (rys. 12).

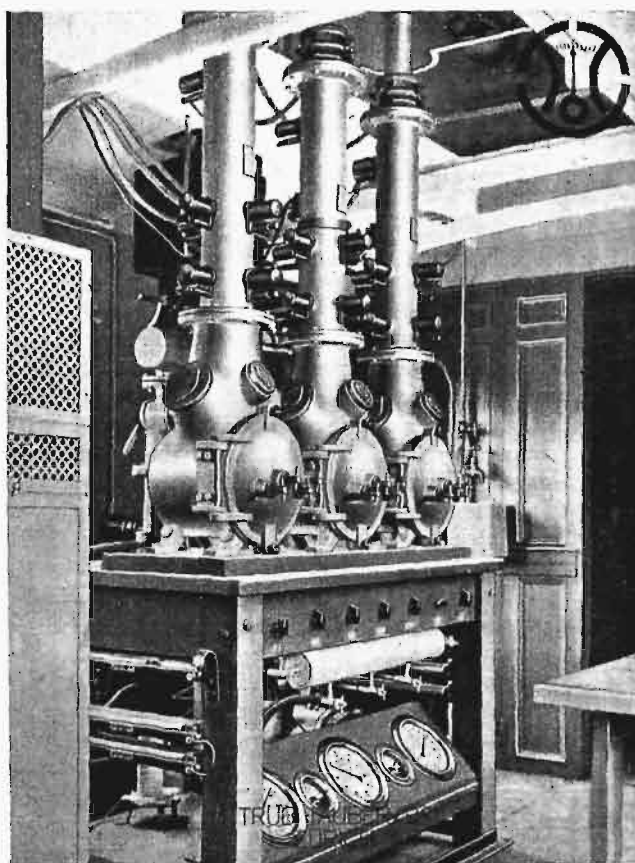
Ponieważ puszczenie w ruch całej powyższej serii zjawisk jest możliwe jedynie pod wpływem impulsu, danego przez sam badany przebieg i ponieważ z drugiej strony odstęp czasu pomiędzy momentem pierwszym a trzecim jest normalnie rzędu mikrosekundy, przeto zachodzi pytanie, w jaki sposób opóźnić początek rejestracji przebiegu właśnie o tę mikrosekundę.

Aby to osiągnąć, włącza się pomiędzy badanym punktem danego obwodu elektrycznego a odchyłowym układem pomiarowym sztuczną opóźniającą linię elektryczną o odpowiedniej długości. Układ czasowy i wyzwalający jest sprzężony z obwodem badanym przed linią opóźniającą i otrzymuje impuls do uruchomienia oscylografu natychmiast z wystąpieniem badanego zjawiska w danym punkcie. Badane zjawisko, aby się dostać do odchyłowego układu pomiarowego, musi natomiast przebiec po tej linii, przez ten czas oscylograf przygotowuje się do rozpoczęcia rejestracji. Ponieważ prędkość przenoszenia się zaburzeń elektrycznych po linii opóźniającej jest zwykle rzędu prędkości światła, przeto dla uzyskania odpowiedniego opóźnienia musi być ona rzędu setek metrów. Normalnie linia o długości 100 do 150 metrów wystarcza w zupełności.

W wykonaniu technicznym sprzęga się zazwyczaj obwód czasowo-wyzwalający pojemnościowo lub elektromagnetycznie z układem badanym. Impuls uruchamiający

Rys. 15.
Ogólny widok potrójnego oscylografu Bergé

sprowadza się do nieznacznego przepięcia w tym obwodzie, co powoduje przeskok na iskierniku odpowiednio wyregulowanym i zapoczątkowuje całe zjawisko.

Rys. 14.
Ogólny widok oscylografu Rogowskiego.

Istnieje nader wiele najrozmaitszych wykonanych technicznych układów elektrycznych, koordynujących działanie poszczególnych elementów oscylografu katodowego w trakcie oscylografowania przebiegów udarowych. Na rysunku podano przykład najbardziej typowy (rys. 13).

Trudności, opisane powyżej, są w znacznym stopniu zmniejszone przy tak zwanej rejestracji ciągłej, gdzie, jak np. przy układzie oscylograficznym o sinusoidalnej linii zerowej, oscylograf jest w ciągu stosunkowo długiego czasu gotów do zarejestrowania każdego przebiegu, nadchodzącego do układu pomiarowego. System ten jednak jest bardzo kosztowny, gdyż w celu zaobserwowania zjawiska, trwającego np. parę mikrosekund, przepuszcza się wielką ilość filmu niekiedy nawet w ciągu kilkunastu minut. Temi niemniej, dzięki zastosowaniu rejestracji ciągłej, można badać zjawiska, zachodzące w układzie w ciągu długiego czasu, co niejednokrotnie (np. w wypadku badania przepięć atmosferycznych) ma bardzo doniosłe znaczenie.

W związku z rozpatrywaniem zagadnień, dotyczących oscylografów katodowych, pragnę zaznaczyć, że w Polsce nie stosowano dotychczas tych oscylografów dla przeprowadzania badań w zakresie techniki prądów silnych i wysokich napięć. Pierwszy oscylograf katodowy, dostosowany do tych studiów, sprowadza obecnie Zakład Miernictwa Elektrycznego i Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej. Oscylograf ten, typu Rogowskiego (rys. 14), umożliwi przeprowadzenie w Polsce szeregu badań, związanych ze zjawiskami udarowymi i przepięciami, co wiąże się bezpośrednio z programem najbliższych prac wyżej wzmiankowanego Zakładu.

WYKAZ LITERATURY.

Uwaga: Ze względu, że literatura, dotycząca oscylografów katodowych, jest nadwyraz obfita i wykaz jej musiałby obejmować kilkakrotnie objętość, podaję poniżej jedynie dzieła podstawowe o charakterze ogólnym.

Hausrath. — Apparate und Verfahren zur Aufnahme und Darstellung von Wechselstromkurven und elektrischen Schwingungen. Str. 81. Lipsk 1913.

Mac Gregor-Morris and R. Mines. — Measurements in engineering by means of cathode rays. J. of I. E. E. Vol. 63 (1925) p. 1056.

Gabor D. — Oszillographieren von Wanderwellen mit dem Kathoden-oszillographen e. c. t. Forsch.-Hefte Studienges. f. Höchstspannungsanlagen. 1927. Heft 1 S. 7, 47, 62.

Dufour A. — Oscillographe cathodique pour l'étude des basses, moyennes et hautes fréquences. Paris 1923. Chiron.

Alberti E. — Braunsche Kathodenstrahlröhre und ihre Anwendung. Str. 214. Berlin, 1932.

Ardenne M. Die Kathodenstrahlröhre und ihre Anwendung in der Schwachstromtechnik. Str. 398. Berlin. 1933.

Arbeiten aus dem Elektrotechnischen Institut der Techn. Hochschule in Aachen. (Red. W. Rogowski). Band I — VI. (bis 1933).

Wykaz pozostałej literatury periodycznej i innej do roku 1931, podany w:

ATM — Archiv für technisches Messen. Nr. 5. November 1931. (J. 834).

Publikacje polskie:

Jaskólski T. — Oscylografy katodowe. Przegląd Elektrotechniczny. 1929, str. 121.

Jellonek A. — Uwidocznianie przebiegów periodycznych w oscylografie katodowym. Przegląd Radjotechniczny. 1933, str. 121.

POMIARY OPORNOŚCI MATERJAŁÓW IZOLACYJNYCH.

Inż. Aleksander Winogradow.

Streszczenie. Ścisłe określenie pojęcia oporności skrośnej, powierzchniowej i wewnętrznej. Wybór i opracowanie metod pomiarów. Szczegółowe omówienie urządzeń i przyrządów oraz sposobu wykonywania pomiarów. Projekty przyrządów normialnych. Projekt przepisów pomiarów oporności materiałów izolacyjnych stałych dla P. N. E.

1. Wstęp.

Materiały izolacyjne stałe posiadają dla przemysłu elektrotechnicznego szczególnie ważne znaczenie ze względu na ich własności mechaniczne, pozwalające na szeroki zakres zastosowania. Inne dielektryki — lotne lub ciekłe — nie mogą być stosowane same, zawsze w mniejszym lub większym stopniu muszą być wspomagane przez izolatory stałe. Stąd od tych ostatnich wymagamy bardzo różnorodnych własności.

Konstruktor urządzeń elektrycznych, stosując izolatory, jako część składową wszystkich przyrządów elektrycznych, musi posiadać znajomość ich własności poszczególnych, aby stworzyć konstrukcję pewną w ruchu, a pod względem ekonomicznym najbardziej racjonalną. Wytwórca musi mieć możność porównywania wyrabianych przez siebie materiałów, aby dążyć do ich ulepszenia. Odbiorca wreszcie gotowych przyrządów względnie ich części lub surowców chce mieć możność kontroli ich dobroci.

Stąd jasne, jak ważną rzeczą dla elektrotechniki jest posiadanie odpowiednich metod badania różnorodnych własności dielektryków stałych. W całym świecie od szeregu lat trwają badania w kierunku znalezienia najodpowiedniejszych metod, ich opracowania i ulepszenia. W Polsce tą sprawą jeszcze się nie zajmowano. Dopiero niedawno Zakład Miernictwa Elektrycznego i Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej rozpoczął studia nad metodami badania materiałów izolacyjnych. Praca niniejsza stanowi fragment tych badań. Otrzymane wyniki będą złożone Komisji materiałów izolacyjnych SEP, z którą Zakład współpracuje.

Pracę niniejszą wykonano w Zakładzie Miern. Elektr. i Wys. Nap. pod kierunkiem Prof. Kazimierza Drewnowskiego w roku 1930.

2. Przewodność materiałów izolacyjnych.

Zjawisko przejścia prądu przez dielektryk jest bardzo złożone. Dotychczas nie udało się ustalić jednolitej teorii, rozwiązującej bez zastrzeżeń sprawę przewodzenia prądu przez dielektryki stałe. Nie wnikając bliżej w stronę fizyczną tłumaczenia zjawiska oporu elektrycznego materiałów izolacyjnych stałych, gdzie doświadczalnie stwierdzono wszystkie trzy rodzaje przewodzenia: metaliczne, elektrolityczne i gazowe, omówimy wpływy, jakim opór ten ulega.

Na pierwszym miejscu stoi temperatura, której wpływ jest tak duży, że można bez przesady powiedzieć, iż przy każdej jej zmianie mamy niejako inny dielektryk. Zmienia

się konsystencja ciał, wchodzących w jego skład, np. dla materiałów nasyconych zmienia się płynność i przyczepność składnika nasycającego. Sama obecność ciepłego ruchu molekuł bardzo zmienia stan fizyczny dielektryka. Ważny także jest rozkład pola ciepłego w ciele. Przebieg zależności oporu od temperatury można dla niektórych ciał ująć we wzory empiryczne (funkcja potęgowa). Dają one jednak tylko grube przybliżenie i nie mogą być zastosowane do wszystkich dielektryków. Liczbowo dla wielu dielektryków, stosowanych w praktyce, już przy zwiększeniu temperatury o 10° w pobliżu temperatur pokojowych mamy powiększenie przewodności 1,5 do 4-krotne.

Drugim z kolei czynnikiem jest wielkość napięcia, które powoduje przepływ prądu. Prawo Ohma, orzekające prostą proporcjonalność prądu i napięcia, nie jest tu słuszne. Oporność zależna jest tutaj od wielkości napięcia przyłożonego i maleje wraz z rosnącą różnicą potencjałów. Próby matematycznego ujęcia tej zależności nie doprowadziły do wzoru ogólnego. Ponadto należy liczyć się ze zjawiskiem jakby histerezy, mianowicie, po uprzednim przyłożeniu większej różnicy potencjałów oporność dielektryka na ogół pozostaje przez pewien czas mniejsza i dopiero po dłuższym „odpoczynku” powraca do wartości początkowej. Łączy się z tem bezpośrednio wpływ czasu od chwili przyłożenia napięcia: oporność z czasem się zmienia i to w sposób bardzo różny, zależny przede wszystkim od rodzaju dielektryka. Bywa ona zarówno rosnąca, jak i malejąca. Na ogół oporność z czasem dąży asymptotycznie do pewnej stałej wartości. Przyczyna tkwi w polaryzacji dielektryka, w zjawiskach cieplnych pod wpływem prądu lub wreszcie w zmianach makroskopowych, jakim ulega masa ciała pod wpływem pola (przybieranie innych kształtów lub przemieszczanie się cząsteczek płynnych).

Bardzo duży a trudny do ujęcia jest wpływ wilgoci. Już stopień wilgotności otaczającego powietrza zmienia zasadniczo oporność wielu materiałów izolacyjnych. Woda zaś wpływa oczywiście jeszcze bardziej. Poza tem zawartość wilgoci w dielektryku potęguje wybitnie omówione zależności od czasu, napięcia i temperatury.

Nie można pominąć także wpływu jonizacji obcej oraz zjawiska starzenia się materiałów izolacyjnych. Kwestje te, jakkolwiek stwierdzone doświadczalnie, nie są zresztą bliżej opracowane. Zasadniczą rolę odgrywa także uprzednie przygotowanie dielektryka działaniem naprężeń mechanicznych bądź poddawanie wpływom cieplnym lub chemicznym.

Widzimy z tego, jak trudne jest jednoznaczne określenie oporności dielektryka i jak dokładnie należy oznaczać warunki próby.

Zależnie od drogi przechodzenia prądu przez dielektryk, t. j. przez jego masę i po jego powierzchni, rozróżniamy oporności następujące:

a) Oporność *skrośna* lub właściwa, t. j. oporność jednego cm^3 w kształcie sześciangu, mierzona prądem stałym przy napięciu określonej wartości po określonym czasie od chwili przyłożenia napięcia, dla znanych warunków temperatury i wilgotności. Poza tem należy podać przy próbie poprzednią historję dielektryka, t. j. ewentualne przygotowanie zapomocą naprężeń mechanicznych i cieplnych lub uprzednie poddawanie działaniu napięcia, czynników chemicznych, radioaktywnych i t. d.

b) Oporność *powierzchniowa* dielektryka, t. j. oporność warstwy jego, położonej przy powierzchni o wymiarach $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ przy równie ściśle określonych warunkach, jak i oporności skrośnej. Grubość warstwy powierzchniowej, której oporność mierzymy, nie jest oczywiście znana, dążymy jedynie, by była możliwie cienka, by oporność była rzeczywiście powierzchniowa.

c) Niejednokrotnie w praktyce spotyka się dielektryki o strukturze złożonej, których oporność nie jest taka sama we wszystkich kierunkach. Istnieją także materiały izolacyjne o większej przewodności wewnątrz, niż przy powierzchni (dzięki np. żyłkom przewodzącym i t. p.). W celu wykrycia tych zjawisk wprowadzamy pomiar t. zw. oporności *wewnętrznej*, mierzonej pomiędzy otworami określonych wymiarów, zrobionych w materiale w określonych odstępach w różnych kierunkach. Ścisłe określenie warunków próby należy tu również przeprowadzić.

Wielkości powyższe dają już wystarczające wskazówki co do zachowania się dielektryka w technice prądów niskiego napięcia (do 500 V i dla częstotliwości technicznych).

Najbardziej miarodajną dla danego materiału izolacyjnego byłaby wartość oporności, zmierzona napięciem, odpowiadającym warunkom normalnej pracy, lecz powstałaby trudność z porównawczą oceną dielektryków, a urządzenia i przeprowadzenie pomiarów przy wysokich napięciach byłyby kosztowne i kłopotliwe. Z drugiej strony napięcie nie powinno być zbyt niskie, bo wówczas zwiększają się trudności, związane z pomiarem prądów małych. Napięcie 1000 do 1200 V prądu stałego wydaje się najlepsze do tego celu i jest stosowane w przepisach różnych krajów.

Czas pomiaru należy ustalić dostatecznie długi, aby otrzymać wartość oporności, występującą w rzeczywistości przy pracy. Ponieważ pomiary pośrednie nie sprawiają żadnej trudności, należy je robić w ciągu pewnego czasu, wyznaczając zależność: $R = f(t)$. Przepisy niemieckie ograniczają się do pomiaru po 1 min. od chwili przyłożenia napięcia. Wyniki doświadczalne, otrzymane w naszym Laboratorium oraz podane w literaturze, świadczą, że czasem w wielu przypadkach jest niewystarczający. Wzorem przepisów angielskich należałoby wyznaczać krzywą: $R = f(t)$ w czasie przynajmniej 10 min., robiąc odczyt co 1 min. W ten sposób otrzymywalibyśmy charakter zmiany oporności z czasem, co jest szczególnie ważne dla ciał, których oporność z czasem maleje. Poza tem krzywa taka ilustruje, czy mierzona po 10 min. oporność jest już niedaleka wartości końcowej, czy też ma dążność do dalszych zmian. W tym ostatnim przypadku należy pomiar przedłużyć. Czas 30 min. zawsze już wystarczy.

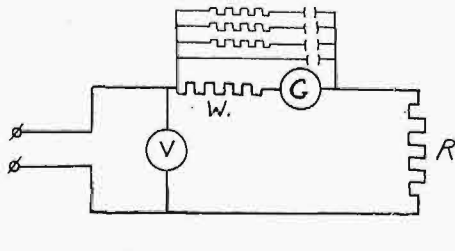
Poprzednia historja dielektryka oraz wpływ wilgoci i temperatury nie mogą być uogólnione na wszystkie dielektryki. Żądania w tej dziedzinie zależą od rodzaju materiału izolacyjnego, jego przeznaczenia i normalnych warunków pracy. W odpowiednich przepisach należy żądać tych lub innych warunków próby. Metoda pomiarów, jaka zostanie obrana, pozwoli bez trudności na ich zrealizowanie. Niektóre, jak poprzednie działanie napięcia, można odnieść do życzeń specjalnych. Wpływ temperatury możnaby każdorazowo przedstawić, zdejmując charakterystykę: $R = f(T^\circ)$, lecz to utrudniłoby znacznie pomiar, który na ogół jest bardzo prosty i niezawsze byłoby potrzebne, gdyż w wielu wypadkach materiał izolacyjny pracuje przy stosunkowo nieznacznych zmianach temperatury (bardzo często np. w temperaturze pokojowej). Dlatego też w ogólnej metodzie pomiaru nie podamy temperatury, przy której oporność ma być mierzona.

Przepisy szczegółowe dla każdego rodzaju materiałów izolacyjnych ustala też, którym próbom winny być one poddawane, określają ilość próbek i pomiarów.

3. Urządzenia pomiarowe.

Przy wyborze metody pomiaru należy zwrócić przede wszystkim uwagę na to, że nie można osiągnąć wielkiej dokładności ze względu na wpływ takich czynników, jak pomiar długości drogi prądu w dielektryku lub wykonanie

dobrego kontaktu: metal — dielektryk. Z drugiej strony nie chodzi też o pomiar zbyt dokładny, gdyż pomimo najdalej idących ostrożności usunięcie całkowite szkodliwych wpływów postronnych jest niemożliwe. Ze względu zaś na wielką zmienność oporności dielektryków wartość ścisła w chwilowych warunkach niezbyt jest potrzebna. Chodzi raczej o utrzymanie granic przybliżonych, w jakich oporność może się zmieniać.



Rys. 1.

Tym wymaganiom odpowiada w zupełności metoda techniczna (rys. 1). Jest ona niezmiernie prosta. Nie wymaga złożonych urządzeń dodatkowych ani oporników wzorcowych. Dokładność posiada zupełnie wystarczającą. Pozwala stosować szeroką skalę napięć i mierzyć oporności bardzo różne. Pozwala dokonywać pomiary w sposób ciągły i bardzo łatwy, śledzić wszystkie zmiany, jakim oporność badana ulega. Sam pomiar sprowadza się do odczytania woltomierza oraz galwanometru. Oporność mierzona otrzymamy z wzoru:

$$R = \frac{U}{k \cdot \alpha} - R_g,$$

gdzie: U — napięcie pomierzone, k — stała statyczna galwanometru, α — odchylenie galwanometru, R_g — oporność zastępcza galwanometru z bocznikiem i ewentualnym opornikiem ochronnym (W), która w większości przypadków praktycznych może być pominięta, jako bardzo mała w stosunku do R .

Inne metody pomiarów oporności, aczkolwiek dokładniejsze, nadają się raczej do badań naukowych, nie zaś do pomiarów technicznych. Należy również odrzucić metody jakościowe (lampa neonowa, ostrza); mogą one mieć jedynie znaczenie orientacyjne.

Do pomiarów należy użyć galwanometru o czułości nie mniejszej, niż 10^{-9} A/mm z bocznikiem, pozwalającym znacznie rozszerzyć zakres pomiarów. W pracy niniejszej posługiwano się galwanometrem lusterkowym systemu Deprez D'Arsonval'a w wykonaniu Cambridge, czułość $25 \cdot 10^{-11}$ A 2 000 Ω .

Przy pomiarach technicznych, gdzie ostrożność laboratoryjna nie zawsze jest zachowywana, wskazane jest stosowanie oporu ochronnego rzędu 10000 Ω . Może być on wbudowany bezpośrednio do galwanometru (rys. 1) lub przyłączony oddzielnie, w tym przypadku zwykle przed woltomierzem (rys. 2). Przy zastosowaniu takiego zabezpieczenia nawet w przypadku zwarcia w oporze badanym przy napięciu 1000 V popłynie prąd nie większy od 0,1 A i przyrząd będzie uchroniony przed uszkodzeniem. Wygodniejsze jest użycie schematu, podanego na rys. 2, ponieważ wówczas, jeszcze gdy galwanometr jest zwarty, spadek napięcia na woltomierzu ostrzeże o przepływie prądu dużego. Przy pomiarach laboratoryjnych można z tych środków ostrożności zrezygnować.

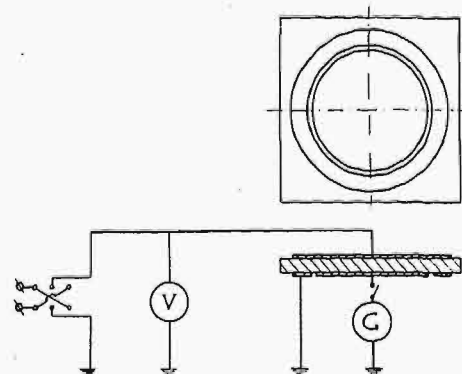
Zastosowanie galwanometru z wyżej wskazaną czułością przy użyciu bocznika pozwala mierzyć oporności w

granicach 10^6 do 10^{12} Ω , co wystarcza już w zupełności do badania nawet tak dobrych materiałów izolacyjnych, jak porcelana. Oporności poniżej 10^6 Ω możemy mierzyć, stosując zamiast galwanometru miliamperomierz lub inny przyrząd odpowiednio czuły.

Przy pomiarach należy zwrócić uwagę na ustawienie na zero skali galwanometru, ponieważ nitka, służąca jako zawieszenie, ulega odształceniom i zero często się przesuwa. Natomiast stała statyczna nie wykazuje zwykle uchwytanych zmian. Galwanometr należy umieścić wysoko na ścianie dla wyeliminowania takich wpływów, jak: oddech odczytującego, poruszenia, uderzenia, wstrząsy i t. d.

Jako źródło prądu niewątpliwie najlepsza jest bateria akumulatorów: jest tania, utrzymuje doskonale napięcie. Ponieważ prądy pomiaru zwykle są minimalne, można zastosować ogniwa o najmniejszej pojemności. Baterię zaopatrzyć należy w przełącznik, umożliwiającą łatwą regulację napięcia drogą włączania poszczególnych ogniw. Jeden biegun baterji zwykle się uziemia, co bardzo ułatwia kontrolę stanu urządzenia.

Ponieważ oporności badane są naogół bardzo duże, ogromną rolę odgrywa dobra izolacja całego urządzenia, aby prąd mierzony nie był zmieniony przez prądy upływowe. Należy bardzo starannie izolować wszystkie przyrządy, przewody, wyłączniki i t. d. W Laboratorium Miern. Elektr. i Wys. Nap. przewody zostały umieszczone na wysokich wspornikach ebonitowych. Były próby zastosowania izolacji bakelitowej, lecz przewodność jej okazała się zbyt duża. Pomimo jednak najbardziej dokładnej izolacji prądy upływowe całkowicie wyeliminować się nie dadzą. W naszym urządzeniu oporność izolacji wynosiła około $1,2 \cdot 10^{12}$ Ω , co uwzględniano przy pomiarach oporności bardzo du-



Rys. 3.

zych, jako dodatkową oporność, włączoną równolegle do badanej. W większości przypadków jednak uchyb ten można było pominąć.

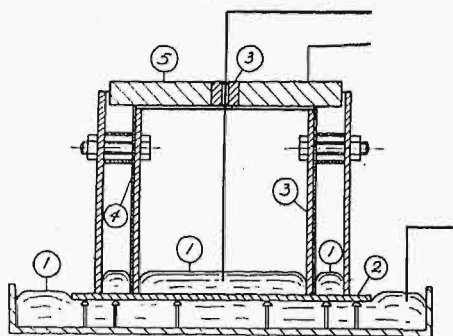
Bardzo wygodne jest stosowanie osłon wg. rys. 2. Wówczas prądy, omijające oporność badaną poprzez izolację urządzenia, są skierowane wprost do ziemi poza galwanometrem. Te prądy są stosunkowo duże, ponieważ powstają pod wpływem wysokiego napięcia. Izolacja natomiast w osłonach może być o wiele słabsza, ponieważ istnieje tu potencjał, nieprzekraczający przy pomiarach dużych oporności dielektryków części wolta względem ziemi.

4. Pomiar oporności skrośnej.

Jako punkt wyjścia dla badań wybrano pomiary na próbkach w kształcie płyt okrągłych lub kwadratowych. Płyty zaopatrywano z obu stron w dwie współosiowe przewodzące okładziny. Okładzina z jednej strony jest mniejsza i zaopatrzona w pierścień ochronny. Urządzenie takie wraz z układem połączeń według wybranej metody technicznej przedstawia rys. 3. Oporność skrośną oblicza się z wzoru:

$$\rho = \frac{R \cdot s}{a} \Omega \text{ cm},$$

gdzie: R — oporność mierzona w Ω , s — powierzchnia elektrody w cm^2 , a — grubość próbki w cm . Ponadto przeprowadzono szereg badań nad próbkami różnych kształtów



Rys. 4.

1—ręć, 2—próbka, 3—dobry izolator, 4—cynfolja, część osłony elektrostatycznej, 5—ciężarek, część osłony elektrostatycznej.

specjalnych (rurki izolacyjne, wyroby ceramiczne). Wzór dla obliczenia oporności skrośnej pozostaje w mocy, tylko jako s i a należy brać średnie wielkości powierzchni przejścia i długości drogi prądu w dielektryku. Brano pod uwagę przepisy państw obcych, w szczególności niemieckie i angielskie. Okazało się, że w wielu wypadkach przepisy te wymagają poprawek i uzupełnień.

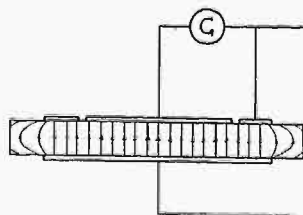
Przedewszystkiem zbadano sposób wykonania elektrod, ponieważ dobry kontakt pomiędzy okładziną metalową a die-

oraz od docisku, przyczem — stosując nawet bardzo duże dociski — nie dochodzimy do jakiegokolwiek wartości ustalonej. Rezultat znacznie się polepsza przy użyciu cynfolji w cienkich listkach jako podkładki pod płytki metalowe, jednak i tu oporność przejścia jest jeszcze znaczna a potrzebny duży docisk zniekształca próbkę.

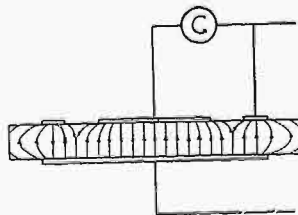
Natomiast dobrze się nadają elektrody z cynfolji, przyciskane za pośrednictwem gumy lub naklejone przy pomocy oleju parafinowego. Pierwsze są o tyle wygodniejsze, że pozwalają na wielokrotne ich użycie, zdejmowanie, przenoszenie. Jednak istnieje tu warstewka powietrza względnie jego pęcherzyki, zwłaszcza przy dielektrykach twardych, przy miękkich zaś samo przyciskanie nie jest dobre, ponieważ zniekształca próbkę. Uchyb — do 20%. Drugie natomiast dają mniejszą oporność przejścia, nie przesuwają się, wygodniejsze są, gdy trzeba wykonać kilka pomiarów porównawczych na tej samej próbce w różnych warunkach. Nie nadają się one jednak do ciał higroskopijnych, np. dla papierów nienasyconych. Dla wszelkiego rodzaju wyrobów bakelitowych, szkła i porcelany dały rezultaty zupełnie zadowalające. Olej nie przenikał do wnętrza tych materiałów. Świadczy o tym zgodność pomiarów, wykonanych od razu po naklejeniu i po kilku dniach. Po oderwaniu ich po kilku nawet tygodniach powierzchnia pod elektrodą zawsze była powleczone wilgotną warstwą oleju. Warstwa ta może być bardzo cienka. Pomiary próbki i cynfolji przed i po naklejeniu przy pomocy precyzyjnego mikrometru nie pozwoliły uchwycić przyrostu grubości. W każdym bądź razie warstewka ta dzięki lepkości zapewnia lepsze przyleganie cynfolji do materiału, a na pewno nie stawia większego oporu, niż pęcherzyki powietrza przy użyciu elektrod suchych. Wpływu przyciskania na tak przygotowaną elektrodę niema wcale.

Elektrody metalizowane, t. j. wykonane przy pomocy zimnego natrysku metalu (metodą Schoop'a), pozwalają na całkowite wyeliminowanie pęcherzyków powietrza i zapewniają idealny kontakt elektroda—dielektryk. Wadą jest kosztowność urządzenia do tego celu. Ponadto nie pozwalają na dobre zbadanie wpływu wilgotności, co znacznie uszczupla zakres ich stosowalności.

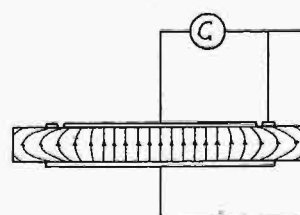
Elektrody rtęciowe lub wodne (dla materiałów niehigroskopijnych) są najlepsze. Urządzenie jest proste i tanie. Nie wymagają tej staranności i precyzji wykonania, co wszelkie inne. Oporność przejścia jest równa zeru. Przytem



Rys. 5a.



Rys. 5b.



Rys. 5c.

lektrykiem decyduje o dokładności tych pomiarów. Dlatego też zbadano skrupulatnie różne rodzaje elektrod: płytki metalowe, dociśnięte do dielektryka, elektrody z cynfolji, dociśnięte płytkami metalowymi lub gumowymi, elektrody z cynfolji, naklejone zapomocą oleju parafinowego, elektrody metalizowane, wreszcie elektrody wodne i rtęciowe.

W wyniku badań okazało się, że elektrody metalowe zupełnie się nie nadają. Przy materiałach twardych nie można uniknąć pęcherzyków powietrza pomiędzy elektrodą a dielektrykiem. Wynik ma charakter zupełnie przypadkowy, zależny w wysokim stopniu od stanu powierzchni materiału

elektrody rtęciowe nadają się do wszystkich dielektryków i do wszystkich badań. Rys. 4 przedstawia projekt takich elektrod. Mogą one być stosowane także do pomiarów strat dielektrycznych i stałej dielektrycznej (przewidziana osłona elektrostatyczna). Bardzo pożądane byłoby wprowadzenie takich elektrod jako normalnych.

Poniższa tabela ilustruje dobroć różnego rodzaju elektrod, podając wyniki dla porcelany, uzyskane przy ich pomocy, w stosunku do oporności, mierzonej elektrodami rtęciowymi, którą przyjęto za 100. Przy chropowatej powierzchni dielektryka różnice byłyby jeszcze bardziej rażące.

L.p.	Rodzaj elektrod, pow. ok. 50 cm ²	Oporność pomierzona w stos. do rzeczywi- stej (el. rtęc.)
1	Metalowe, docisk 2 kg. . . .	750 — 1 250
2	Metalowe z podłożoną cyn- folią docisk 2 kg. . . .	135 — 250
3	Z cynfolii, docisk 1 kg gumą	115 — 120
4	Z cynfolii, naklejane	100 — 105
5	Metalizowane	100
6	Wodne	100
7	Rtęciowe	100

Przepisy niemieckie dają co do elektrod tylko bardzo skąpe wskazówki, ograniczając się na żądaniu „dobrze przylegających okładzin”. Przepisy angielskie dopuszczają wyłącznie elektrody ciekłe. Wyniki badań przemawiają za ściśłem określeniem rodzaju elektrod, lecz jednocześnie za dopuszczeniem do pomiarów technicznych cynfolii, naklejanej a nawet dociskanej gumą, oraz elektrod metalizowanych z podaniem ściśłych wskazówek, dla jakich materiałów i badań dozwala się je stosować. Naogół jednak należy stworzyć i jak najszerzej stosować normalne elektrody rtęciowe.

Poza wyżej opisanymi istnieją jeszcze inne sposoby wykonania elektrod, lecz wszystkie one są kosztowne, wymagają specjalnych urządzeń i, co najważniejsze, nie dają gwarancji, że przy ich wykonywaniu własności izolacyjne materiału nie ulegną poważnym zmianom, szczególnie jeżeli chodzi o badanie takich zjawisk, jak wpływy wilgotności.

Następnym a też bardzo ważnym czynnikiem jest właściwe wykonanie pierścieni ochronnych. Zadaniem ich jest stworzenie jednostajnego pola prądowego w całym obszarze pomiarowym i odprowadzenie prądów powierzchniowych i brzegowych poza galwanometr. Idealny rozkład pola przy zastosowaniu pierścienia ochronnego przedstawia rys. 5a. Osiąga się to przez zastosowanie odpowiednio cienkiego paska izolacyjnego pomiędzy elektrodą a pierścieniem i odpowiedniej szerokości tego ostatniego.

Naogół prąd, idący przez galwanometr, rośnie wraz z szerokością paska izolacyjnego. Tłómaczy to rys. 5b, na którym przedstawiono rozkład pola przy zastosowaniu szerokiego paska. Celowe zatem jest zmniejszenie szerokości jego do minimum praktycznie wykonalnego, a więc zgodnie z przepisami niemieckimi do 1 mm. Przy elektrodach rtęciowych nie da się to osiągnąć, wówczas można osiągnąć 2—3 mm. W każdym razie przepisy angielskie, ustalające szerokość na 10 mm, dopuszczają zbyt znaczny uchyb.

Duży wpływ ma też szerokość pierścienia ochronnego. Prąd, idący przez galwanometr, zwiększa się ze zmniejszeniem jej. Tłómaczy to rys. 5c, na którym uwidocznił rozkład pola przy zastosowaniu pierścienia zbyt wąskiego. Wymaganie przepisów niemieckich, aby pierścień ochronny miał szerokość przynajmniej dwukrotnie większą od grubości płytki, należałoby jeszcze obostrzyć, żądając szerokości trzykrotnie większej od grubości i minimum 5 mm. Dopiero przy zastosowaniu takich szerokości nie udało się doświadczalnie stwierdzić dalszego zmniejszania się prądu, płynącego przez galwanometr.

Wymagań co do szerokości pierścienia ochronnego i paska izolacyjnego można zbyt nie obostrzać przy próbach odbiorczych, ponieważ ewentualny uchyb pozornie zmniejsza oporność badaną, a więc próba odbędzie się w warunkach bardziej ostrych.

Wymiary próbek przy tych pomiarach roli wybitnej nie odgrywają. Próbkę większą a cieńszą pozwala na otrzymanie większych prądów, a więc ułatwia pomiary i zwiększa dokładność. Przy próbce cieńszej łatwiej także otrzymać pole

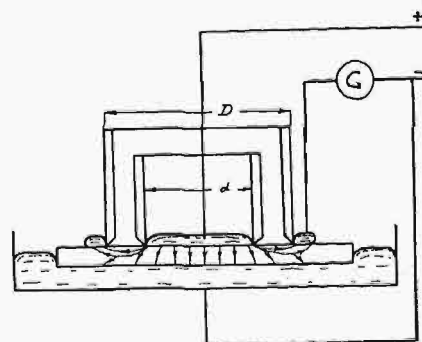
jednostajne. Natomiast wymiary próbki mają ogromne znaczenie przy pomiarach strat dielektrycznych i dla badań nad wytrzymałością elektryczną. Dlatego tu kwestię wymiarów próbek pozostawiamy otwartą, ponieważ jest rzeczą zewszecznar pożądaną, aby dla wszelkich prób materiałów izolacyjnych ustalić tę samą próbkę co do kształtu i wymiarów.

Przy zastosowaniu właściwych elektrod i pierścienia ochronnego metoda posiada dużą dokładność, mianowicie przy wykonaniu kilku pomiarów uchyb całkowity nie przekracza 4%, przy jednym pomiarze uchyb prawdopodobny nie będzie większy, niż 7 — 8%. Dokładność taka aż nadto wystarcza dla pomiarów technicznych, a nawet jest dopuszczalną przy pomiarach laboratoryjnych i porównawczych.

Po opracowaniu metody wykonano w Laboratorium Miern. Elektr. i Wys. Nap. szereg badań nad oporem dielektryków, zależnością jego od temperatury, czasu i napięcia. Badano zjawiska histerezy dielektrycznej. Otrzymane wyniki potwierdzają wyżej wypowiedziane uwagi o tych zjawiskach i zgodne są z badaniami laboratorjów zagranicznych.

5. Pomiary oporności powierzchniowej.

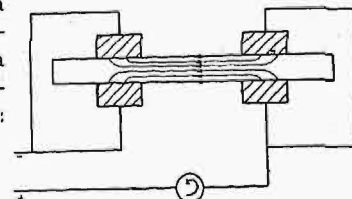
Obce przepisy, dotyczące badania oporności powierzchniowej, bardzo się od siebie różnią. Wynika to stąd, że pomiar samej tylko oporności powierzchniowej jest niemożliwy — zawsze w mniejszym lub większym stopniu prąd będzie przepływał przez masę dielektryka. Do możliwie najlepszego wyeliminowania względnie ustalania tego prądu, dążą przepisy różnymi drogami.



Rys. 6.

Przepisy angielskie każą wykonywać pomiar przy pomocy urządzenia, stosowanego do badania oporu skrośnego, włączając jedynie galwanometr do innej gałęzi. Schemat pomiaru oraz rozkład pola jest uwidocznił na rys. 6. Elektrode dolną można nazwać w tym wypadku ochroną, ona odprowadza prąd skrośny i zmniejsza prądy przez masę dielektryka przy przejściu od elektrody środkowej do współśrodkowego pierścienia. Analogiczny pomiar jest przepisany dla rur. Wówczas elektrodę ochronną stanowi rtęć, wypełniająca wnętrze. Zewnętrzną okładzinę i pierścień wykonuje się z cynfolii. Dla materiałów bardzo twardych przewidziany jest pomiar na próbkach kształtu specjalnego. Wzór dla obliczenia oporności powierzchniowej dla płyt ma kształt:

$$\sigma = \frac{2\pi R}{\log_e \frac{D}{d}} \Omega.$$

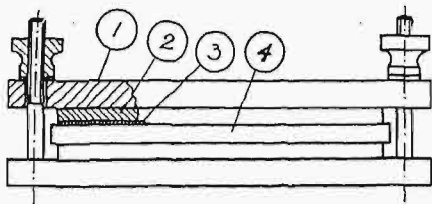


Rys. 7.

Przepisy francuskie wyszły z założenia zupełnie innego i przepisują pomiar łączny oporności powierzchniowej i przez masę w myśl schematu 7. Mamy tam i rozkład pola. Po wy-

konaniu pomiaru można ściśle obliczyć oporność powierzchniową, jeśli znamy oporność właściwą dielektryka. Są one połączone równolegle.

Przepisy niemieckie zajęły stanowisko ściśle praktyczne: oporność powierzchniowa sama przez się nigdzie nie występuje, zawsze częściowo łączy się z opornością wewnętrzną materiału. Niema zatem potrzeby tak bardzo starać się o



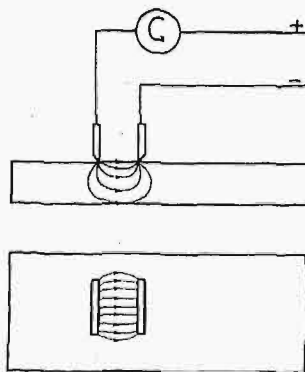
Rys. 8.
1—metal, 2—guma, 3—cynfolja, 4—próbka.

zupełne wyodrębnienie prądu powierzchniowego. Przeciwnie, zbliżymy się do warunków rzeczywistych, jeżeli nie będziemy rugować prądów wewnętrznych. Przewodność powierzchniowa przytem będzie niejako zwiększona, czyli próba odbędzie się w warunkach bardziej ostrych. Poleca się zatem

stosowanie elektrod nożowych wg. rys. 9. Chociaż nie chodzi tu o wielkość fizyczną, ważną jednak jest rzeczą, by pomiar odbywał się zawsze w tych samych warunkach, dlatego przepisy polecają stosowanie aparatu normalnego wg. rys. 10.

Wszystkie te rodzaje metod zostały szczegółowo zbadane.

Co się tyczy przepisów angielskich, okazało się, że aczkolwiek jest rzeczą bardzo wygodną stosowanie tych sa-



Rys. 9.

mych elektrod do pomiarów oporności skrośnej i powierzchniowej, jest to jednak ze szkodą dla ścisłości pomiarów pierwszej. Mianowicie odstęp 10 mm pomiędzy pierścieniem ochronnym i elektrodą środkową jest zbyt duży, uchyb przytem może już być poważny. Stosowanie zaś pomocniczej dolnej elektrody ochronnej dla dobrych izolatorów nie ma prawie wpływu, natomiast przy złych prąd przy jej zastosowaniu spada, przez to izolator wydaje się lepszym, niż jest w rzeczywistości.

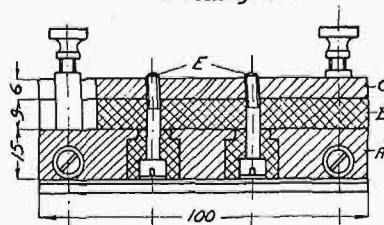
Pomiar elektrodami francuskimi posiada zasadniczą wadę w przyciskaniu elektrod śrubami (rys. 8), a więc wprowadza czynnik indywidualny. Pojęcia: „mocno”, „słabo” docisnięte elektrody są bardzo rozciągliwe, z dociskiem zaś wartość prądu ogromnie się zmienia. Wpływają tu trzy czynniki. Po pierwsze przez dociskanie polepsza się kontakt elektrody — materiał. Po drugie zmniejsza się odległość między elektrodami wskutek tego, że guma, dociskająca cynfolię, pod ciśnieniem zniekształca się i występuje z pod elektrod. Jednocześnie zwiększa się przekrój drogi dla przejścia prądu wewnątrz materiału i zmniejsza się jej długość. Niemożliwe jest ustalenie (na oko — bo tu tylko taką ocenę mieć możemy), jakiej wielkości docisk trzeba stosować, aby otrzymać dostateczny kontakt i nie zniekształcić przy tem elektrod. Przy materiałach miękkich obawiać się ponadto trzeba zniekształcenia samego dielektryka badanego.

Opisany wpływ docisku ma duże znaczenie. Wahania prądu w zależności od docisku przy materiałach twardych dochodzą do 100%, a pomimo największego nawet możliwego

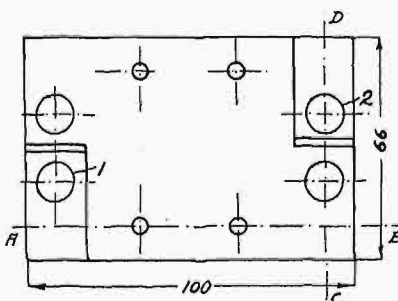
docisku śrubami nie dochodzimy do zupełnie dobrego kontaktu elektrody — materiał. Świadczą o tem pomiary porównawcze, wykonane na tej samej płytce elektrodami francuskimi, ustawionymi raz wprost na materiale, drugi zaś na naklejonych uprzednio listkach cynfolji, dokładnie odpowiadających wielkości elektrod. Pozbywamy się w drugim przypadku wpływu docisku i otrzymujemy wartości blisko o 30% większe. Niestety, środki lepkie trzeba wykluczyć z tego pomiaru, gdyż nakleić elektrody, nie zanieczyszczając powierzchni w mniejszym lub większym stopniu, bardzo trudno, przez co oporność powierzchniowa może bardzo się zmienić. Poza tem elektrody francuskie są o tyle niewygodne, że wymagają stosowania próbek ściśle określonych wymiarów, mianowicie takich, aby się zmieściły między śrubami, ściągającymi elektrody.

Najbardziej wygodne w zastosowaniu praktycznym są elektrody niemieckie. Ponieważ dużą rolę, jak widzieliśmy, odgrywa przy tym pomiarze docisk, a niewątpliwie także wymiary elektrod, został zbudowany aparat normalny, przedstawiony na rys. 10. Składa się on z dwóch elektrod nożowych (D), wykonanych z gumy, owiniętej w ciekłą cynfolję. Elektrody te są umocowane w płytach mosiężnych (A), te zaś z kolei związane są trwale z taką górną płytą (C) w ten sposób, aby odstęp elektrod nożowych wynosił 10 mm. Płyty A i C są oddzielone zapomocą wysokowartościowej izolacji ebonitowej (B). Płyty B i C mają wycięcia takie, aby można było się dołączyć do kontaktów 1 i 2 płyt A i doprowadzić w ten sposób napięcie do elektrod nożowych. Śruby E, służące do zmontowania całego aparatu, są dokładnie izolowane ebonitem od płyty A, a więc i od elektrod nożowych. Długość elektrod nożowych jest znormalizowana i wynosi 100 mm. Ważne to jest ze względu na prądy po brzegach (rys. 9), które przy znormalizowanej długości elektrod

Przekrój AB.

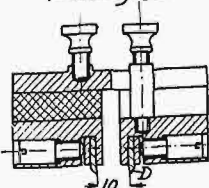


Rys. 10a.



Rys. 10b.

Przekrój CD



Rys. 10c.

choć powiększą pozornie przewodność powierzchniową, lecz zawsze w tym samym stosunku. Docisk przez znormalizowanie wszystkich wymiarów przyrządu, a przez to i jego wagi, jest stały i dostatecznie duży, by stworzyć dobry kontakt. Dalsze przyciskanie wypacza już gumowe elektrody i zmienia szerokość powierzchni pomiarowej.

Wielkość próbki niema większego znaczenia, byleby tylko elektrody na niej się mieściły i odstępy po brzegach

nie były zbyt małe (prądy brzegowe). Pomiaru można będzie zatem wykonać na próbkach, przeznaczonych do innych pomiarów.

Zaletami elektrod nożowych są: 1) Łatwe ustawienie, sprowadzające się do umieszczenia przyrządu na próbce, a więc możliwość wykonania łatwego wielu pomiarów w różnych miejscach próbki, co jest bardzo ważne ze względu na duży uchyb przypadkowy, spowodowany wielką zmiennością przewodności powierzchniowej nawet na powierzchni tej samej próbki. 2) Jednoznaczność pomiarów, spowodowana tem, że aparat pomiarowy jest ściśle znormalizowany. Stąd możliwość porównywania poszczególnych dielektryków z dokładnością, zupełnie wystarczającą dla praktyki. Odstęp elektrod może być raz nazawsze ustalony w przyrządzie, ze znacznie większą ścisłością, niż to ma miejsce np. przy elektrodach francuskich, które przy każdym pomiarze ustawia się nowo. Powyższe względy dają tej metodzie wybitną przewagę nad innymi.

Ujemną jej stroną jest konieczność posiadania próbek płaskich i to możliwie gładkich ze względu na otrzymanie dobrego kontaktu. Dlatego dla próbek nierównych lub kształtowanych elektrody te nie nadają się.

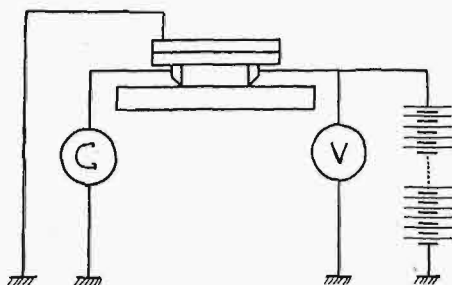
Oczywiście wartość zmierzona oporności powierzchniowej odbiegać będzie w pewnych granicach od rzeczywistości. Otrzymamy pewną umowną tylko wielkość, na którą złożą się: przewodność powierzchniowa, przewodność przez wnętrze i po brzegach. Mimo to będzie ona ważnym miernikiem własności badanego materiału i to właśnie tej, z jaką spotykamy się w praktyce przy przejściu prądu po „powierzchni” izolatora.

Układ pomiarowy najlepiej ustalić wg. rys. 11, czyli korzystać ze wszystkich urządzeń pomiarowych oporności skrośnej. Materiał badany układa się na dobrym izolatorze, np. ebonicie. Na powierzchni jego ustawia się elektrody nożowe, których górna metalowa płyta (C) jest uziemiona. Czynimy tak, aby wyeliminować z pomiaru prąd, płynący od jednej elektrody nożowej do drugiej przez ebonit, który je łączy. Pomimo bowiem zastosowania tak dobrego izolatora jak ebonit, ten prąd jest dość duży (znaczące powierzchnie styku). Oczywiście wpływ ten będzie tem znaczniejszy, im oporność badana będzie większa. Przy bardzo dobrych izolatorach prąd ten może nawet przeważać.

Po odczytaniu prądu na galwanometrze wyznaczamy oporność właściwą powierzchniową z wzoru:

$$\sigma = \frac{U \cdot l}{I \cdot a} \Omega,$$

gdzie: σ — oporność właściwa, t. j. oporność powierzchni kwadratu o boku 1 cm, U — napięcie probiercze w woltach,



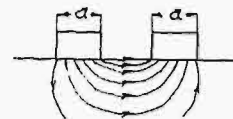
Rys. 11.

I — prąd w amperach, l — długość elektrod w cm, a — odstęp elektrod w cm. Ponieważ w przyrządzie normalnym: $l = 10$ cm, $a = 1$ cm, wzór się upraszcza:

$$\sigma = \frac{10 U}{I} \Omega,$$

Jak to już było zaznaczone, oporność zmienia się znacznie, zależnie od miejsca na powierzchni badanej. Należy przeto wyznaczać średnią oporność powierzchniową, wykonując kilka pomiarów w różnych miejscach próbki.

Oporność powierzchniowa zależy jeszcze bardziej od wpływów postronnych, niż skrośna. Np. mniejsze lub większe naświetlenie powierzchni odgrywa już rolę. Wilgotność powietrza może zmienić oporność o kilka rzędów wielkości, ponieważ przewodność powierzchniowa w większej części polega właśnie na higroskopijności warstwy powierzchniowej. Dlatego też w technice przeważnie nie chodzi o wyznaczenie ścisłej wartości, lecz o rząd wielkości w danych warunkach lub o zmiany rzędu ze zmianą warunków. Metoda powyższa do tego celu wystarcza w zupełności. Niema też potrzeby wykonywania zbyt wielkiej liczby pomiarów, można ograniczyć się do 5.



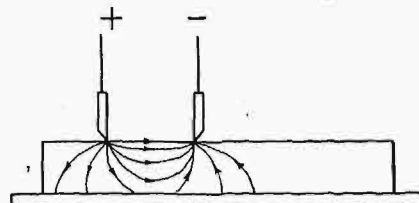
Rys. 12.

Wpływ czasu pomiaru jest bardzo różny. Dla niektórych ciał prąd ustala się niemal natychmiast, dla innych — po kilku a nawet kilkunastu minutach. Znaczną rolę odgrywa tu natężenie prądu: duże prądy mogą rozgrzać i osuszyć powierzchnię, co nie ma miejsca przy prądach małych. W każdym bądź razie wydaje się słuszne, aby prowadzić pomiar jak dla oporności skrośnej w ciągu 10 względnie 30 minut. Gdy pomiar odbywa się po uprzednim przygotowaniu próbki przez moczenie, ważna jest wartość, otrzymana natychmiast po włączeniu napięcia. Mieć ją będziemy z krzywej $\sigma = f(t)$.

Zmiany oporności w zależności od napięcia probierczego mogą mieć charakter różny. Zawsze jednak oporność maleje z rosnącym napięciem. Najlepiej napięcie probiercze ustalić to samo, co i dla pomiarów oporności skrośnej, t. j. 1000 V.

Szczegółowo została zbadana zależność prądu od szerokości a elektrody (rys. 12). Jak już było zaznaczone, prąd przechodzi przy pomiarze nie tylko po powierzchni, ale także i przez wewnętrzne materiały. Ten ostatni zwiększa się z rosnącą szerokością elektrody, dążąc do pewnej wartości ustalonej. Badania doświadczalne w zupełności to potwierdzają. Na płytkach cienkich zależność ta nie występuje tak jasrawo, jak na grubych, ponieważ wówczas prąd już przy bardzo małych wartościach a niejako wypełnia cały przekrój płytki. Im płytka jest cieńsza, tem wcześniej zjawia się ustalenie prądu, tem prędzej szerokość a przestaje odgrywać rolę. Przy tych badaniach jako elektrody płytkowe stosowano cynfolję naklejaną. Na tych dopiero listkach cynfolji ustawiano zwykłe elektrody nożowe.

Powyższe świadczy, że elektrody nożowe o wymiarze



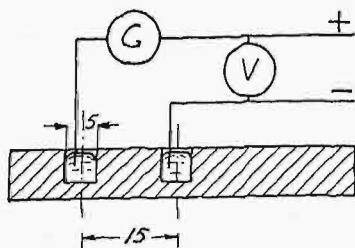
Rys. 13.

a , sprowadzonym do minimum wykonalnego, a zapewniającym jedynie dokładny kontakt z dielektrykiem na całej swej długości, dają wyniki najbardziej zbliżone do pomiaru samej tylko oporności powierzchniowej, ograniczając prąd przez masę do minimum.

Zbadano też wpływ podstawy pod próbkę. Porównano wartość prądu przy stosowaniu jako podstawy metali i izolatorów. Okazało się, że przy próbkach grubych wpływ jest nieznaczny, dla płyt cienkich różnice rosną. Tłómaczy to rys. 13, gdzie przedstawiony został rozkład pola przy zastosowaniu płyty metalowej jako podstawy. Rodzaj podkładanego izolatora (guma, izonit, ebonit) nie daje żadnej uchwytnej różnicy. Stąd wniosek, że przy pomiarach należy próbkę umieszczać na podstawie izolacyjnej.

6. Pomiar oporności wewnętrznej.

Oporność wewnętrzna jest wielkością ściśle umowną i charakteryzuje przepływ prądu we wnętrzu dielektryka. Aby więc otrzymane wielkości można było porównywać, trzeba ściśle określić wielkość i odstęp elektrod oraz ich kształt.



Rys. 14.

Poszczególne przepisy obce zgadzają się co do tego w zupełności.

Niemcy przyjęły dwie metody: wtyczkową i rtęciową. Według pierwszej osadza się w dwóch wywierconych w materiale otworach, ślepych i lekkostożkowych wtyczki metalowe, jakich używa się np. przy opornikach wtyczkowych, o średnicy 5 mm dla próbek w kształcie płyt i 2 mm dla prętów lub rur. Odstęp osi otworów wynosi 15 mm. Druga metoda różni się tylko tym, że zamiast stworzenia kontaktu przez dobrze dociśniętą wtyczkę otrzymujemy go przy pomocy rtęci, wypełniającej otwory. Odstęp środków otworów wynosi jak wyżej 15 mm, średnica 5 mm. Głębokość otworu wynosi około 2/3 grubości płytki, maksimum jednak 10 mm. Napięcia probiercze ustalono aż trzy: 110, 220 i 1000 V prądu stałego. Czas pomiaru 20 lub 60 sek po przyłożeniu napięcia.

Anglicy stosują jedynie metodę rtęciową, zachowując te same wymiary elektrod. Nie ograniczają głębokości otworu, natomiast wymagają podania w protokół pomiaru grubości płytki. Napięcie probiercze wynosi 500 V. Oporność mierzy się w ciągu 10 minut. Wyznacza się krzywą zależności oporności od czasu.

Liczby pomiarów w przepisach ogólnych niemieckich nie podano, jak również kierunku osi otworów. Zostawiono to do uznania przepisów szczegółowych dla różnych dielektryków. Np. dla preszpanu przewidziano 5 pomiarów na jednej płytce w różnych jej miejscach, dla kamieni naturalnych — 6 pomiarów przy rozmieszczeniu otworów w sześciokąt foremny z jednym po środku. Jest to bardzo wygodny sposób: uzyskuje się możliwość wykonania większej liczby pomiarów przy minimalnej liczbie otworów i to w różnych kierunkach. Jedną elektrodę stanowi otwór po środku, drugą — po kolei każdy położony na obwodzie. Przepisy angielskie, nie podając liczby pomiarów, przewidują jedynie kierunek osi otworów, a więc równoległy do uwarstwienia materiału (oporność właściwa zwykle jest mierzona prostopadle do warstw).

Zbadano obie metody: wtyczkową i rtęciową. Sam pomiar uskuteczniano metodą techniczną (rys. 14), zapomocą

galwanometru. Napięcie probiercze przyjęto 1000 V. Wymiary elektrod i ich ukształtowanie przyjęto bez zmian według przepisów niemieckich. W wyniku badań nasunęły się następujące uwagi.

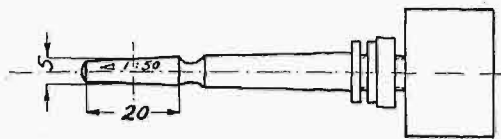
Elektrody rtęciowe niewątpliwie dają lepszy styk od wtyczkowych. Szczególnie wyraźnie da się to odczuć przy materiałach twardych. Np. pomiary, wykonane na izonicie (wyrób fabryki Szpotańskiego), dały wartości prądu dwukrotnie większe przy użyciu elektrod rtęciowych, niż dla elektrod wtyczkowych. Jednakże są przypadki, gdzie elektrody rtęciowe stosowane być nie mogą. Zachodzi to po pierwsze przy badaniu materiałów bardzo elastycznych, np. gumy. Wówczas nie da się otrzymać należycie wykonanego otworu dla napełnienia go rtęcią. Elastyczne brzozy rozprężają się, zakrywając otwór i zmieniając odległości. Po drugie — dla materiałów, wykonywanych jako cienkie płyty (np. preszpan), niema mowy o pomiarach rtęcią, jeżeli grubość płyty wynosi np. 1 mm. Natomiast elektrody wtyczkowe w pierwszym przypadku wypierają elastyczne brzozy z otworu i właśnie dzięki sprężystości materiału otrzymują dobry kontakt. W drugim przypadku można wywiercić w płycie otwory na wylot i w nich osadzić wtyczki. Elektrodom wtyczkowym w celu łatwiejszego osadzania nadaje się kształt stożkowy.

Z dokładnością pomiaru jest tu jeszcze gorzej, niż przy oporności powierzchniowej. Składają się na to: 1) Nieokreślona bliżej głębokość otworu, która w myśl przepisów obcych wynosi około 2/3 grubości płytki. Takie określenie jest dobre ze względu na to, że badany wówczas prąd rzeczywiście jest we „wnętrzu”, w samym środku próbki. Lecz to ujemnie wpływa na jednoznaczność pomiarów: prąd niewątpliwie zależy od powierzchni styku i od przekroju drogi jego w dielektryku, a te wraz z głębokością otworu rosną. 2) Przy elektrodach rtęciowych oporność mierzona zależy od wypełnienia otworu rtęcią: przy zmianach wysokości rtęci w otworach zmienia się prąd mierzony i to znacznie. Przyczyny są oczywiste, a doświadczenie całkowicie to potwierdza. Stanowi to również sprawdzian doświadczalny wpływu głębokości otworu. Zalecić tu można napełnianie otworów prawie do pełna, t. j. około 1 mm od górnego brzozy. 3) Przy elektrodach wtyczkowych duży uchyb powstaje skutkiem niezbyt dobrego kontaktu. Najlepszym dowodem jest fakt, że na tej samej parze otworów otrzymuje się różne wyniki po każdym pokręceniu wtyczki, po jej wyjęciu i ponownym osadzeniu. 4) Wywiercenie dokładne otworów w materiałach izolacyjnych jest naogół bardzo utrudnione, przy obróbce łatwo doznają one uszkodzeń, kruszą się. Dlatego też duży uchyb kryje się w niedokładnych wymiarach elektrod i ich odstęp. 5) Wreszcie i tu pomiar sprowadza się do wyznaczenia pewnej średniej wartości. Oporność wnętrza wielu materiałów izolacyjnych jest bardzo zależna od miejsca pomiaru nawet w tej samej próbce.

Jednakże dla celów praktyki, t. j. dla wykrycia, czy oporność jest bardzo zmienna w różnych kierunkach (np. równoległe do warstw i prostopadle), czy wewnątrz materiałów niema warstw znacznie lepiej przewodzących od powierzchniowych (np. żyłek o charakterze metalicznym wewnątrz kamieni naturalnych), metoda ta jest w zupełności wystarczająca.

Czas pomiaru należy przyjąć najwyżej 10 min, ponieważ oporność wewnętrzna nie powinna w swoim charakterze odbiegać od oporności skrośnej, a dla tej ostatniej stwierdziliśmy znaczną zależność od czasu pomiaru. Z drugiej strony dokładność pomiaru jest niewielka — chodzi jedynie o rząd wielkości, wyznaczanie zatem krzywej $R = f(t)$ nie przedstawia wielkiej wartości. Stąd właściwy będzie pomiar po upływie 10, a nawet 5 minut.

Średnicę wtyczki dla rur i prętów należy brać mniejszą, gdyż trudniej tu jest wiercić szerokie otwory. W protokole należy podać wielkość wtyczki.



Rys. 15.

7. Wnioski przepisowe.

W wyniku badań można zaproponować następujące przepisy pomiarów oporności materiałów izolacyjnych stałych.

„1. Dla pomiarów oporności właściwej materiałów izolacyjnych stałych należy używać próbek i elektrod o wymiarach takich samych, jak do pomiarów strat dielektrycznych. Próbie tej mogą być poddawane także wyroby gotowe (rury, pręty i t. d.).

Elektrody muszą posiadać dokładny kontakt z badanym dielektrykiem całą swoją powierzchnią. Dopuszcza się elektrody z cynfolii, naklejane przy pomocy oleju parafinowego lub przyciskane za pośrednictwem warstwy gumowej, elektrody metalizowane, wodne i rtęciowe. Zaleca się stosowanie normalnych elektrod rtęciowych według rysunku.

Pomiary wykonywa się metodą techniczną przy napięciu probierczym 1 000 V prądu stałego o uziemionym od strony galwanometru biegunie w ciągu 10 min. od chwili włączenia napięcia co 1 min. Podać należy krzywą zależności: $R = f(t)$. Wrazie gdyby w tym czasie wartość prądu nie ustaliła się praktycznie, należy pomiar przedłużyć do 30 min. Prąd należy mierzyć galwanometrem przy uziemionym pierścieniu ochronnym. Szerokość paska izolacyjnego winna wynosić 1 mm, dla wyrobów zaś ceramicznych i elektrod ciekłych ma być tak mała, jak na to pozwala wykonanie, nie większa jednak od 5 mm. Szerokość pierścienia ochronnych winna wynosić trzykrotną grubość płytki, nie mniej jednak, niż 5 mm.

Należy dbać o właściwą izolację urządzenia pomiarowego, względnie umieścić przewód od próbki do galwanometru w węźle uziemionym. Galwanometr, dobrze izolowany, należy umieścić na podstawie uziemionej.

Z oporności zmierzonej oblicza się oporność właściwą ze wzoru:

$$\rho = \frac{R \cdot s}{a} \Omega \text{ cm};$$

gdzie: R — oporność pomierzona w Ω , s — powierzchnia elektrody w cm^2 (przy próbce o kształcie specjalnym — średnia powierzchnia przejścia prądu), a — grubość płytki w cm (przy próbce o kształcie specjalnym — średnia długość drogi prądu w dielektryku).

2. Oporność powierzchniową mierzy się zapomocą elektrod nożowych, ukształtowanych jako przyrząd normalny

(rysunek). W szczególności odstęp między elektrodami wynosi 1 cm, długość ich jest równa 10 cm.

Pomiar odbywa się metodą techniczną przy pomocy czułego galwanometru. Napięcie probiercze — 1 000 V prądu stałego. Biegun od strony galwanometru jest uziemiony. Górna płyta przyrządu również musi być uziemiona.

Próbki muszą posiadać kształt płyt o gładkiej powierzchni. Wymiary — te same, co i dla pomiarów strat dielektrycznych. Ustawia się je na podstawie izolacyjnej.

Pomiar należy wykonywać w ciągu 10 min., mierząc prąd co 1 min. i wyznaczając krzywą zależności: $\sigma = f(t)$ z wzoru:

$$\sigma = \frac{10 U}{I} \Omega,$$

gdzie: U — napięcie w woltach, I — prąd w amperach. Wrazie nieustalenia się prądu pomiar należy przedłużyć do 30 min.

3. Oporność wewnętrzną należy mierzyć pomiędzy 2 elektrodami metodą techniczną. Napięcie probiercze wynosi 1 000 V prądu stałego. Czas pomiaru — 10 min. od chwili włączenia napięcia. Próbki — dowolnego kształtu. Elektrody stosuje się dwojakiemu rodzajowi:

a) Elektrody wtyczkowe. Nadają się do materiałów miękkich, elastycznych, dla płyt cienkich. Osadza się dwie wtyczki lekkostojkowe, ukształtowane według rysunku (rys. 15) w odpowiednich otworach, wywierconych w badanym materiale przy odstępach osi, równym 15 mm. Średnica wtyczki dla płyt wynosi 5 mm, dla rur i prętów — 2 mm.

b) Elektrody rtęciowe. Nadają się szczególnie dla materiałów twardych. Wierci się w materiale przy odstępach osi równym 15 mm dwa otwory o średnicy 5 mm. Głębokość otworów powinna wynosić około 2/3 grubości płytki, nie więcej jednak, niż 10 mm. Otwory wypełnia się rtęcią w ten sposób, by nie sięgała brzołu o 1 mm.

W protokole należy podać rodzaj zastosowanych elektrod.

Wszelkie kwestje, nieomówione w powyższym projekcie przepisów pomiaru oporności, należy ująć w przepisach szczegółowych dla każdego rodzaju materiału izolacyjnego, w szczególności: jakim próbom ma być poddany, ilość próbek i pomiarów, przygotowanie próbki, temperatura badania i t. d.

Wykaz literatury.

1. Electrical Insulating Materials. Monkhouse. London — 1926.
2. Measurement of Insulating Materials. Bureau of Standards. Washington — 1923.
3. VDE — Vorschriftenbuch. 1933.
4. Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. H. Schering. Berlin — 1927.
5. Ueber Elektroden für die Zwecke der Prüfung fester Isolierstoffe. G. Pfestorf. ETZ — 1930. S. 275.
6. Die Materialprüfung der Isolierstoffe der Elektrotechnik. W. Demuth. Berlin 1928.

BADANIE IZOLATORÓW LINJOWYCH NISKIEGO NAPIĘCIA

Inż. J. I. Skowroński.

Streszczenie. Autor omawia krytycznie niektóre wymagania przepisów na izolatory niskiego napięcia prądu silnego i słabego, opierając się na badaniach własnych, przeprowadzonych w Lab. Wysokich Napięć Pol. Warsz., oraz na rozważeniu czynników, jakim podlega izolator przy wyrobie i w czasie pracy.

WYMAGANIA ELEKTRYCZNE.

1. Uwagi wstępne.

Wymagania elektryczne w stosunku do izolatorów niskiego napięcia prądu silnego nie są wygórowane: wytrzymałość elektryczna jest z dużym zapasem pokryta przez wymagania mechaniczne, a upływność izolatorów praktycznie nie gra roli nawet w rozległych sieciach, zwłaszcza jeżeli izolatory nie pokrywają się trwale osadami przewodzącymi. Dlatego też dobrą pracę izolatorów tych zapewnia pewna minimalna droga upływu, osłonięta od opadów atmosferycznych, i kształt, zapewniający łatwe samoczyszczenie się pod wpływem deszczu i wiatru. Próby elektryczne pospolite, jakim zaleca się poddawać pewien procent tych izolatorów (PNE-32), mają na celu wykrycie ewentualnych grubszych usterek wewnątrz masy, których nie można wykryć przez oględziny.

Inaczej się rzecz ma z izolatorami teletechnicznymi. Tutaj, wobec niewielkiej energii przesyłanej, znaczenie upływności linii jest ogromne. Toteż na izolacyjność tych izolatorów musi być zwrócona wielka uwaga zarówno przy projektowaniu, jak próbie typu, czy próbie wyrobu izolatorów.

O jakości izolatora teletechnicznego decyduje znacznie więcej jakość materiału izolacyjnego, niż kształt samego izolatora, na co, niestety, zwraca się dotychczas zbyt małą uwagę we wszelkich przepisach. Prosty rachunek wykazuje, że np. przez powiększenie wszystkich wymiarów izolatora nie zyskuje się na własnościach elektrycznych, nawet przeciwnie, traci się nieco, podczas gdy przewodności różnych mas szklanych — w granicach praktycznych — mogą się różnić kilkasetkrotnie. Jako przykład, rozpatrzmy izolator teletechniczny uproszczony schematycznie. Prze-

oraz dla półkuli

$$R_k = \int_{r_1}^{r_2} \rho \frac{dr_x}{2\pi r_x l} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2}$$

Dla płaskiej główki i wnęki można rozpatrywać odpowiednią część izolatora jako stożek ścięty (rys. 2); oporność tej części izolacji wyniesie

$$R_{st} = \frac{2\rho}{\pi} \cdot \frac{r_1^2 + r_2^2}{a}$$

Jeżeli założymy, że ρ pozostaje stałe, to przez powiększenie k -krotnie izolatora (z zachowaniem stosunku jego wymiarów) oporność skrośna we wszystkich trzech wypadkach, jak się łatwo przekonać, zmaleje k -krotnie, t. j.

$$R_w' = R_w \cdot \frac{1}{k}, \text{ i t. d.}$$

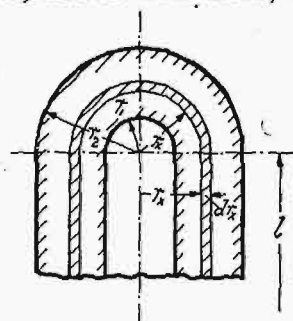
Możnaby dowieść, że dla każdego kształtu obrotowego zachodzi ten sam stosunek.

Z przewodnością powierzchniową rzecz się ma cokolwiek odmiennie. Dla przykładu weźmiemy powierzchnię izolatora teletechnicznego. Można ją z dużym przybliżeniem rozpatrywać jako cztery powierzchnie walcowe o średnicach d_1, d_2, d_3, d_4 i o długościach l_1, l_2, l_3, l_4 . Obrzeża kloszy i dno wnęki dla uproszczenia pomijamy, rozumowanie zresztą dla nich byłoby takie samo. Oporność powierzchniowa izolatora wyrazi się wtedy wzorem

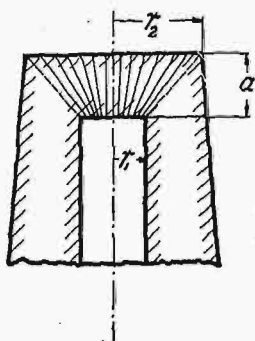
$$R_p = \sum \xi \frac{l_n}{\pi d_n} \quad \dots \dots \dots (4)$$

gdzie ξ jest opornością powierzchniową jednostkową $\Omega \text{ cm/cm}$

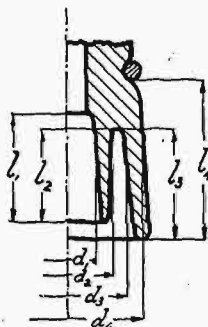
Jeżeli założymy, że ξ pozostaje stałe niezależnie od wymiarów i nałożenia pola, co jest słuszne w pewnych granicach, to widzimy tu, że z powiększeniem k -krotnym wszystkich wymiarów izolatora oporność powierzchniowa pozostanie bez zmiany. Zjawisko to zachodzi bez względu na kształt izolatora, o ile bowiem wzrasta długość drogi upływu, o tyleż rośnie jej szerokość — stosunek zaś pozostaje bez zmiany. Zmiana oporności całkowitej izolatora przy k -krotnym wzroście jego wymiarów zależy od stosunku obu oporności częściowych, naogół jednak maleje



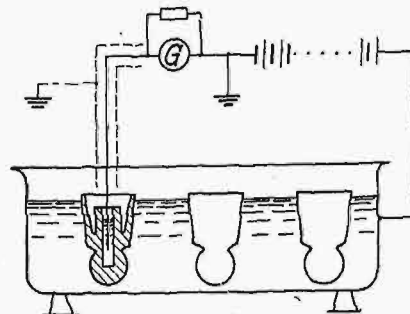
Rys. 1.
Schemat izolatora
z główką okrągłą.



Rys. 2.
Schemat izolatora
z główką płaską.



Rys. 3.
Przekrój kloszy izolatora
teletechnicznego.



Rys. 4.
Pomiar izolacyjności
według PNT-400 i 404.

wodzenie skrośne zachodzi od walcowego trzona przez główkę do dobrze przewodzącej (np. mokrej) powierzchni; wnęka ma zakończenie kuliste.

Oporność skrośna dla walca wyniesie:

$$R_w = \int_{r_1}^{r_2} \rho \frac{dr_x}{2\pi r_x l} = \frac{\rho}{2\pi} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{1}{l} \quad \dots \dots (1)$$

(dla $k > 1$). Np. dla $R_p = R_s$, t. j. kiedy oporności powierzchniowa i skrośna małego izolatora są równe sobie, oporność całkowita izolatora k razy większego, jak się łatwo przekonać, będzie mniejsza $\frac{1+k}{2}$ razy i t. d.

Wnioski te naogół potwierdza pomiar. Oczywiście, oporność powierzchniowa „czysta” R_p nie daje się zmierzyć,

natomiast zmierzyć możemy oporność całkowitą R_c i oporność skrośną R_s (metodą niżej wskazaną); oporność powierzchniowa obliczyć się da wtedy jako

$$R_p = \frac{R_c R_s}{R_s - R_c} \dots \dots \dots (5)$$

I tak np. poniższa tabelka zawiera wyniki pomiarów dla dwóch izolatorów tego samego kształtu i tego samego wyrobu, ale różniących się wymiarami.

I z o l a t o r	Średnica wneki mm		Średnica szyjki mm	Wyso- kość mm	Długość wnęki mm	Grubość główki mm	R_s	R_c	R_p
	minim.	maks.					Oporność skrośna 16° C 10 ⁹ Ω	Oporność całkow. 16° C wilg. 57% 10 ⁹ Ω	Oporność powierz. oblicz. wg. (5) 10 ⁹ Ω
N. I. T. — I. S.	23,5	22	62	136	45	19	426	318	1250
N. I. T. — III. S.	15	14	39	85	31	11	595	406	1280
Stosunek I do III	1,57	1,57	1,58	1,6	1,45	1,72	1: 1,4	—	0,98 ≈ 1

Tak dalece idącą zgodność z teorią można uzyskać tylko dla izolatorów wykonanych z identycznie tej samej masy, a więc np. przy izolatorach szklanych — dla sztuk, wykonanych nie tylko ze szkła tego samego składu, ale i w tym samym czasie, gdyż nieznaczne zmiany domieszek (np. skutkiem rozpuszczania ścianek pieca lub wanny przez masę szklaną) już dają wyraźne zmiany własności elektrycznych. Dla izolatorów porcelanowych zgodność ta jest trudniejsza do uzyskania, gdyż wchodzi tu w grę kwestja różnic wypalenia mniejszych i większych sztuk izolatorów.

Jak widzimy, bardzo celowe jest poszukiwanie metody, pozwalającej ocenić jakość masy izolatorowej pod względem elektrycznym. Dochodzi tu jeszcze inny wzgląd: odporność na starzenie się wzgl. trwałość izolatorów. Sprawa tą zajmiemy się na innym miejscu.

Pomiar przewodności izolatorów przepisują normy M. P. i T. (PNT-400 i PNT-404, 1931). Według wskazówek tam podanych izolatory wstawia się główką na dół do wody zakwaszonej tak, aby obrzeża wystawały z niej na 2 cm. Obrzeża smaruje się wazeliną na wysokość 1 cm. Oporność mierzy się prądem stałym ok. 200 V met. odchylową pomiędzy wodą nazewnątrż izolatorów, a wodą nalaną do wneki.

Należy stwierdzić, że metoda powyższa nie przedstawia wartości, gdyż nie daje wyników pewnych, odtwarzalnych, ze względu na szereg czynników, zniekształcających pomiar i trudnych do uwzględnienia przy wskazanym wyżej sposobie postępowania. Nie mając zamiaru poddawania krytyce na tem miejscu ujęcia samej metody w przepisach powyższych, zajmiemy się tylko przydatnością wogóle pomiarów tą metodą wykonywanych.

Jak widać (rys. 4) pomiar ma dawać oporność całkowitą izolatora (skrośną i powierzchniową). Skrośna, pominiawszy wielką zmienność z temperaturą — nie zależy od przypadkowych czynników, natomiast powierzchniowa nie posiada praktycznie stałej określonej wartości, aczkolwiek jest ściśle zależna od materiału.

Przewodzenie powierzchniowe odbywa się przez zanieczyszczenia, głównie wilgoć na powierzchni dielektryku, teoretycznie więc nie powinnyby zależeć od materiału, a tylko od wilgotności otaczającego powietrza. Jednak nie wszystkie materiały posiadają jednakową zdolność przyciągania i zagęszczania (adsorbacji) cząstek pary wodnej na swej powierzchni, toteż warstewka wilgoci różni się bar-

dzo, zależnie od materiału. Dla materiałów tłustych, jak parafina, cerezyna, воск, kalafonia, lak — adsorbacja jest praktycznie równa zero, przewodność powierzchniowa zależy tu raczej od powierzchni zanieczyszczeń, które ze swej strony wilgoć mogą pochłaniać. Dla ciał „chudych” adsorbacja jest przy wilgotności 90% niejednakowa, kwarc lany np. tworzy na swej powierzchni warstewkę wilgoci 3. ÷ 6. 10⁻⁶ mm, przy zanieczyszczonej powierzchni warstewka ta wzrasta znacznie. Na szkło i porcelanie adsorbacja

jest znacznie większa, rzędu 100. 10⁻⁶ mm, przyczem oczyszczanie niewiele pomaga. Co więcej, przewodność właściwa tej warstewki jest znacznie (ok. 2000 razy) większa niż w przypadku kwarcu. Dzieje się to skutkiem częściowego rozpuszczania się alkalicznych składników szkła w chemicznie czystej wodzie i tworzenia dobrze przewodzącego elektrolitu, co nie zachodzi na kwarcu (1) — (6).

Wilgoć w ten sposób przyciągnięta i niejako unieruchomiona w roztworze na powierzchni szkła (lub szklawa na powierzchni porcelany) bardzo mocno się jej trzyma — trudno wysycha, tworząc powierzchnię przewodzącą. Prócz tego powoduje ona przy swem powstawaniu i znikaniu osiadanie i przystawanie do powierzchni izolatora nalotów kurzu, dymu i t. d., które z biegiem czasu tworzą na starych

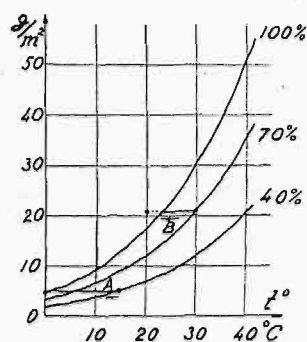


Rys. 5.
Izolatory porcelanowe z osadami, bardzo stare; lewy z telegrafu indoeuropejskiego (uzyskane z Dyr. Warsz. P. i T.).

izolatorach „patynę”, zmniejszającą również oporność powierzchniową (rys. 5). Przy zjawisku adsorbacji i rozpuszczania się częściowego szkła w wodzie zachodzi proces wietrzenia powierzchni. Rozpuszczaniu podlegają składniki alkaliczne, które albo spływają z deszczem, albo z dwutlenkiem węgla z atmosfery dają węglany również w rezultacie zmywane przez deszcz. W miarę wietrzenia powierzchnia staje się iryzowaną (opalizuje), a nawet może zupełnie zmatowieć. Samo zmatowienie nie jest szkodliwe elektrycznie, przeciwnie, oporność powierzchniowa wzrasta dzięki wylugowaniu części łatwiej rozpuszczalnych, zmniejszeniu adsorbacji i przez to polepszeniu powierzchni. Jednak matowa powierzchnia ułatwia trzymanie się na niej zanieczyszczeń, utrudnia samoczyszczenie się, czyszczenie sztuczne i schnięcie izolatorów.

Adsorpcja występuje tem silniej, im bardziej szkło jest rozpuszczalne, a rozpuszczalność, ogólnie biorąc, jest tem większa, im więcej szkło zawiera alkaliów w stosunku do krzemionki (SiO_2) — nie jest więc jednakowa dla wszystkich rodzajów szkła. Ponieważ cecha ta decydującą rolę gra w zachowaniu się izolatorów (przewodność powierzchniowa i starzenie się), powinna być wzięta za podstawę przy ocenie szkielek izolatorowych, czego dotychczas nie ma w żadnych przepisach. Sprawy tej dla braku miejsca nie możemy tu szerzej omówić.

Warstwa wilgoci, powstająca na powierzchni dielektryku, nie jest zależna tylko od składu ciała i wilgotności



Rys. 6.

Zawartość pary wodnej w powietrzu w funkcji temperatury przy stałym ciśnieniu.

otaczającego powietrza wzgl. ciśnienia pary wodnej, lecz prócz tego zależy od zmian, jakie zachodzą w temperaturze i wilgotności powietrza, i od różnicy temperatur pomiędzy dielektrykiem i powietrzem. Zachodzi tu znane zjawisko fizyczne, że ciało, znajdujące się w powietrzu o innej od niego temperaturze, wytwarza przy swej powierzchni stan wilgotności powietrza, odpowiadający temperaturze swej powierzchni. A więc ciała zimniejsze od powietrza — zwiększają wilgotność przy swej powierzchni, cieplejsze — zmniejszają.

Im większa pojemność i przewodność cieplna ciała, tem silniej to zjawisko występuje. Przykład podany jest na rys. 6, gdzie uwidocznione są typowe zjawiska, jakie mogą zachodzić przy podobnych pomiarach w zimie i w lecie. W pierwszym przypadku A, kiedy np. zimny izolator wniesiony będzie do pracowni,



Rys. 7.

Wzory badanych izolatorów:

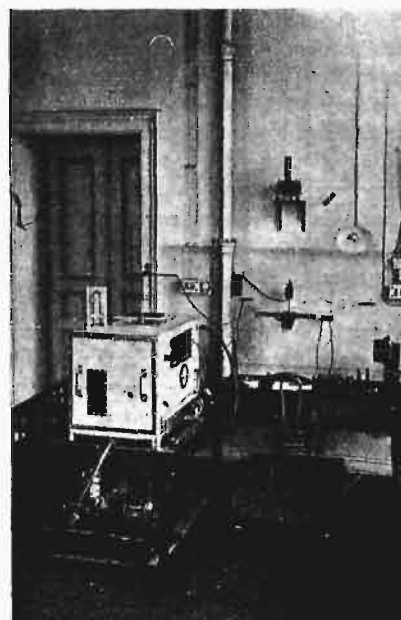
1. Francuski P. T. T.
2. i 4. Stary typ teletechniczny Nr. 1 i Nr. 3, szkło białe,
3. jak 2, szkło półbiałe,
5. jak 3 lecz matowany.
6. i 7. Nowy typ N. I. T. 1 i 3, szkło półbiałe,
8. jak 6, szkło brudne,
9. jak 6, szkło alkaliczne,
10. jak 9, lecz matowy.

w której panuje temperatura ok. 15°C i wilgotność 40%. W drugim przypadku na izolator w pracowni (20°C) powiewa np. przez otwarte okno ciepłe, ale wilgotne powietrze. Ponieważ ilość pary wodnej w powietrzu pozostaje w danym momencie bez zmiany, przy powierzchni izolatora zmieni się nasycenie, to jest wilgotność względna powietrza, która — zależnie od warunków początkowych — może przekroczyć 100%, to jest wilgoć skropi się na powierzchni. W rzeczywistości skroplenie nastąpi nawet wcześniej, ze względu na to, że ciśnienie pary wodnej nasyczonej nad roztworami soli jest mniejsze, a wilgoć, osiadająca na powierzchni izolatora, wytwarza właściwie roztwory. Widzimy, że w naszym przykładzie łatwiejsze jest po-

wstanie rosy w lecie, niż w zimie, kiedy powietrze jest naogół suchsze, zwłaszcza w pokoju.

2. Pomiary metodą M. P. i T.

Wstępne pomiary przewodności izolatorów zostały przeprowadzone metodą M. P. T. W celu uniknięcia wpływów postronnych izolatory wraz z wanną wstawiono do termo-higrostatu. Wilgotność była mierzona higrografem i higrometrem włosowym. Do pomiaru wzięto 16 szt. izolatorów teletechnicznych wielkości Nr. 1, ale różnego pochodzenia i jakości — od wzorowych, do zupełnie złych, specjalnie w tym celu wykonanych przez hutę J. Stolle „Niemen” ze szkła niewygotowanego lub o specjalnym składzie (alkaliczne). Dwa izolatory były uprzednio całkowicie zmatowane na kąpieli fluorowodowej w celu otrzymania izolatorów pseudo-zestarzonych. Część izolatorów miała obrzeża pokryte wazeliną (w myśl przepisów). Kilka sztuk przed wstawieniem do termostatu przebywało na mrozie. Pierwszy pomiar, przeprowadzony po upływie ok. 2-ch godzin od wstawienia izolatorów do wody, przy temperaturze



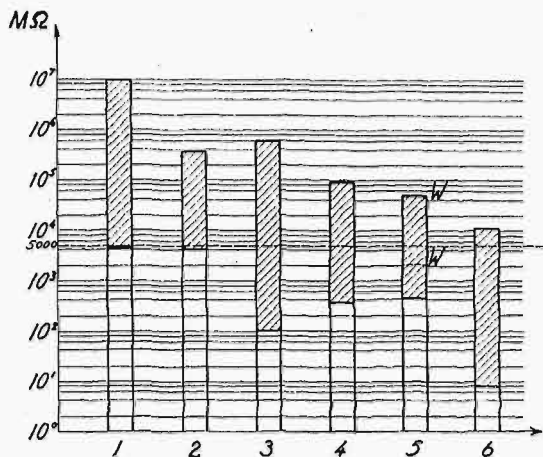
Rys. 8.

Urządzenia pomiarowe.

14°C i wilg. wzgl. 35%, daje wielkie różnice — stosunku 1:1000 dla różnych izolatorów. Najniższe wartości dają oczywiście izolatory ze złego szkła, wstawione z mrozu do termostatu: $1,6 \cdot 10^3 \text{ M}\Omega$. Wazelinowanie obrzeży niezawsze podwyższa wartość oporności: przy niektórych sztukach prawdopodobnie wilgoć na szkło zostaje pokryta wazeliną i nie może wyparować. Izolatory matowane wykazały nieco większą oporność, niż gładkie, czego można było spodziewać się zgodnie z wywodami poprzednimi. Po upływie doby, przyczem w czasie nocy temperatura obniżyła się do 9°C, a wilgotność wzrosła do ok. 45%, rozpiętość pomiędzy wartościami oporności wzrosła. Dla najwyższego gatunku szkła (francuskiego) otrzymano $10^{12} \Omega$ (dokładny pomiar tą metodą niemożliwy), dla szkielek izolatorowych przeciętnych — 200 do 500 tysięcy megonów, dla złych zupełnie 2 do 12 tys. meg. Pozostałe — w granicach 15 do 100 tys. megonów. Matowy z dobrego szkła — utrzymuje swoją nad gładkimi wyższość, natomiast taki sam ze szkła alkalicznego — obniża swą oporność do 1300 MΩ. Wazelinowanie naogół podwyższa oporność złych izolatorów, a obniża oporność

dobrych, zaciera więc różnice między lepszymi i gorszymi. Poza to, jeżeli woda dotykała przypadkowo części wazelinowanej, galvanometr zachowywał się przy pomiarze niespokojnie, nie ustalając się na jednym wskazaniu.

W przeciągu szeregu dni, nie wyjmując izolatorów z wody, dokonywano pomiarów przy zmianach wilgotności w termostacie od ok. 30 do 100%, przy stałej temperaturze i przy niedużych zmianach temperatury (od 8 do 30° C), przy nieruchomym powietrzu wewnątrz termostatu i przy mieszaniu za pomocą wbudowanego w jego ścianę wentylatora, — wreszcie przy przedmuchiowaniu otwartego termostatu wentylatorem, umieszczonym na zewnątrz.



Rys. 9.
Granice oporności całkowitej (zakresowane) różnych izolatorów szklanych przy temperaturze 16° do 17° C i przy zmianach wilgotności od 33 do 100%.

1. Francuski P. T. T.
2. Teletechniczny, szkło półbiałe (zwykłe izolatorowe),
3. j. w. lecz matowany,
4. N. I. T-1, szkło brudne (niewygotowane),
5. N. I. T-1, szkło alkaliczne (W-W—wazelinowany),
6. j. w., lecz matowany.

Wyniki tych pomiarów są w zupełnej zgodzie z rozważaniami podanymi wyżej. A więc: oporność powierzchniowa (gdyż ona tu przeważa) zależy od większej lub mniejszej tendencji pary wodnej do zagęszczania się na powierzchni izolatora, zależy więc nietylko od wilgotności powietrza (wzgl. ciśnienia pary wodnej), ile od stanu samej powierzchni i od kierunku zmian wilgotności i temperatury otoczenia. Izolatory o powierzchni gładkiej, z masy twardej, trudnorozpuszczalnej, ze wzrostem wilgotności wykazują zawsze wartości wyższe od izolatorów matowych, chropowatych oraz wykonanych ze szkła miękkiego, łatwiej rozpuszczalnego; a przytem szybciej od tych ostatnich powracają do pierwotnych wyższych wartości oporności przy spadku wilgotności lub przy przewiewie powietrza.

Jednak rozpiętość wartości uzyskanych w różnych warunkach wilgotności (przy tej samej temperaturze) jest olbrzymia; rzędu 1:3000 (p. rys. 9).

Obecność wody wewnątrz i wokół izolatorów zupełnie uniemożliwia dokładny pomiar i określenie jego warunków, gdyż zachodzą lokalne zmiany wilgotności wskutek parowania i przez bezpośrednią adhezję wody wzdłuż powierzchni izolatorów dzięki zjawisku włoskowatości (menisk wklęsły). Zjawisko ostatnie — zwilżanie powierzchni przez wodę z wnętrza i naczyń — odwraca stosunek rzeczywisty oporności powierzchniowej izolatorów małych i dużych. Szybkość zwilżania i wysokość wznoszenia się wody wzdłuż powierzchni nie zależy od wielkości izolatora, a więc dla

izolatorów mniejszych, mających krótszą drogę upływu, wilgoć pełzająca łatwiej i prędzej dokonywa połączenia obu biegunów. Zjawisku temu zawdzięczać należy, że według przepisów PNT-400 i 404 izolatory mniejsze mają mieć mniejszą oporność. W rzeczywistości przy pracy izolatory nie stykają się nigdy z powierzchnią wody, a tylko z kropelkami wody deszczowej, zwilżającymi całą zewnętrzną powierzchnię — jednakowo dla dużych i małych izolatorów.

Nalanie na powierzchnię wody płynu izolującego, np. oleju transformatorowego, pomaga znacznie, ale olej sam zwilża powierzchnię izolatora i przez to oczywiście zniesztalca zjawisko przewodzenia powierzchniowego.

Pomiary więc tą metodą — w celach odbiorczych zwłaszcza — dawać muszą wyniki zawodne: izolatory najlepsze mogą się okazać poniżej normy wymaganej, gdy znowu najgorsze w warunkach przeciętnych znacznie ją przewyższają (p. rys. 9). Należy też zauważyć, że metoda ta, aczkolwiek spotyka się jeszcze w niektórych przepisach lub podręcznikach (3), lecz naogół jest zarzucana (6).

3. Pomiary nową metodą.

Z poprzedniego widzimy, że metodą poprzednią nie można uzyskać wyników nawet w przybliżeniu wiarygodnych. W celu umożliwienia dokładnych pomiarów opracowano poniższą metodę (rys. 10). Elektrody stanowi rtęć, dzięki czemu unika się największego źródła błędów metody poprzedniej. Poza to układ podany umożliwia pomiar samej oporności skrośnej izolatorów, a po usunięciu połączenia a z ziemią, które odprowadza poza galvanometr prądy upływu powierzchniowego, można dokonać pomiaru oporności całkowitej, skąd ze wzoru (5) da się obliczyć oporność powierzchniową. W ten sposób da się zbadać jakość materiału i jakość typu izolatora.

Zbadano przede wszystkim szereg czynników, mających wpływ przy pomiarze.

1) *Izolacja galvanometru i przyrządów pomocniczych* (bocznika, wyłączników) oraz dobre osłony od prądów błądzących, mają pierwszorzędne znaczenie zwłaszcza wobec stosowania napięcia wysokiego (1100 V). Wobec pomiarów jednocześnie tylko na jednym izolatorze, a więc niewielkich rozmiarach urządzenia, i nieobecności wody, izolację daje się bez większych trudności uzyskać.

2) *Wpływ czasu*. Ustalanie się prądu skrośnego zależy od rzędu oporności właściwej materiału. Dla oporności właściwych większych od $10^{16} \Omega$ (kwarc lany, najwyższe gatunki ebonitu) może dochodzić do kilku, nawet do kilkunastu godzin (7). Wobec stosunkowo znacznie mniejszych oporności właściwych czas ten wynosił dla najwyższych oporności do 3, a nawet 5 minut (powyżej 5 minut zmiany były minimalne), dla najgorszych izolatorów ($10^8 \Omega$) nie przekraczał pół minuty. Przeciętnie wynosił $1,5 \div 2$ minuty.

3) *Wpływ napięcia*. Najlepsze warunki pomiaru zachodzą przy największych wychyleniach wskaźnika, a więc przy możliwie wysokim napięciu. Wpływ napięcia na wartość uzyskaną sprawdzony był na izolatorach o największej przewodności (rys. 11). Widzimy, że dla danych warunków oporności skrośna i powierzchniowa prawie nie zależą od wysokości napięcia, lekkie pochylenie należy raczej przypisać uchybom pomiaru, bowiem wpływu napięcia na wielkość oporności możnaby się spodziewać dopiero przy znacznie większych naprężeniach.

4) *Osłona od prądów powierzchniowych* w postaci pierścienka rtęci a (rys. 10) przy pomiarach oporności całkowitej nie była usuwana; powodowało to pewne zmniejszenie drogi upływu, a więc i oporności powierzchniowej.

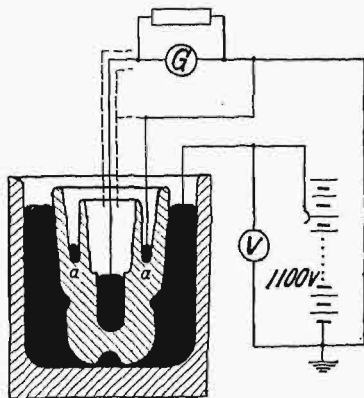
Dla oporności całkowitej zmniejszenie to wynosiło parę procent, co mogło być pominięte wobec stosunkowo dużego uchybu granicznego.

5) Wpływ przypadkowych zmian wilgotności w czasie pomiaru oporności powierzchniowej jest znacznie mniejszy niż przy poprzedniej metodzie, jednak jest bardzo wyraźny, np. oddech obserwatora już w odległości ok. pół metra daje znaczne zmiany; również prądy powietrzne w pokoju powodują uzyskiwanie różnych wy-

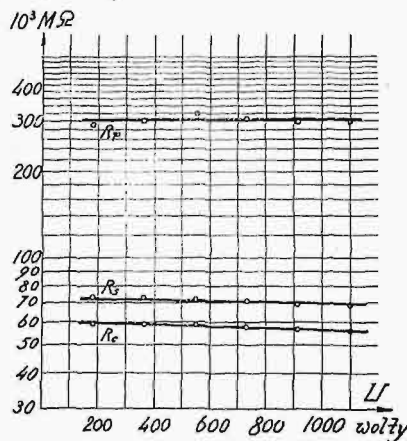
dy uciec się do pomiarów na próbkach masy izolatorowej, specjalnie wykonywanych. Do celów technicznych, np. odbiorczych, jest to jednak zbyt trudne.

PRÓBY MECHANICZNE.

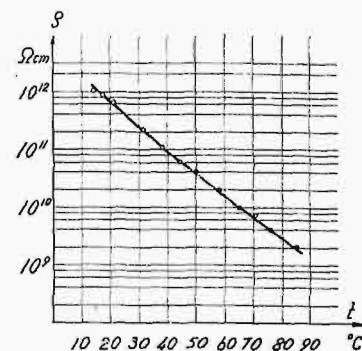
Isolator linowy stojący pracuje na słupie przelotowym praktycznie tylko pod obciążeniem siłą pionową wagi przewodu, ewent. sadzi. Siły te są stosunkowo niewiel-



Rys. 10.
Schemat pomiaru
oporności skrośnej izolatora.



Rys. 11.
Oporność izolatora w funkcji napięcia.



Rys. 12.
Wpływ temperatury na oporność
szkła (szkło pośledniej jakości).

ników przy pozornie tej samej wilgotności. Dlatego pomiary przewodności powierzchniowej należy uskutečniac w zamkniętym higrostatcie. Daje się zauważyć, że izolatory mniejsze są wrażliwsze na takie wpływy, jak np. na chuchnięcie; podobnie zachowują się izolatory ze szkła gorszego. Na oporność skrośną czynniki te oczywiście wpływu nie mają.

6) Wpływ temperatury jest ogromny na oba rodzaje oporności. Zależy on również w pewnym stopniu od materiału, dlatego też rozpatrzenie bliższe tej zależności wykracza poza granice artykułu niniejszego. Dla orientacji w charakterze zmienności podajemy przebieg oporności właściwej szkła (złego gatunku) w funkcji temperatury (rys. 12). Widzimy, że w granicach od 15° do 40° C oporność ta zmienia się dziesięciokrotnie, a więc najmniejsze zmiany temperatury odbijają się na wynikach.

Z powyższego względu uchyb graniczny metody jest duży i dochodzić może, zależnie od warunków pomiaru, do $\pm 10\%$.

Wnioski, jakie uzyskano z pomiarów powyższą metodą, można streścić jak następuje:

Daje się zauważyć związek pomiędzy opornością skrośną i powierzchniową: izolatory, mające większą oporność skrośną, mają też naogół większą oporność powierzchniową. Pozwala to ograniczyć się tylko do badania jednej oporności skrośnej.

Metoda pomiaru oporności skrośnej uniezależnia badanie od czynników przypadkowych, daje w wyniku jakość użytego materiału, może więc być wykonywana na niewielu sztukach z dużej partji.

Pozwala ona na większe zwrócenie uwagi na jakość masy izolatorowej, zwłaszcza szklanej, co dotychczas nie było robione, a dzięki czemu izolatory nasze jeszcze pozostawiają dużo do życzenia w porównaniu z obcymi (np. francuskimi).

Należy jednak dodać, że do pomiarów dokładniejszych metoda ta nie może mieć zastosowania. Należy wte-

kie przy izolatorach niskiego napięcia. Większe i niekorzystniejsze obciążenia występują na słupach odporowych lub narożnych, gdzie istnieje naciąg o przeważającej składowej poziomej. Stąd nasuwa się wniosek, aby izolatory linowe próbować mechanicznie przy tym właśnie rodzaju obciążenia. I rzeczywiście, przy próbie typu izolatorów stojących wysokiego napięcia dokonywa się takiej próby, ale na izolatorach kompletnie zmontowanych na trzonach, jak do pracy na linii. Przy izolatorach niskiego napięcia taka próba — w zasadzie również możliwa i słuszną — nie daje się łatwo przeprowadzić z następujących powodów. Przedewszystkiem, izolatory n. n. są dostarczane i odbierane zwykle bez trzonów, powtórne trzony do tych izolatorów mają wytrzymałość na zginanie znacznie mniejszą niż wytrzymałość izolatora (nawet słabszego), wreszcie, przy próbach na trzonach wzmocnionych decydującą rolę w próbie gra sposób osadzenia izolatora na trzonie. Niewielkie bowiem przekrzywienie się trzona we wnęce lub dotknięcie trzona do wnęki i nacisk bezpośredni na jej powierzchnię powoduje przedwczesne pęknięcie (rozsadzenie izolatora od środka). Próbuje temu zaradzić metoda, zalecona przez przepisy M. P. i T. (PNT-400 i 404 — 1931), według której izolator zamocowuje się w odpowiedniej ramie, np. przy pomocy jakiejś twardej zalewy, i obciąża się siłą, prostopadłą do osi izolatora, zapomocą linki, założonej na szyjkę (rys. 13).

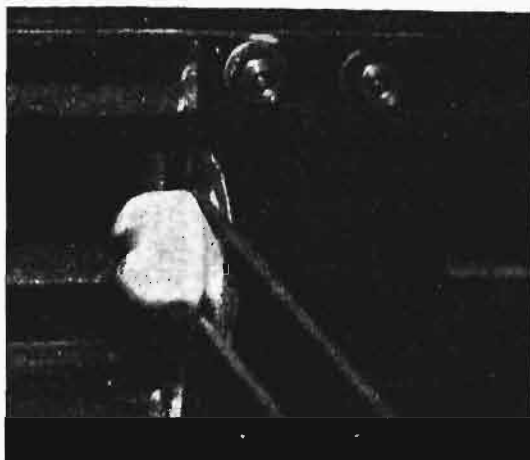
Dla największego izolatora siła wynosić ma 1200 kg, czas trwania 5 min. Wobec znormalizowania wymiarów, metoda ta ma dać niejako wytrzymałość materiału izolatora na ścinanie. Wydaje się więc słuszną w zasadzie, budzi jednak szereg zastrzeżeń co do swej celowości. Przedewszystkiem, co do zaleconego sposobu przeprowadzenia próby. Okazuje się, że wynik próby zależy od średnicy użytej linki. Próby przeprowadzone były na izolatorach porcelanowych typu NIT-I-P jednej firmy w liczbie 45 sztuk, przy użyciu linek średnicy 8, 7 i 6 mm (przepisy dopuszczają maks. 9 mm). Wyniki podaje rys. 14. Jako

sprawdzenie przeprowadzono dodatkowe porównania na poszczególnych izolatorach. Oto wyniki prób.

Izolator	Przy średn. linki	Po założeniu linki średnicy	
	6 mm	7 mm	8 mm
	wytrzymał kg	pękł przy kg	
1	2700	2450	—
2	2700	2000	—
3	2600	—	1650

i t. d.

Przyczyną tego jest odkształcanie się przekroju linki na eliptyczny pod wpływem zagięcia naokoło szyjki i obciążenia, dzięki czemu linka działa jak klin i przekrój szyjki naprężany jest bardzo niejednostajnie, z przewagą na-



Rys. 13a.

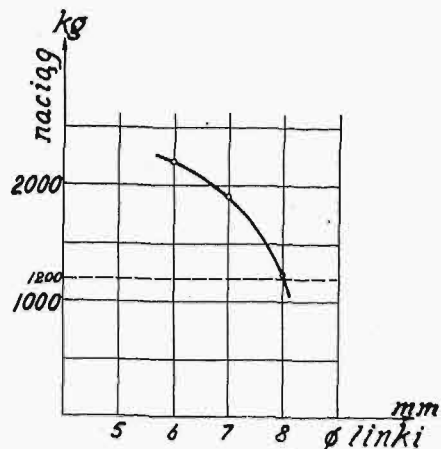


Rys. 13b.

Próba mechaniczna w/g PNT-440 i 404.

prężn rozciągających (rys. 15), na które materiały ceramiczne są mniej wytrzymałe. Stosowanie podkładek ołowianych nie pomaga. Można by, oczywiście, opracować tak tę próbę, aby usunąć czynniki zniekształcające, ale zachodzi pytanie, czy próba ta w zastosowaniu do izolatorów niskiego napięcia jest w ogóle wskazana, jako próba odbiorcza.

Dla porcelany w razie istnienia większych skaz w masie albo w razie złego wypalenia, próba mechaniczna dobrze przeprowadzona da wynik ujemny. Skład masy i inne czynniki, jak np. temperatura wypalenia, grające dużą rolę w wytrzymałości porcelany, dla typów niskiego napięcia mają mniejsze znaczenie. Owszem, potwierdza się tu zjawisko, stwierdzone przez autora na innym miejscu (8), że silniejsza witrifikacja (zeszklenie) masy pociąga za sobą obniżenie wytrzymałości mechanicznej, ale z jednej strony wytrzymałość mechaniczna nie gra tu ta-



Rys. 14.

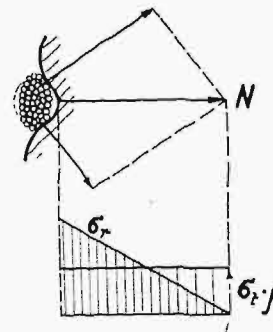
Wpływ średnicy linki na naciąg niszczący izolatora

N. I. T.-1 P.

Średn. 8 mm 1230 kg — średnia z 20 pomiarów,
Średn. 7 mm 1900 kg — średnia z 14 pomiarów,
Średn. 6 mm 2200 kg — średnia z 11 pomiarów.

kiej roli, jak przy zupełnie odmiennej budowie izolatorów wysokiego napięcia, a z drugiej strony niedopalenie lub przepalenie masy lub istnienie dziur wewnątrz stwierdzić można innymi łatwiejszymi drogami. Należy bowiem podkreślić, że próba mechaniczna jest próbą długą i kosztowną, zwłaszcza przy niewielkiej cenie izolatorów niskiego napięcia.

Tak więc stopień witrifikacji można oszacować przy pomocy próby fuksyną (obserwacja złomu), a niedopalenie — tą samą metodą lub próbą nasiąkalności, lub też — dla całych izolatorów — próbując izolatory napięciem 20÷30 kV, jak przy próbie pospółowej w. n. Próba ostatnia pozwala wykryć usterki wyrobu w główce (większe pęcherze, szczeliny) nawet zakryte polewą. Dlatego też została ona wprowadzona w normach na izolatory nisk. n. PNE-32, jako próba odbiorcza dla izolatorów porcelanowych, z pominięciem próby mechanicznej.



Rys. 15.

Działanie linki odkształcającej pod wpływem naciągu.

Szkoło izolatorowe, które wchodzi w grę w naszych warunkach — więc sodowo-wapniowe, — zmienia bardzo niewiele swe własności ze zmianą zawartości składników (K^r zmienia się najwyżej o 20% ze zmianą ilości CaO , Na_2O w szkłe). Wpływ domieszek innych tlenków, jakie w grę mogą wchodzić (głównie Al_2O_3 i Fe_2O_3), jest znikomy (9). Próby autora wykazały również, że izolatory, wykonane ze szkła brudnego, niewygotowanego oraz złe pod

względem elektrycznym, dawały przy próbie wg. PNT-400 te same wyniki, co izolatory dobre.

Usterki wewnątrz izolatora szklanego, mogące osłabić jego wytrzymałość (bąble, pęknięcia), są widoczne gołym okiem, a więc próba jest zbyt prosta. Żeby nie było przesady przy ocenie szkodliwości pęcherzyków w szkło, wykonane zostały pomiary wytrzymałości na rozierwanie na próbkach szkła izolatorowego (półbiałego) oraz na próbkach z tego samego szkła, ale ze znaczną ilością porów (rys. 17), prak-

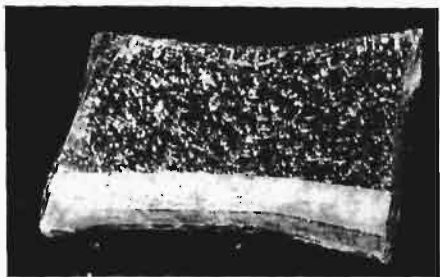


Rys. 16.

Próbka do badania wytrzymałości mechanicznej.
K. = 300 kg/cm².

tycznie nie spotykana. Okazuje się, że zmniejszenie wytrzymałości wynosi zaledwie ok. 23%, i to prawdopodobnie wcześniejsze zrywanie się próbek było spowodowane istnieniem skaz powierzchniowych — otwartych porów, które stają się ogniskiem pęknięcia całego przekroju. Nasuwa się wobec tego spostrzeżenie, że szczególną uwagę trzeba zwracać na stan powierzchni izolatorów szklanych, traktując przy oględzinach skazy zewnętrzne z większą surowością, niż wewnętrzne pęcherzyki, które przeważnie są bez znaczenia. To samo prawie znaczenie mają skazy zewnętrzne na wytrzymałość na zmiany temperatury.

Na wytrzymałość mechaniczną mają wpływ naprężenia wewnętrzne, powstałe skutkiem nierównego przechodzenia różnych części izolatora ze stanu plastycznego w stały, przy zbyt szybkim lub niejednostajnym stygnięciu. Cho-



Rys. 17.

Ułamek próbki ze szkła porowatego K. = 230 kg/cm²
(wielkość naturalna).

ciaż szkło „zahartowane”, posiadające duże naprężenia wewnętrzne, posiada też dużą wytrzymałość mechaniczną, jednak spodziewać się można, że izolator z dużymi naprężeniami wewnętrznymi łatwiej ulegnie zniszczeniu pod obciążeniem, niż izolator dobrze „odhartowany”, nie mówiąc już

o uderzeniach, — na które takie izolatory naprężone są bardzo wrażliwe. Ale do wykrycia tych naprężeń metody mechaniczne nie nadają się (p. n.).

Należałoby jednak zadać przedewszystkiem pytanie, czy warunki pracy izolatora rzeczywiście wymagają takich próby mechanicznej. Trzony izolatorów n. n. nie wytrzymują takich obciążeń, a więc nigdy na linii wystąpić nie mogą naciągi tak duże, jak wynika z wymiarów izo-

+ TŁUCZENIE IZOLATORÓW TELEFONICZNYCH NA SZOSACH.

Dyrekcja poczt i telegrafów stwierdziła, że corocznie skarby państwa ponosi znaczne straty przez rozmyślne tłuczenie szklanych i porcelanowych izolatorów na słupach telefonicznych. Szkody te wyrządzane są przeważnie przez dzieci i młodzież szkolną.

Władze pocztowe zwróciły się do władz szkolnych z prośbą o pouczenie młodzieży o stratach skarbu państwa, wynikających z tłuczenia izolatorów. Władze szkolne zarządziły w szkołach pogadanki, wyjaśniające młodzieży skutki wybryków.

Rys. 18.
Z prasy codziennej.

latora; zresztą najlepiej zwrócić się do praktyki i zapytać, czy zdarzają się wypadki urwania główki izolatora skutkiem większego naciągu, sady i t. p. Inne w rzeczywistości są powody uszkodzeń izolatorów na linii, — które, naszym zdaniem, należy nawet uwzględniać przy projek-



Rys. 19.

Izolatory postrzelane:

1. Stary typ Teletechniczny, jeden pocisk,
2. Stary typ Teletechniczny, dwa pociski
3. i 4. Nowy typ Teletechniczny, po jednym pocisku.

towaniu samego kształtu izolatorów (p. rys. 18). Możliwość tłuczenia izolatorów kamieniami lub nawet strzelania do nich przez bezmyślne lub złe jednostki wymaga zastanowienia przy opracowywaniu norm na izolatory. Kwestja ta była wzięta pod uwagę przy opracowywaniu typu izolatora n. n. prądu silnego (PNE-32) i kształt tych izolatorów, w zasadzie swej zbliżony do typu niemieckiego „N”, posiada budowę specjalnie wzmocnioną, zastosowaną przytem do charakteru materiału (szkło czy porcelana). Już w czasie montażu izolatory szklane tego typu zdążyły wykazać znaczną odporność na uderzenia, większą niż inne. Nie można powiedzieć tego o nowym typie izolatora szklanego teletechnicznego.

Próby przeprowadzono przy pomocy czynnika, na którego działanie, niestety, izolatory linjowe, jak wspomnieliśmy, bywają narażone — a mianowicie broni palnej. Rzucanie izolatorów lub rzucanie w nie kamieniami nie może być porównywalne. Strzelano z odległości ok. 5 m z pistoletu automatycznego kal. 6,3. Do izolatorów silnoprowodowych strzelano w kierunku pod klosz, pod kątem 30°÷60° do osi. Do izolatorów teletechnicznych — prawie poziomo

(surowsze warunki). Stwierdzono, że izolatory teletechniczne szklane starego typu są wytrzymalsze od nowych wedł. PNT-400 (rys. 19). Stwierdzono dalej celowość kształtu (po przeróbce) izolatora n. n. według PNE-32, w którym chociaż górny klosz daje się odstrzelić przy trafieniu w samą wnękę, ale izolator cały nie pęka, dolnego zaś klosza nie udało się odstrzelić. Pozatem próba wykazała równą odporność izolatorów porcelanowych i szklanych, a nawet pewną wyższość ostatnich, dzięki gładziej powierzchni i łatwiejszemu rekoszetowi pocisku.

Próby tego rodzaju nie dają coprawda liczbowego wyniku, ani oczywiście nie nadają się, na przykład, do prób odbiorczych, ale przy badaniach nad celowością budowy izolatora dają bardzo cenne i warte zastanowienia rezultaty.

ODPORNOŚĆ CIEPLNA.

Znanym zjawiskiem jest wrażliwość materiałów ceramicznych wogóle, a szkła w szczególności, na gwałtowne zmiany temperatury. Odporność na te zmiany zależy przede wszystkim od własności samego materiału, od wymiarów i kształtu ciała, od różnicy temperatur i przewodności cieplnej ośrodka, w jakim się ciało znajduje, a wreszcie nawet ma znaczenie kierunek wymiany ciepła, i t. d.

Zależność od własności ciała da się ująć wzorem Winkelmanna i Schotta jako współczynnik odporności cieplnej:

$$= \frac{K}{E\alpha} \sqrt{\frac{\lambda}{c\gamma}}$$

Gdzie K jest wytrzymałością na rozzerwanie,

E — współczynnikiem sprężystości,

α — współczynnikiem rozszerzalności,

λ — przewodnością cieplną,

c — ciepłem właściwym,

γ — ciężarem właściwym.

Największe znaczenie posiadają K i α . Ponieważ porcelana w porównaniu ze szkłem ma bardzo mały współczynnik rozszerzalności i K dosyć duże (przeciętnie 25—30% większe, niż dla szkła), to i odporność cieplną ma większą niż szkło. Jeżeli jeszcze uwzględnimy, że przedmioty małe są bardziej odporne na skoki temperatury, to możemy twierdzić, że próba cieplna jest zbyt cenna dla izolatorów porcelanowych niskiego napięcia. Potwierdza to zresztą w zupełności doświadczenie.

W przypadku szkła czynniki K i α mało zmieniają się ze składem masy w granicach praktycznych. Natomiast trzeci — współczynnik sprężystości E — zmienia się znacznie ze zmianą składników zasadniczych (9, str. 184 i n.), ale niestety w kierunku niepożądanym, a mianowicie maleje ze wzrostem zawartości tlenków sodu i obniżeniem tlenków wapnia, — co, jak wiemy skądinąd, jest dla własności elektrycznych niepożądane. Widzimy więc, że właściwie zmiana składu masy nie może być pomocna przy uzyskaniu dobrej odporności cieplnej. Większe wymiary powodują mniejszą odporność przedmiotu przede wszystkim ze względu na powolniejszą wymianę ciepła z otoczeniem i powstawanie dzięki temu większych spadków temperatury wewnątrz szkła oraz ze względu na łatwiejsze powstawanie naprężeń wewnętrznych przy krzepnięciu szkła. Kształt izolatora ma bardzo duże znaczenie. Wszelkie nagłe zmiany przekroju, ostre krzywizny i wręby, nierównomierne rozmieszczenie masy — powodują z jednej strony łatwiejsze powstawanie naprężeń wewnętrznych, a z drugiej zwiększają nierównomierność rozkładu temperatury, a więc w rezultacie dają większe naprężenia i łatwiejsze pękanie izolatorów. Zostało to stwierdzone przy projektowaniu izolatora niskiego napięcia, gdzie trochę za cienka szyjka w stosunku do korpusu powodowała odpadanie główek przy pró-

bie cieplnej. Po usunięciu tej usterki izolatory próbę tę wytrzymywały. Próba cieplna jest więc bardzo dobrą próbą typu. Jako próba wyrobu może ma nawet mniejsze znaczenie, gdyż — przy tym samym kształcie i tym samym charakterze masy szklanej — pękanie izolatorów powodowane jest istnieniem stałych naprężeń wewnętrznych, a te mogą być wykryte w inny łatwiejszy i pewniejszy sposób, mianowicie na drodze optycznej, przez obserwację w świetle spolaryzowanym (10). Szkło ma bowiem właściwość, że w razie istnienia w nim naprężeń, skręca płaszczyznę polaryzacji światła. Przepuszczając wszystkie izolatory przez bardzo prosto skonstruowany polaryskop, można wyeliminować wszystkie sztuki wadliwe.

Pozostaje kwestja ustalenia wysokości różnicy temperatur przy próbie. Tu nie można wymagać, aby różnica temperatur kąpeli była równa różnicy temperatur, jaka wogóle zachodzić może na linii, gdyż w rzeczywistości nigdy takie różnice nagłe nie występują, dzięki zaś dużej przewodności cieplnej szkła izolator szybko wyrównywa temperaturę z powietrzem. Pozatem próba jest dokonywana przez zanurzenie w wodzie, a więc w ośrodku o dużej przewodności cieplnej i dużem cieple właściwym, co znacznie zaostrza warunki. Tak np. użycie jako kąpeli oleju znacznie podwyższa wytrzymałwane granice temperatur. Pozostaje w rzeczywistości droga empiryczna: dobranie takiej granicy temperatur, jaką wytrzymują izolatory, które okazały się dobre. Tej zasady trzymano się np. przy opracowywaniu norm PNE-32. Doświadczenie wykazuje, że pękanie izolatorów szklanych na linii skutkiem czynników atmosferycznych nie daje się zauważyć, a więc nie należy przesadnych wymagań stawiać przy tych próbach.

Zakończenie.

Pomiary i badania laboratoryjne do referatu powyższego wykonane były w Zakładzie Miernictwa Elektrotechnicznego i Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej w latach 1931—33. Czuję się w miłym obowiązku złożyć na tem miejscu Kierownikowi tego Zakładu, p. prof. K. Drewnowskiemu, serdeczne podziękowanie za cenne rady i wskazówki w czasie całej pracy.

Firmie Huty Szklane J. Stolle „Niemen” należy się podziękowanie za bezinteresowne wykonywanie specjalnych zestawów szkła, próbek i izolatorów do badań powyższych.

Literatura.

- 1) H. Schering. Die Isolierstoffe der Elektrotechnik, Berlin, 1924.
- 2) L. T. Wilson. A study of telephone line insulators, A. I. E. E. Trans. Nr. 128, 1930.
- 3) Lunge-Berl. Chemisch-Technische Untersuchungsmethoden (1922), t. II.
- 4) L. Curtis. Sc. Pap. of the Bureau of Stand. Nr. 234, 8.VI. 1914, cyt. wg. Rev. Gen. E. t. X. Nr. 5, 1921.
- 5) M. M. Sawostjuk. Izsledowanie powierchnostnoj elektroprowodnosti izolatorow słabowo toka, Moskwa 1925.
- 6) W. Weicker. Abnahme-Prüfungen an Porzellan-Isolatoren, Arch. für Technisches Messen. T. 165, XII, 1933.
- 7) H. H. Race. Electric conduction in hard rubber, pyrex glass, fused and crystalline quartz. A. I. E. E. Trans. Nr. 66, 1928.
- 8) J. I. Skowroński. Influence de la porosité sur quelques propriétés de la porcelaine électrotechnique. Conf. I. Gr. R. E., 1931.
- 9) H. Thiene. Glas. Jena, 1931.
- 10) C. D. Spencer. Design and construction of polariscopes for use in glass factories. Journ. of the Am. Cer. Soc. 1931. Nr. 7.

W SPRAWIE PRÓBY WYTRZYMAŁOŚCI ELEKTRYCZNEJ W PROJEKCIE PRZEPISÓW NA OLEJE IZOLACYJNE S. E. P.

Inż. J. I. Skowroński.

Streszczenie. Przy opracowywaniu przepisów olejowych w łonie komisji V S.E.P. zaznaczyła się rozbieżność co do sposobu ujęcia wymagań elektrycznych. Dotyczy to nie tyle samego wymagania t. j. wytrzymałości elektrycznej (kV/cm), ile metody przeprowadzenia próby. W przepisach obcych — na których opierano się w braku dostatecznych doświadczeń własnych — istnieją zasadniczo dwa sposoby badania wytrzymałości elektrycznej: jeden, polegający na pomiarze napięcia przebicia określonej warstwy oleju (np. przepisy niemieckie) i drugi, polegający na stwierdzeniu, czy podobna warstwa oleju wytrzyma przez czas określony przepisane napięcie (przepisy szwajcarskie). W pierwotnym projekcie przepisana była metoda szwajcarska, jednak na terenie Komisji Olejowej wysunięto również propozycję odrzucenia tej metody jako rzekomo nieodtwarzalnej i zastąpienia jej metodą niemiecką. Poniższe uwagi mają na celu próbę wyjaśnienia, czy rzeczywiście metoda niemiecka jest odtwarzalna, a szwajcarska nie i która z nich bardziej nadaje się na próbę odbiorczą w przepisach polskich na oleje izolacyjne.

Określenie wytrzymałości elektrycznej, właściwej dla danego materiału, jest jednym z trudniejszych zagadnień przy badaniu materiałów izolacyjnych, ze względu na szereg nieuniknionych czynników, zniekształcających czystość teoretyczną zjawiska. Jak wiadomo, nawet dla materiałów gazowych, dla których pomiar wytrzymałości nie nastręcza teoretycznych trudności, nie można mówić o wytrzymałości elektrycznej jako o wielkości stałej, charakteryzującej ten materiał, gdyż wytrzymałość nawet w określonych i niezmiennych warunkach fizycznych (ciśnienie, temperatura) zależy przede wszystkim od charakteru pola elektrycznego, które działa na dielektryk badany. Przy materiałach płynnych sprawa ta komplikuje się o tyle, że nie tylko czynniki zewnętrzne wymagają uwzględnienia, ale i sam badany materiał w czasie przeprowadzania próby może ulegać wpływom i zmianom, trudnym do stwierdzenia lub usunięcia, a wprowadzającym dodatkowe błędy w pomiarze.

Wspomniane czynniki mogą być w zasadzie dwojakie: zależne od materiału lub jego stanu, oraz od niego niezależne, zewnętrzne. I jedno i drugie mogą mieć wpływ zarówno na wartość bezwzględną mierzonej wytrzymałości, jak i na rozśiew, czyli wielkość odchylenia w górę i w dół poszczególnych spostrzeżeń od wartości przeciętnej (uchyb spostrzeżenia). Nie sprawiałoby to większych trudności, gdyby wpływ wszystkich czynników zewnętrznych i wewnętrznych był dostatecznie znany (jak jest np. dla powietrza), tak, aby przepisać ściśle warunki można było przewidzieć *uchyb graniczny pomiaru*. Jest to *warunek konieczny* odtwarzalności i możliwości porównania pomiarów, wykonanych przez różnych obserwatorów lub w różnych pracowniach. Niestety, należy stwierdzić, że według dzisiejszego stanu badań w tej dziedzinie ani przyczyny otrzymywania rozbieżnych wyników lub dużego rozśiewu spostrzeżeń nie są dostatecznie wyjaśnione, ani niema zupełnej zgodności wśród rozmaitych badaczy co do wpływu nawet czynników najważniejszych. Wyniki bywają podobne co do charakteru lub przebiegu zjawiska, ale wartości liczbowe naogół znacznie się różnią.

Poniżej omówimy pokrótce wyniki kilku ważniejszych badań co do wpływu czynników na pomiar wytrzymałości oleju izolacyjnego.

Należy tu wymienić czynniki najważniejsze:

1. czystość oleju: obecność zawiesin, wilgoci i gazów rozpuszczonych w oleju,
2. związane z poprzednim: przechowywanie oleju przed próbą i obchodzenie się z nim w czasie próby,
3. czystość elektrod i naczyń,
4. temperatura i ciśnienie,
5. ilość oleju przy próbie i związana z nią,
6. liczba przebiegów,
7. kształt pola: odstęp, kształt i umieszczenie elektrod,
8. materiał elektrod,
9. szybkość podnoszenia napięcia,
10. odstęp czasu pomiędzy przebiegami,
11. kształt krzywej napięcia,
12. moc zwarcia układu probierczego.

Czystości przypisuje się zgodnie największe znaczenie dla wytrzymałości oleju. Aczkolwiek teoria przebicia oleju nie jest jeszcze ostatecznie ustalona (9), (11), wpływ zawiesin i wilgoci jest wyjaśniony, jeżeli chodzi o wpływ jakościowy (12), (18). Natomiast jeżeli przejść do wartości liczbowych czy do wytrzymałości (naprężenia krytycznego) czy rozśiewu, wyniki nie są zgodne. Dla olejów najczystszych i zupełnie suchych Friesse znajduje wytrzymałość 240 kV/cm (wart. skutk.), Zimmermann, Schröter, Engelhardt—ok. 330 kV/cm, Draeger—410 kV/cm. Do celów przepisowo - technicznych rozbieżność ta nie posiada większego znaczenia, gdyż dotyczy przede wszystkim olejów suchszych w sposób laboratoryjny, a z drugiej strony interesują nas tu raczej wartości przeciętne dobre i najniższe dopuszczalne. Natomiast znacznie ważniejsza jest kwestja rozśiewu spostrzeżeń, gdyż decyduje o odtwarzalności pomiarów, oraz wpływ ilościowy zanieczyszczeń, gdyż dopiero przy takim ujęciu możnaby z pomiaru wytrzymałości wnioskować o czystości oleju. I tu znów napotykamy się na rozbieżność. Tak np. według Friesse'go już obecność 0,05% wody w oleju zmniejsza wytrzymałość z 240 kV/cm na 22 kV/cm (a więc czyni go niezdadnym do pracy), podczas gdy Späth w warunkach podobnych, dla *tej samej* zawartości wody (0,05%), znajduje wytrzymałości 140 kV/cm — jak dla bardzo dobrego oleju. Pomimo wytknięcia tej rozbieżności przez Zimmermanna w 1925 r. (16) kwestja ta pozostała niewyjaśniona. Być może rozbieżność ta spowodowana była — jak zresztą przypuszcza Zimmermann — obecnością innych zanieczyszczeń, np. bardzo drobnych włókienek. Wpływy wilgoci i innych zanieczyszczeń są bowiem związane ze sobą. Np. badania w laboratorium A. S. E. w Zurychu miały wykazać, że wpływ wody w oleju jest minimalny przy zupełnej nieobecności zawiesin — przede wszystkim włókienek.

Wpływ *zanieczyszczeń stałych* był badany zwykle razem z wpływem innych czynników. Wöhr (22), badając wytrzymałość oleju przy pomocy elektrod kulkowych, płytkowych i elektrod z krawędziami ostrymi, stwierdził, że dla olejów brudnych wytrzymałość jest względnie wyższa przy ostatnich elektrodach, niż przy płaskich i kulkowych; w miarę zaś oczyszczania oleju wytrzymałość rośnie szybciej przy

kulkowych elektrodach, wolniej — przy płaskich, jeszcze wolniej — przy kańciastych, tak, że przy olejach czystych zachodzi zjawisko odwrotne i najwyższą wytrzymałość dają elektrody kulkowe, najniższą — z ostreimi krawędziami Spath (14), badając wpływ odstepu, znalazł istnienie wyraźnego minimum wytrzymałości dla olejów brudnych przy niewielkich odstępach, wzrost dla bardzo małych i większych odstępów, a dla czystych — ciągły spadek z rosnącym odstępem, bez minimum. Draeger (12) przy analogicznych badaniach zupełnie nie znajduje tego minimum, a krzywe dla olejów czystych są tylko w ogólnych zarysach zgodne z krzywami Spatha. To samo można powiedzieć i o innych badaniach wpływu odstepu i czystości na wytrzymałość (Wellauer (19), Miner (23), Rebhan (27) i inni).

To samo też mniej więcej dotyczy wszelkich funkcjonalnych zależności: przebiegi są zgodne tylko w ogólnych zarysach; np. maksimum wytrzymałości w zależności od temperatury Friesse znajduje przy 65°C, Spath — 60°C, Toriyama — 70°C, Draeger — 90°C, przyczem i odchylenie od maksimum do minimum (leżącego poniżej 0°C) jest znacznie większe u Friessego, niż np. u Toriyamy. Podobnie wpływ odstepu na wytrzymałość (kV/cm) inny jest według Spatha (powyżej 0,6 cm wytrzymałość jest stała), inny np. według Wellauera (bez zmiany już powyżej 0,2 cm) lub Mathisa (32) i t. d.

Cytujemy te rozbieżności — zresztą nie wszystkie — dla wykazania podstawowego zjawiska przy badaniu wytrzymałości olejów, a mianowicie trudnej odtwarzalności pomiarów. Na zjawisko to zwracano z wielu stron uwagę. Między innymi Steinmetz stwierdza, że próbki poszczególne z tej samej partii nie dają zgodnych wyników (28); Rebhan znajduje nawet różne wyniki, zależnie od dni, w których wykonywał pomiary (26). Przykłady podobne może zresztą dać każdy, kto wykonywał badania wytrzymałości olejów.

Wpływ zanieczyszczeń na rozsiew nie jest jednakowy według różnych badaczy. I tak Ritz (25) znajduje, że rozsiew mniejszy jest dla brudnego oleju i wzrasta z oczyszczaniem (a więc i ze wzrostem wytrzymałości). Odwrotnie Rebhan (26) znajduje, że rozsiew dla olejów brudnych wynosi średnio około 33%, a w miarę wzrostu czystości (i wytrzymałości) spada, i dla bardzo czystych wynosi około $\pm 20\%$. Schröter (13) dla olejów brudnych znalazł rozsiew około $\pm 50\%$, dla czystych — mniej, ale nie stwierdził zależności pomiędzy rozsiewem i wytrzymałością przeciętną. Steinmetz (28) zauważył również, że suchość i czystość oleju przy technicznym czyszczeniu mają mały wpływ na rozsiew.

Wpływ rozpuszczonego w oleju powietrza i gazów, wogóle wyraźnie zmniejszających wytrzymałość (8), (24), ma znaczenie nie tyle ze względu na wytrzymałość, ile ze względu na wpływ na rozsiew. Do kwestji tej powrócimy jeszcze niżej. Znaczący wpływ na wzrost rozsiewu i zmniejszenie wytrzymałości ma niedokładne wysuszenie elektrod (15).

Sposób czyszczenia oleju również wpływa nietylko na wytrzymałość, ale i na rozsiew, na co zwrócił uwagę Schröter (13). Stosując rozmaite sposoby czyszczenia i suszenia oleju, otrzymał on nietylko rozmaity wzrost wartości przeciętnej, ale i rozmaity rozsiew, przytem nie zawsze wzrost wytrzymałości związany był ze zmniejszeniem rozsiewu.

Ważnem, a zwykle nie branem pod uwagę, źródłem błędów jest kształt krzywej napięcia. Przy prądzie zmiennym przebiecie oleju zależy od wartości maksymalnej (amplitudy) napięcia przyłożonego, a nie zależy od wartości skutecznej (12). Wpływ wartości skutecznej zaznacza się dopiero w pobliżu punktu krzepnięcia, gdzie zaczyna przeważać przebiecie cieplne (29). Tymczasem zwykle mierzymy wartość skuteczną napięcia (np. woltomierzem) po stronie pierwotnej

transformatora; również wszystkie wartości liczbowe, podawane w wartościach skutecznych, ważne są dla napięcia ściśle sinusoidalnego, o współczynniku amplitudy $\sqrt{2}$. W rzeczywistości zaś prawie zawsze mamy krzywą odkształconą, i to nieraz znacznie, co się szczególnie zaznacza przy transformatorach o silnem nasyceniu żelaza, przy regulacji dławikiem, w pewnych przypadkach przy regulacji oporem. Współczynnik amplitudy może wynosić 1,6, a w niekorzystnych przypadkach i więcej. Błąd, popełniany wtedy przy mierzeniu wartości skutecznej zamiast maksymalnej, może wynosić do 14% i więcej, pomijając błędy skutkiem zmienności przekładni i inne.

Szybkość podnoszenia napięcia wywiera ogromny wpływ na wartość uzyskaną. Jest to zrozumiałe, skoro się zważy rolę, jaką odgrywają zanieczyszczenia w przebiegu, tworząc mostki przewodzące pomiędzy elektrodami, — oraz opór, jaki olej stawia przy ruchu tych zanieczyszczeń w postaci zawieszin naogół bardzo drobnych. Toriyama (18) stwierdził wzrost wytrzymałości powyżej 40% przy zwiększeniu szybkości podnoszenia napięcia od 1 kV/min do 1 kV/sek; przy większych szybkościach wzrost znalazł niewielki. Z pomiarów tych wnosićby można przedewszystkiem, że wartości, otrzymane metodą niemiecką, muszą być wyższe co najmniej o 40 — 50% od wymaganych przez przepisy szwajcarskie dla takiej samej czystości oleju. Zmiany wytrzymałości oleju skutkiem wpływu zetknięcia jego z powietrzem przez wymianę wilgoci (30), pochłanianie powietrza (10), (17), (26), możemy tu pominąć, ponieważ w zasadzie przy próbach można tego uniknąć.

Również możemy tu pominąć wpływ czynników takich, jak: wyładowania świetlące, częstotliwość, stratność, temperatura, ciśnienie, naświetlanie, metal elektrod, ich układ (pionowy czy poziomy) oraz kształt (kulowy, płaski czy inny) — chociaż bowiem wpływ czynników tych na wartości otrzymane i rozsiew może być mniej lub więcej znaczny, przy wyborze metody nie mają one znaczenia. Tylko co do promienia elektrod i wielkości przerwy iskrowej można zauważyć, że wytrzymałości olejów przy obu układach są prawie jednakowe (14), (19). Interesują nas tu więcej zmiany, jakim olej podlega w czasie próby, w miarę przebiegu. I tu nie ma zupełnej zgodności. Friesse znajduje, że olej czysty w miarę następujących po sobie przebiegów pogarsza się, a olej brudny lub zawilgocony polepsza się, zaczynając już od pierwszego przebiegu; podobnie — Engelhardt. Inni stwierdzają pewien wzrost wytrzymałości w miarę przebiegu, ale przy większej liczbie (Zimmermann, Wellauer i inni), nie jednakowej dla wszystkich. W każdym razie stwierdzić można, że właściwie już po pierwszym przebiegu próbka oleju zmienia swe własności (26), (17), (15). Następuje tu z jednej strony usuwanie wilgoci a częściowo i stałych zawieszin, z drugiej zaś — rozkład oleju na składniki gazowe i płynne, a częściowo nawet na stałe. Wpływ ten częściowo usuwają jedni przez mieszanie oleju bez wyjmowania elektrod (Wellauer), inni otrzymują lepsze wyniki przez wyjmowanie i czyszczenie elektrod po każdym przeskoku (Engelhardt).

Szybkość zmian oleju zależy nie tyle nawet od wielkości próbki, ile od mocy obwodu, na co naogół nie zwracają uwagi. Ilość rozłożonego oleju jest proporcjonalna do energii łuku przy przeskoku. Nie jest ona zależna tylko od oporności, włączonej w obwód iskiernika, ale od mocy zwarcia transformatora, sposobu regulacji, „sztywności” sieci i t. d. Naprzykład dla źródła napięcia o dużej mocy włączenie w obwód 60 000 omów, jak zalecają, w razie przebiecia przy 30 000 V daje moc rozwiniętą w obwodzie około 15 kW, a moc ta jest „wyłączana” przez łuk, zanim nie zostanie przerwany obwód, np. przez przepalenie bezpiecznika.

Tym też zjawiskom, towarzyszącym przeskokowi łuku w oleju, należy, zdaniem naszym, przypisać największą rolę w istnieniu znacznego rozsiewu przy pomiarach wytrzymałości olejów mineralnych. Następuje tam ścieranie się kilku czynników: pole elektryczne skupia zanieczyszczenia, przebiecie je częściowo usuwa — wyparowując wodę i wyrzucając mechanicznie dzięki wydmuchującemu działaniu łuku, — częściowo zaś wytwarza nowe zanieczyszczenia, niekoniecznie nawet w postaci spalin, również w postaci gazów lub węglowodorów płynnych o innej stałej dielektrycznej, niż reszta oleju, co już może obniżyć następne przebiecie. Wynik zależy wtedy od przypadku, który z czynników przeważa w najbliższym otoczeniu elektrod, i otrzymuje się większą lub mniejszą wartość przeskoku. Oczywiście „przypadki” można traktować statystycznie i obliczać wynik prawdopodobny, tylko liczba tych „rzutów kostką” czy — jak kto chce — pomiarów musi być duża, aby wzory z teorii prawdopodobieństwa mogły mieć zastosowanie. Należy dla ścisłości dodać że Hayden i Eddy, Wellauer oraz częściowo Rebhan przypisują istnienie rozsiewu właściwości samego oleju mineralnego.

Jakakolwiek byłaby przyczyna rozsiewu, sam fakt otrzymywania w najstaranniej przeprowadzonych badaniach wyników, różniących się od wartości przeciętnej od 20 do 30% (21), (26), to jest o 50 do 90% wartości skrajnych między sobą, czyni samą metodę praktycznie nieodtwarzalną, szczególnie przy wykonywaniu badań w różnym czasie lub w różnych pracowniach probierczych. Wydawałoby się, że można uwzględnić w przepisach wszystkie z wymienionych wyżej czynników, znormalizować naczynie, iskiernik, moc zwarcia transformatora, wielkość oporników regulacyjnych i ograniczających, szybkość podnoszenia napięcia, kształt krzywej napięcia, temperaturę i t. d., przepisać pozatem do najdrobniejszych szczegółów metodę postępowania i uzyskać przez to możliwość porównywania wyników różnych probierni. Otóż wydaje się nam, że tak nie jest. Pomijając bowiem trudności realizacji urządzeń identycznych w różnych warunkach miejscowych, pozostaną dwa czynniki: jeden subiektywny — eksperymentator, drugi obiektywny — właściwości oleju mineralnego. Czynnika ludzkiego przy tych badaniach lekceważyć nie można, jemu bowiem również przypisują częściowo rozbieżności rozmaitych obserwatorów (14), a przy badaniach przemysłowych, szczególnie u odbiorców, od umiejętności pracownika najwięcej zależy wynik.

Drugi czynnik zasadniczy, stanowiący trudność nie do ominięcia, to dawanie przez olej wartości przebiecia wręcz przypadkowych — gdyż za takie musimy przyjmować odchylenia około $\pm 30\%$ od średniej — szczególnie przy wykonywaniu tylko pięciu pomiarów. Przy pomiarach badawczych z wielokrotnym przebiciem oleju po kilkaset do tysiąca kilkuset razy (16, 19, 21, 26), można stwierdzić serje — po kilka z rzędu — przebiec niskich lub wysokich, dopiero średnia z bardzo wielu utrzymuje mniej więcej pewien poziom; a tymczasem już po pierwszym przebiciu olej może się zmieniać zależnie od warunków — pogarszać lub polepszać. Pomiar taki nie może być miarodajny, a obliczanie, jak proponuje Rebhan, wartości średniej i uchybu średniego wedle wzoru Gaussa z teorii błędów (wyprowadzonego w założeniu wielkiej liczby mało różniących się spostrzeżeń) oczywiście mija się z celem, nadając metodzie pozory dokładności, której ona mieć nie może.

Tytułem próby kontroli „czynnika ludzkiego” przeprowadzono w Lab. Wysokich Napięć Polit. Warsz. w r. 1933 szereg pomiarów na tych samych olejach (za każdym razem ze świeżą próbką) — przez 22 grupy słuchaczy, odrabiających ćwiczenia w pow. laboratorium (sem. VII), pod dozorem asystenta. Wykonywano przytem m. in. próbę wg. przepisów

niemieckich, według przepisów szwajcarskich oraz charakterystykę iskiernika o kulach 12,5 mm (napięcie przebiecia w funkcji odstępu). Stwierdzono różnice do 30% pomiędzy pomiarami poszczególnych obserwatorów dla tego samego oleju, chociaż poszczególne spostrzeżenia tych samych obserwatorów mniej się różniły od wartości przeciętnej. Charakterystyki iskiernika również znacznie się różniły między sobą, podczas gdy np. podobne charakterystyki iskierników w powietrzu są prawie identyczne. Próba metodą szwajcarską dawała zgodne wyniki, t. j. olej naogół próbę wytrzymywał, a próbki z pewną zawartością wilgoci dawały mniejszą lub większą liczbę przeskoku iskrowych.

Trudności uzyskania dokładnych porównywalnych i powtarzalnych wyników przy pomiarze wytrzymałości elektrycznej, aczkolwiek w zastosowaniu do materiałów stałych istnieją w znacznie mniejszej mierze, były już rozważane przy opracowywaniu norm PNE. I wszędzie konsekwentnie przy próbach odbiorczych przeprowadzono zasadę niedoprowadzenia do przebiecia zupełnego próbki, a tylko wymagania *wytrzymania* przez tę próbkę określonego napięcia przez czas określony (kable PNE-5, przewody izolowane PNE-5, izolatory PNE-8, izolatory niskiego napięcia PNE-32, masy kablowe PNE-16); ostatnie, t. j. masy, są najbardziej zbliżone w charakterze badania do olejów, gdyż tu również bada się próbkę materiału nie przedmiot gotowy do pracy. Ale i w innych przypadkach bynajmniej nie było to spowodowane chęcią zaoszczędzenia obiektu badania, gdyż i tak np. odcinek kabla badany (pięciokrotnym napięciem, męczony mechanicznie) już się najzupełniej do pracy nie nadaje. Zato we wszystkich cytowanych wypadkach pozostawia się *wytwórcy* badanie napięcia przebiecia dla swego wyrobu (np. określenie krzywej życia dla kabli, przebiecie w oleju izolatorów), gdyż to daje mu możliwość ciągłej kontroli jakości wyrobu. Wprowadzenie więc do przepisów odbiorczych przebijania oleju

1. nie miałoby uzasadnienia przy stanie dzisiejszej wiedzy,
2. mijałoby się z celem — jako mogące prowadzić do błędnych lub rozbieżnych wyników,
3. nie szłoby po linii dotychczasowych przepisów S. E. P.

Natomiast istnieją przypadki, gdzie wykonywanie próby przebiecia oleju może być wskazane. Stałe pomiary wytrzymałości elektrycznej, jako sprawdzianu czystości, mogą i powinny być wykonywane przez wytwórców lub przez spóżywców (np. w trakcie czyszczenia oleju) z zastrzeżeniem, że badania te będą wykonywane bardzo starannie, zawsze w tych samych warunkach, przy pomocy tych samych przyrządów i — najlepiej — przez ten sam personel fachowy. Wtedy — uwzględnivszy uchyby spostrzeżeń — będą mogły pomiary te być wskazówką dla porównania czystości oleju, ale miara ta będzie zawsze miarą względną, porównanie z innymi badaniami będzie zawodne.

Czy metoda szwajcarska nie posiada usterek i czy jest zupełnie odtwarzalna? Oczywiście, że usterki są — np. trudność mycia naczyń z elektrodami, możliwość przenikania zanieczyszczeń z uszczelnienia elektrod w ściankach; te same jednak są w przyrządach nowego typu według norm V. D. E.

Co do odtwarzalności, to również może się zdarzyć, że jedna próbka wytrzyma próbę, inna nie. Jest to nieuniknione dla oleju *niezbyt czystego* i związane z charakterem oleju — jako mieszaniny, która w różnych częściach może zawierać zanieczyszczenia lub składniki w rozmaity sposób rozmieszczone. Dla olejów czystych wynik ujemny może być spowodowany niedbałym postępowaniem przy

próbie, złem przechowywaniem lub pobieraniem próbki, co musimy wykluczyć z rozważań. Niezupełnie staranne oczyszczenie i wysuszenie elektrod, np. wytarcie szmatką, daje przy próbie, zdaniem Engelhardta (15), wyładowania niezupełne (trzaski), które są przez przepisy tolerowane.

Natomiast zalety metody szwajcarskiej — pominąwszy omówioną już słuszną zasadę niedoprowadzania do przebicia — wynikają przede wszystkim z *długiego czasu próby*, dzięki czemu zanieczyszczenia, o ile istnieją, mają czas z odleglejszych części próbki przywędrować do miejsc o największym natężeniu pola i spowodować przebicie. Sprzyja temu również większy odstęp elektrod i mały ich promień krzywizny ($a = 5$ mm, $r = 6,25$ mm), ułatwiające wędrowkę i skupianie się zanieczyszczeń w pobliżu przerwy iskrowej dzięki dużej niejednostajności pola. Wędrowkę taką, nawet dosyć szybką można zaobserwować już przy względnie niewysokich napięciach na cząsteczkach, dostrzegalnych gołym okiem; dla cząstek drobniejszych, dzięki mniejszym siłom w stosunku do oporów, musi być dany czas i natężenie pola dostateczne. Mały promień krzywizny elektrod umożliwia przy względnie *mniejszym* napięciu uzyskanie większego natężenia pomimo większego odstępu. Wreszcie duży odstęp pozwala na dokładniejsze nastawienie, a więc zmniejsza jedno ze źródeł uchybu pomiarów. Wytrzymałość (kV/cm) jest przytem prawie bez zmiany (dla 5 mm tyle, co i dla 3 mm). Dla dobrze oczyszczonych olejów o wysokiej wytrzymałości i dla niezdatnych do pracy bez oczyszczenia metoda szwajcarska jest więc *miarodajna i odtwarzalna*. Nie stwarza przytem pozorów dokładności, jak metoda niemiecka. Cechuje ją prostota i łatwość wykonania, jest ona prawie zupełnie niezależna (prócz zachowania czystości) od czynnika ludzkiego i od warunków próby (moc układu, sposób regulacji). Dlatego też przy nowelizacji przepisów szwajcarskich na oleje (31) nic w niej nie zmieniono. Przeciwnie, jak poinformował autora (w lutym b. r.) p. S. Tobler, kierownik laboratoriów A. S. E., próbę tę uważają tam za najzupełniej odpowiadającą potrzebom, dającą gwarancję koniecznej czystości, a nie stwarzającą fikcyjnej różnicy pomiędzy jakością olejów o różnych wytrzymałościach, co mogłoby np. być nadużywane do celów reklamowych.

Reasumując powyższe, należałoby zdaniem naszym próbę sprawdzenia wytrzymałości (czyli met. szwajcarską) wprowadzić do przepisów jako próbę odbiorczą, natomiast pomiar wytrzymałości elektrycznej oleju — pozostawić jako porównawczą próbę kontrolną czystości oleju dla własnej informacji wytwórcy lub konsumenta.

Literatura.

Podręczniki.

1. K. Drewnowski. Podstawy techniki Wysokich Napięć, I (Warszawa 1933), str. 101—114.

2. A. Monkhouse. Electrical insulating materials, str. 150—153 (London 1926).

3. F. W. Peek. Electrical Phenomena in high-voltage engineering, str. 215—228 (New-York 1929).

4. H. Warren. Electrical insulating materials, str. 442 i n. (London 1931).

5. Whitehead. Dielectric Phenomena, II Electrical discharges in liquids (London 1928).

6. A. Roth. Hochspannungstechnik, str. 132—140 (Berlin 1927).

7. U. Retzov. Die Eigenschaften elektrotechnischer Isoliermaterialien in graphischen Darstellung str. 67—74 (Berlin 1927).

8. H. Stäger. Elektrotechnische Isoliermaterialien (1931).

Artykuły źródłowe:

- 9) H. Edler. Arch. f. Elektrotechnik, t. XXIV, str. 37.

- 10) H. Edler. Arch. f. Elektrotechnik, t. XXV (1931), str. 447.

- 11) H. Edler. E. T. Z. 1931, str. 654.

- 12) K. Draeger. A. f. E. t. XIII (1924), Nr. 5, str. 366.

- 13) Schröter. A. f. E. t. XII (1925), str. 67.

- 14) W. Spath. A. f. E. t. XII (1923).

- 15) Engelhardt. A. f. E. t. XII (1924).

- 16) Wl Zimmermann. A. f. E. t. XV (1925).

- 17) R. M. Friese. Wiss. Veröffentl. aus d. Siemens-Konz., t. I. (1921), str. 41.

- 18) I. Toriyama. Arbeiten aus d. El. Institut d. Techn. Hochsch. Aachen t. II (1926/27).

- 19) B. Wellauer. Bull. A. S. E. t. 16 (1925), str. 170.

- 20) W. R. Chadburn. Bull. A. S. E., t. 16 (1925), s. 56.

- 21) Hayden i Eddy. Journ. A. I. E. E., 1922, s. 138, 495.

- 22) Wöhr. A. f. E., t. XX (1928), str. 444.

- 23) Miner. Journ. A. I. E. E., t. 46 (1927), str. 336.

- 24) O. Inge i A. Walther. A. f. E., t. XXIII (1930), s. 279.

- 25) H. Ritz. E. T. Z., 1932, Nr. 2.

- 26) J. Rebhan, E. T. Z., 1932, s. 556.

- 27) J. Rebhan, E. T. Z., 1933, s. 5.

- 28) Steinmetz. Journ. A. I. E. E., 1927, s. 495 (dyskusja).

- 29) F. Kopelman, A. f. E., t. XXV, str. 781, E. T. Z., 1930, str. 1447.

- 30) H. Stäger, o. c., str. 43.

- 31) Bull. A. S. E., 1930, str. 443.

- 32) A. R. Mathis. R. G. El., 1932, s. 457.

WYŁADOWANIA RELAKSACYJNE W UKŁADACH Z ELEMENTAMI ŚWIETŁACEMI.

TEORETYCZNE PODSTAWY ZASTOSOWANIA W MIERNICTWIE.

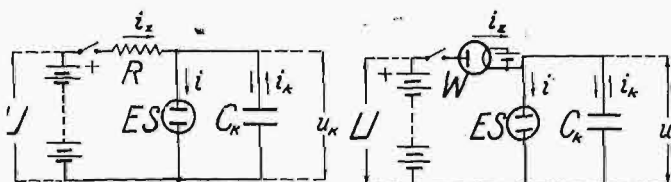
Inż. J. L. Jakubowski.

Streszczenie. W referacie omówiono krytycznie poglądy: Geffckena, Friedländera, Dällenbacha, Vallego, Clarksona, Rothego i in. na sprawę przebiegu charakterystyki dynamicznej i granic wyładowań relaksacyjnych 1-go rodzaju. Ponadto, na podstawie własnych badań doświadczalnych, autor referatu opowiedział się przeciw głoszonej przez Vallego nieciągłości charakterystyki statycznej i wskazał na możliwość istnienia szerokich zakresów wyładowań relaksacyjnych 3-go rodzaju, łatwych do pomieszczenia z wyładowaniami 1-go rodzaju. Wnioski odnoszą się do własności wyładowań, znajdujących zastosowanie: przy pomiarze pojemności i oporności, pomiarach fotoelektrycznych, wytwarzaniu błysków świetlnych i prądów zmiennych.

Znaczenie układów relaksacyjnych w różnych dziedzinach elektrotechniki jest coraz większe [25]. W literaturze fizycznej i technicznej nawet z ostatnich lat (1926 — 1933) istnieją duże sprzeczności i brak opracowania różnych zjawisk z jednego punktu widzenia. Nie usuwa go rozdział w podręczniku S. Francka [23] nienależycie uporządkowany pod względem dydaktycznym, nie nadający się więc, jako wprowadzenie w daną dziedzinę. Referat niniejszy ma za zadanie usunąć omawiany brak, przy czym uwzględnione będą zwłaszcza własności wyładowań ważne dla miernictwa. Materiał ujęty jest zasadniczo w sposób monograficzny, autor zamieścił jednak i nieco szerzej potraktował niepublikowane dotychczas badania własne.

1. Definicje i własności ogólne wyładowań relaksacyjnych.

1. Układem relaksacyjnym z elementem świetlącym nazywamy układ z rys. 1 i 2.



Rys. 1.
Układ relaksacyjny 1.

Rys. 2.
Układ relaksacyjny 2.

Oznaczenia do rys. 1 i 2:

- U, U — źródło napięcia stałego; napięcie tego źródła.
- R, R — opornik bezindukcyjny; oporność tego opornika.
- W — wentyl pracujący w zakresie prądów nasycenia.
- ES — element świetlący (lampa świetląca).
- C_k, C_k — kondensator; pojemność kondensatora.
- i_z — prąd zasilający (= prądowi nasycenia i_s dla układu 2).
- i — prąd płynący przez ES .
- i_k — prąd ładowania C_k .
- u_k — napięcie na C_k (oznaczone przez v w czasie przepuszczania prądu przez ES).

Oznaczenia ogólne:

WR — wyładowania relaksacyjne.

WC — wyładowania ciągłe.

UWR — układ relaksacyjny (układ wyładowań relaksacyjnych).

f — częstotliwość.

φ — oznaczenie zależności funkcjonalnej (np.

$\dot{t} = \varphi(C_k)$).

W układach 1 i 2 (rys. 1 i 2) można zamienić miejsca ES i R (wzgl. W), przy czym różnica działania układów będzie nieistotna [23]. Dalsze rozważania stosują się jednak do układów niezmiennych.

2. Po zniknięciu przebiegów włączeniowych mogą powstać w UWR 3 rodzaje stanów elektrycznych:

1. stan bezprądowy,
2. przepływ prądu stałego przez ES ,
3. przepływ prądu tętniącego przez ES (wyładowania relaksacyjne).

Stany 1 i 2 będą nazywane ustalonymi, stan 3 nieustalonym.

3. Występowanie stanów 1, 2, 3 zależy od wielkości parametrów charakteryzujących UWR [U, R (W), C_k] i własności ES .

4. Gdy U jest mniejsze od napięcia zapłonu ES (oznaczenie V_z), to po włączeniu UWR (t. zn. zamknięciu wyłącznika, patrz rys. 1 i 2) następuje przepływ prądu ładowania, poczem prąd przestanie płynąć i ustala się stan 1.

5. Gdy U jest większe od V_z , po włączeniu UWR następuje najpierw okres ładowania C_k , a gdy napięcie na C_k i ES osiągnie wartość V_z , zapalenie się ES (początek samodzielnego przepływu prądu). Zjawia się stan 1 lub 2. Warunki, od których zależy występowanie jednego, lub drugiego stanu, będą omówione później.

6. Jeśli po zapłonie nastąpi przepływ prądu stałego (stan 2), prąd zasilający będzie równy prądowi ES ($i_z = i$).

7. Jeśli napięcie na ES spadnie po zapłonie do wartości, przy której wyładowanie świetlące jest niemożliwe (napięcie zgaszenia V_o), ES zgaśnie. Z tą chwilą następuje nowy okres ładowania C_k aż do V_z , nowe wyładowanie cząstkowe i t. d. W ciągu każdego wyładowania cząstkowego napięcie na ES maleje, co jest połączone ze zwolnieniem części ładunku C_k i przepływem jej przez ES . Stąd nazwa: wyładowania relaksacyjne. Istotną rolę grają w nich przebiegi jonizacyjne w ES , w przeciwieństwie do wyładowań oscylacyjnych, polegających na przebiegach elektromagnetycznych. Wzór Thomsona, $T = 2\pi\sqrt{LC}$, stosuje się tylko do wyładowań oscylacyjnych.

8. Przy WR 1. rodzaju ¹⁾ (terminologia Vallego [14]) istnieją zakresy czasu, w których $i = 0$; przy WR 2, 3 i t. d. rodzaju prąd nigdy nie osiąga wartości 0 (rys. 7). W dalszym ciągu przez skrót WR będą rozumiane WR 1. rodzaju. Przy omawianiu WR 2. rodzaju określenia „2. rodzaju” będą wyraźnie zaznaczone. Skróty: WR 1, WR 2, WR 3...

¹⁾ Odkryte przez J. P. Gassiot'a w r. 1860. Rys historyczny — patrz Valle [14], str. 475.

2. Wzory zasadnicze.

Układ 1.

Prąd w okresie ładowania:

$$i_k = \frac{U - u_k}{R} = C_k \frac{d u_k}{d t}.$$

Długość okresu ładowania:

$$t_l = \int_0^{t_1} d t = \int_{V_0}^{V_z} \frac{C_k R}{U - u_k} d u_k = C_k R \ln \frac{U - V_0}{U - V_z}.$$

Napięcie w czasie ładowania:

$$u_k = U - (U - V_0) e^{-\frac{1}{C_k R} t}.$$

Prąd ES w okresie wyładowania cząstkowego:

$$i = \frac{U - v}{R} - C_k \frac{d v}{d t}.$$

Układ 2.

$$i_k = i_s = C_k \frac{d u_k}{d t}$$

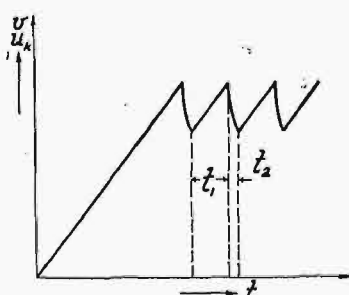
(i_s — prąd nasycenia W).

$$t_1 = \int_0^{t_1} d t = \frac{C_k}{i_s} \int_{V_0}^{V_z} d u_k = \frac{C_k}{i_s} (V_z - V_0).$$

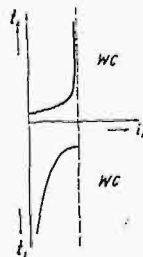
$$u_k = V_0 + \frac{i_s}{C_k} t \text{ (zależność liniowa, por. rys. 3).}$$

$$i = i_s - C_k \frac{d v}{d t}.$$

Ścisłych wzorów na długość okresu wyładowania nie można ułożyć, wobec naogół nieznanymi własności ilościowych charakterystyk dynamicznych ES. Wzory przybliżone



Rys. 3.
Schematyczny przebieg napięć w układzie 2 (t₁ — okres ładowania, t₂ — okres wyładowania).



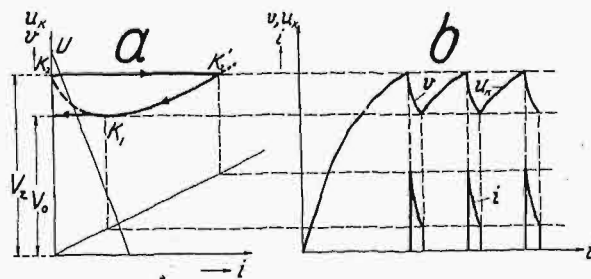
Rys. 4.
Schematyczny przebieg krzywych: t₁, t₂ = φ(i₂) (U, V_z, V₀, C_k, i/v — stałe) Valle ([14], rys. 2).

na t₂ ([14], [23]) mają małą wartość praktyczną i teoretyczną, dlatego nie będą podane. Zaznaczę jednak, że Valle mu ([14], str. 478) udało się przy ich pomocy wytłumaczyć jedną z osobliwości WR. Valle przyjął mianowicie V_z, V₀, przewodność ES (t. zn. $\frac{i}{v}$) za stałe i wyznaczył zależność długości okresu (t₁ + t₂) od prądu zasilającego²⁾. Z rys. 4, do którego doprowadziło powyższe obliczenie, wynika, że częstotliwość WR rośnie przy wzroście prądu zasilającego prawie do samej granicy między WR i WC. Bezpośrednio przed tą granicą f zaczyna jednak maleć wskutek wydłużania się t₂. Według Vallego (l. c. str. 480) to malenie jest dlatego zwykle przeoczane, że zakres t₂, w którym występuje, jest b. wąski (węższy, niż na rys. 4) i że przypadkowe niestabilności własności ES lub R (W) powodują od razu przeskok z WR do WC. Poza tym zakresem obowiązuje przybliżone prawo f = const. i_z (patrz dalej: przybliżone wzory).

²⁾ Prąd ten przyjęto za stały, stosownie do założenia, że U jest dużo większe od v (założenie nie zawsze dopuszczalne).

3. Charakterystyka dynamiczna ES w dawnym ujęciu.

Do wzorów na t₁ wchodzi wielkości V_z i V₀. W pierwszym przybliżeniu wielkości te można przyjąć za stałe co wynika z dawniej przypuszczanych (np. przez Geffckena [6]) przebiegów w czasie wyładowania cząstkowego. Przebiegi te są przedstawione na rys. 5³⁾. Po włączeniu UWR



Rys. 5.

a) przebieg charakterystyki dynamicznej (linje grube) i statycznej ES (linje grube przerywane). b) przebiegi napięć i prądów w UWR w funkcji czasu. (Friedländer [12]).

następuje okres ładowania C_k aż do napięcia zapłonu V_z, następnie skok prądu, przebieg wzdłuż charakterystyki statycznej, nowy skok prądu i okres ładowania. W tym ujęciu wielkość V_z i V₀ można wprost określić z charakterystyki statycznej.

Nie wnikając w dawniejsze uzasadnienia przebiegów z rys. 5, zatrzymamy się dłużej na ostatnim tłumaczeniu, podanym przez Friedländera [12]. Opiera się ono na następujących założeniach:

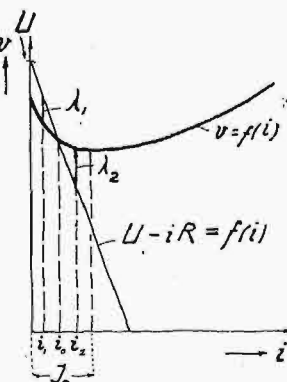
a) Prąd i₁ (rys. 6) jest możliwy tylko w warunkach dynamicznych, przyczem napięcie λ₁ musi być pokryte przez spadek napięcia na R, wywołany prądem ładowania C_k do wyższego napięcia (λ dodatnie). Zatem napięcie v, odpowiadające i₁, rośnie, a i₁ maleje.

b) To samo dotyczy prądu i₂ z tą różnicą, że λ jest wywołane przez prąd rozładowujący C_k, oraz że i₂ rośnie.

c) Wobec powyższego równowaga prądu i₀ jest chwiejna: przy dowolnie małej zmianie tego prądu następuje automatycznie dalsza zmiana w tym samym kierunku. Wobec niemożności uzyskania w warunkach rzeczywistych idealnej stałości prądu, istnienie statyczne prądu i₀ jest niemożliwe.

d) Przeprowadzając analogiczne rozważania, dojdziemy do wniosku, że równowagę stałą prądu i₀ można uzyskać, o ile i₀ > I₀.

Jeśli i₀ < I₀ to po włączeniu UWR następuje wzrost napięcia na ES aż do V_z. W chwili zapłonu (K₂, rys. 5) λ jest dodatnie, ponieważ jednak charakterystyka v = φ(i) nie pozwala na wzrost v, musi nastąpić skok do stanu określonego punktem K'₂. Ale w K'₂ λ jest ujemne, wobec czego v spada aż do K₁. W K₁ następuje nowy skok prądu z przyczyn podobnych, jak skok w K₂.



Rys. 6.

Przebieg charakterystyki statycznej ES (krzywa v = f(i)) i przebieg napięcia na elektrodach ES w funkcji prądu w założeniu, że oporność między elektrodami może być dowolna (prosta U - iR = f(i)). (Friedländer, [12]).

³⁾ Za H a u d e'iem wykres analogiczny do rys. 5 podaje także inż. A. Jellonek (Przegł. Radj., 1933, z. 24).

4. Przybliżone wzory, określające częstotliwość.

Na rys. 3 uwidoczniła jest jedna ze stwierdzonych doświadczalnie charakterystycznych cech WR: krótkość okresu wyładowania w porównaniu z okresem ładowania. Z tego względu w przybliżeniu można założyć, że

$$f \approx \frac{1}{C_k R \ln \frac{U - V_0}{U - V_z}}$$

lub

$$f \approx \frac{i_s}{C_k (V_z - V_0)}$$

odpowiednio w układzie 1 i 2.

Przyjmując V_0 i V_z za stałe, stosownie do poprzednich rozważań, ze wzorów powyższych otrzymujemy następujące zależności dla układu 1:

$$a) f = \frac{const._1}{C_k}, \text{ gdy } U \text{ i } R \text{ stałe.}$$

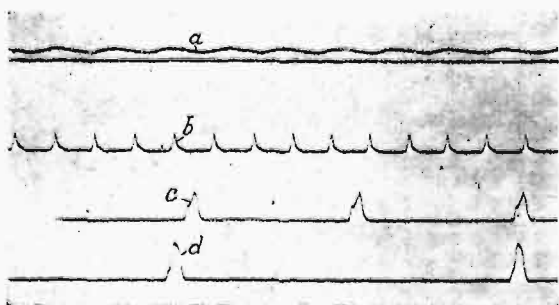
$$b) f = \frac{const._2}{R}, \text{ gdy } U \text{ i } C_k \text{ stałe.}$$

dla układu 2:

$$c) f = \frac{const._3}{C_k}, \text{ gdy } i_s \text{ stałe.}$$

$$d) f = const._4 \cdot i_s, \text{ gdy } C_k \text{ stałe.}$$

Zależności powyższe są rzeczywiście w przybliżeniu słuszne (por. rys. 7), chociaż próby obliczenia stałych $const._1$, $const._2$,... prowadzą zwykle do fałszywych wyników. Penning ([10], str. 188) stwierdził np. różnice między częstotliwością zmierzona i obliczoną, dochodzące do 50%, Haak ([15], str. 121) — nawet kilkakrotnie



Rys. 7.

Oscylogramy prądu i w ukladzie 2, zdjęte przez autora. a) WR2. rodzaju: $C_k = 0,005 \mu F$, $i_s = 13,3 \mu A$. b, c, d) WR2. rodzaju: $i_s = 10,7 \mu A$, C_k kolejno 0,001; 0,005; 0,010 μF . Rys. ilustruje przybliżoną słuszność wzoru $f = \frac{const._s}{C_k}$. Przebiegi chwilowe prądu nie są zupełnie ścisłym obrazem rzeczywistości, wskutek odkształceń wprowadzonych przez oscylograf pętlicowy.

5. Przyczyny nieściśłości wzorów przybliżonych.

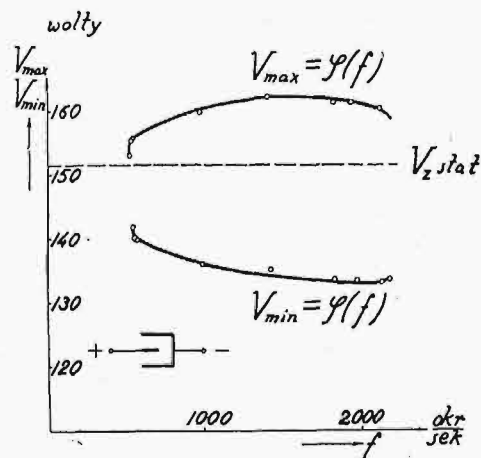
A. Pominięcie okresu t_2 przy obliczaniu f niezawsze jest dopuszczalne. Przyczyna ta łączy się ze ściśłem wyznaczeniem granicy między okresem ładowania i wyładowania (porównaj niżej; omówienie chwili występowania V_{min}).

B. Niedopuszczalność określenia V_0 i V_z z charakterystyki statycznej.

1. Penning [10], Haak [15], J. L. Jakubowski i in. mierzyli największe i najmniejsze chwilowe napięcia (V_{max} i V_{min}), występujące na ES podczas WR. Zgodnie

z rys. 5 wielkości te powinny być równe V_z i V_0 ; tymczasem nie było to spełnione (rys. 8). Penning wstawiał zmierzone V_{max} i V_{min} do wzorów przybliżonych i uzyskiwał zgodność dużo lepszą (11 ÷ 21%, zamiast ok. 50%), niż przy stosowaniu V_z i V_0 z charakterystyki statycznej. Nie znaczy to jednak, aby V_{max} i V_{min} można było a priori utożsamiać z V_z i V_0 występującymi rzeczywiście w warunkach dynamicznych, t. zn. podczas WR. Przeciwnie, w stosunku do V_{min} taki pogląd jest napewno niesłuszny.

Zmniejszenie się V_{min} poniżej wartości statycznej Penning tłumaczy tem, że zgaszenie ES następuje przy prą-



Rys. 8.

a) Przebieg V_{max} i V_{min} w funkcji f według pomiarów autora. Element świetlacy: prostownik firmy Philips 1091 (duża elektroda — katoda, $C_k = 122 \mu F$).

dzie nierównym 0 i że po zgaszeniu ma miejsce stosunkowo powolne zanikanie prądu (w literaturze angielskiej: „clear up”). Prąd po zgaszeniu wyładowuje C_k aż do chwili, gdy staje się równy prądowi zasilania i_z (wtedy $\frac{dv}{dt}$ staje się równe 0¹⁾). Pogląd ten utrzymał się; rozbudował go i ujął ilościowo zwłaszcza Clarkson [16], [17]. V_{min} nie jest więc napięciem zgaszenia.

2. Przyczyny nierówności: $V_{max} \neq$ statyczne V_z mogą być według Penninga [10] następujące:

a) Quasistatyczne ustalenie warunków (np. temperatury) w ES.

b) Obecność lub nieobecność koniecznej ilości elektronów w odpowiednich miejscach gazu (opóźnienie zapłonu przy traktowaniu zapłonu jako zjawiska statystycznego).

c) Pozostała po poprzednim wyładowaniu koncentracja pola elektrycznego w pobliżu katody.

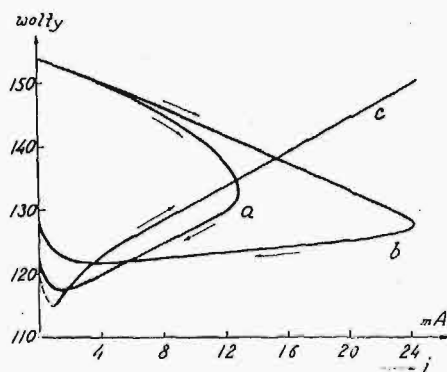
d) Stopniowe rozwijanie się procesu zapłonu (prądu) ES (v rośnie aż do chwili spełnienia równości $i = i_z$).

W razie występowania tylko przyczyn a), b), c), napięcie V_{max} byłoby równe rzeczywistemu (dynamicznemu) napięciu zapłonu. Przyczyna d) powodowałaby nierówność wzmiankowanych napięć.

Autorzy prac [5], [6], [8], [10], [14], [15] starali się wytłumaczyć zależność V_{max} od częstotliwości, biorąc pod uwagę jedną lub kilka z powyższych przyczyn. Wszyscy oni uważali powoli znikające ładunki przestrzenne poprzedniego wyładowania cząstkowego za źródło jonów, mających wpływ na wielkość V_{max} .

¹⁾ Stosownie do definicji oznaczenie v jest stosowane dotąd, dopóki ES przepuszcza prąd.

Najbardziej prawdopodobna jest hipoteza Rothego [22]⁵⁾ sprawdzona częściowo doświadczalnie, która tem się różni od założeń poprzednich autorów, że — biorąc za podstawę przyczynę b) — przyjmuje inne, niż ładunek przestrzenny, źródło wolnych jonów w gazie. Hipoteza ta całkowicie tłumaczy przebieg $V_{max} = \varphi(t)$. Rothe zakłada, że przez ułożenie się atomów obcych przy powierzchni katody powstają podwójne warstwy elektryczne (influencyjne działanie ładunku elektrody na warstwę, osiadanie nośników elektryczności). Część ich tworzy się podczas każdego wyładowania cząstkowego i rozpada po jego zgaszeniu; są to elementy krótkotrwałe warstw. Elementy te wysyłają przy rozpadzie jony i elektrony, które — według Rothego⁶⁾ — wywołują właśnie prąd pozgaszeniowy. Obecność w gazie tych nośników elektryczności przyczynia się do zniżenia V_{max} , istnienie zaś samych warstw (elementów długotrwałych) ma działanie podwyższające V_{max} . Przy krótkich okresach nieczynności ES (duże f) przeważa wpływ pierwszego czynnika, przy długich — drugiego, przy b. długich, gdy ulegną rozkładowi nawet elementy długotrwałe warstw, znika wpływ obu czynników.



Rys. 9.

Charakterystyka statyczna ES i dynamiczna (WR1) zdjęta oscylografem katodowym przez Leyshona ([21], rys. 5).
a) ch. dynamiczna przy małym C_k (0,003 μ F, 604 okr./sek),
b) ch. dynamiczna przy dużym C_k (0,05 μ F, 72 okr./sek),
c) ch. statyczna. Układ 1: $R = 100$ k Ω , ES — lampa spiralkowa.

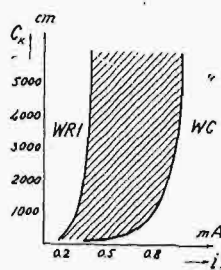
6. Charakterystyka dynamiczna WR w nowym ujęciu.

Rozważania poprzedniego rozdziału stwierdzają, że skok prądu nie występuje w chwili zgaszenia (por. rys. 5). Nasuwa się pytanie, czy wogóle przebiegane są stany między

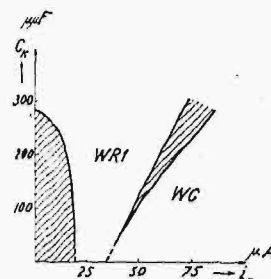
⁵⁾ Do założeń tej hipotezy (r. 1930) bardzo zbliżone są rozważania Clarksona (r. 1927, [16], str. 125 i n.). Już ten badacz zwrócił uwagę na możliwość trwałej lub czasowej modyfikacji powierzchni katody przez gaz (warstwy polaryzacyjne), która albo utrudnia przepływ elektronów, albo nie dopuszcza do intensywnego ich wytwarzania. Autor ten przyjął jednak — po szczegółowej dyskusji — za przyczynę nierówności $V_{max} \neq V_z$ (statyczne V_z) powolny wzrost prądu po zapłonie (zjawisko „build up”), co niezupełnie daje się pogodzić z nowszymi badaniami. Czas „build up” według obliczeń Clarksona jest rzędu 0,001 — 0,01 sek., a czas powstawania wyładowania świetlającego według pomiarów Steenbecka (Zeitschr. f. techn. Phys. 10/1929, str. 480) — rzędu 10^{-6} sek.

⁶⁾ Według Penninga prąd ten jest wynikiem znikania ładunków przestrzennych; stosownie do obliczeń Rothego ładunki te muszą zniknąć już w czasie rzędu 10^{-5} sek., a długość okresów ładowania jest zwykle rzędu 10^{-2} — 10^{-3} sek. Zresztą, jak słusznie zauważył Rothe, jest nieprawdopodobne, aby ładunki przestrzenne mogły dostarczyć ilość nośników elektryczności, potrzebną np. do wyładowania pojemności 1 000 μ F o 40 ÷ 60 V.

punktami K_2 i K'_1 (rys. 5) charakterystyki statycznej. Badania Haaka dają odpowiedź przeczącą. Autor ten stwierdził, że maksymalny prąd wyładowania cząstkowego (i_{max}), zupełnie nie odpowiada charakterystyce statycznej, a zmienia się tak, jak wielkość V_{max} . Haak stąd wnioskuje, że



Rys. 10.
Granice WR1. rodzaju dla ES, badanego przez Geffckena [6].



Rys. 11.
Granice WR1. rodzaju dla ES, badanego przez Penninga ([10], rys. 8).

prąd i_{max} jest funkcją całkowitego ładunku, jaki przepływa przez ES w ciągu wyładowania cząstkowego [t. zn. $C_k (V_{max} - V_{min})$] i jest tem większy, im ten ładunek jest większy. Wynika stąd, że prąd musi być największy przy końcu wyładowania cząstkowego („...die Glimmlampe zu Beginn der Entladung nicht wissen kann, welche Elektrizitätsmenge sie zu bewältigen haben wird...” [15], str. 132). Ten pogląd potwierdzają oscylogramy zdjęte przez Leyshona [21] zapomocą oscylografu katodowego. Otrzymane z nich wykresy (rys. 9) wskazują wyraźnie, że przebiegi charakterystyki statycznej i dynamicznej WR różnią się zasadniczo⁷⁾.

Na podstawie powyższego schematu wyładowania cząstkowego będzie następujący:

1. Zapłon. Wielkość napięcia zapłonu V_z zależy od stanu warstw podwójnych na katodzie.

2. Po zapłonie napięcie maleje, prąd rośnie, co jest przyczyną osiągnięcia przez napięcie v wartości, poniżej której wyładowanie samodzielne (świetlące) jest niemożliwe. Wtedy następuje zgaszenie⁸⁾.

3. Prąd pozgaszeniowy połączony z dalszym spadkiem napięcia v poniżej napięcia zgaszenia, wskutek wyładowywania C_k przez ten prąd.

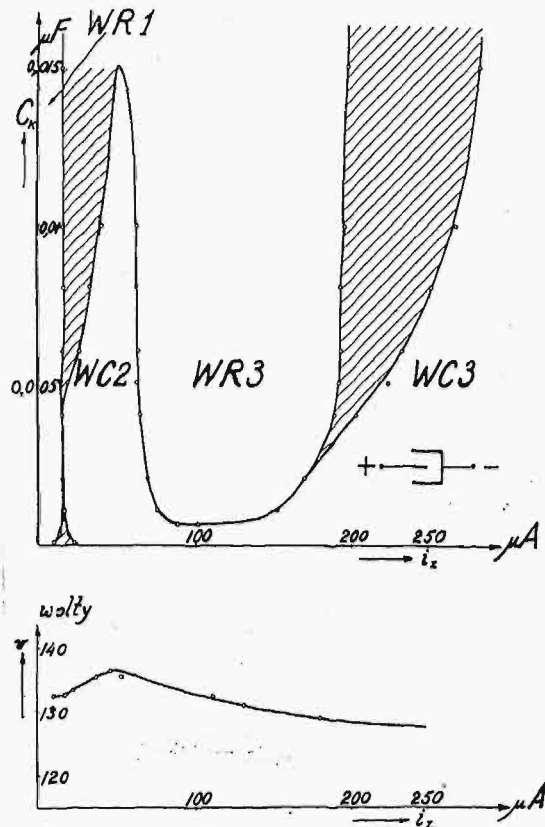
7. Granice zakresu WR 1. rodzaju.

Wyznaczenie granic prądu zasilającego, w których zjawiają się WR 1. rodzaju, jest równie ważne dla celów pomiarowych, jak określenie zależności częstotliwości od parametrów elektrycznych UWR. Rys. 10—13, odnoszące się do układu 2, podają wybór z materiału doświadczalnego dotychczasowych badań. Oczywiście wykresy należy rozumieć wyłącznie jakościowo, gdyż ES używane przez poszczególnych autorów miały różne własności.

⁷⁾ Wykres Leyshona nie zgadza się z przebiegiem przyjętym w teorii Vallego, naogół b. dużo tłumaczącej ([14], str. 485). Prąd i_{max} z wykresu Leyshona nie leży na linii zgaszeń Vallego ($A_0 M_0$, por. rys. 3, l. c.), ani nie odpowiada charakterystyce $S'' M'' V'' A''$ (rys. 3, l. c.), która może być przebiegana tylko w przypadku istnienia obwodu oscylacyjnego (R, L, C). Wobec doświadczalnego charakteru wykresu Leyshona i teoretycznego — schematu Vallego, ostatni musi ulec modyfikacji.

⁸⁾ Rys. 6 w pracy Haaka [15] oraz rys. 123 w pracy Franczka [23] zaciemniają istotę rzeczy. Wszak gałąź odnosząca się do charakterystyki dynamicznej nie ma żadnego znaczenia fizycznego. To samo dotyczy tłumaczenia Haaka przebiegu charakterystyki dynamicznej na wykresie charakterystyki statycznej ([15], str. 129), chyba że Haak chce w ten sposób wskazać tylko na analogię przebiegu obu charakterystyk.

W zakresach zakreskowanych na rys. 10—13 powstają bądź wyładowania ciągłe (WC) bądź relaksacyjne (WR) w zależności od tego, czy przy osiągnięciu danego stanu⁹⁾ przechodzono z zakresu wyładowań ciągłych, czy relaksacyjnych. Wystarczające wytłumaczenie tego zjawiska nie istnieje¹⁰⁾. To samo dotyczy właściwie wogóle granic WR, pomimo kilku prób opisanych niżej w kolejności historycznej.



Rys. 12.

Granice WR1. i 3. rodzaju dla ES, badanego przez autora referatu (prostownik firmy Philips 1091, duża elektroda — katoda). Duże C_k . Krzywa dolna — charakterystyka statyczna. WR1 występują na pierwszej opadającej gałęzi charakterystyki, leżącej na lewo od pierwszego zaznaczonego punktu, WR3 — na drugiej skolei gałęzi opadającej.

1. Zastosowanie warunków Kaufmanna (patrz np. [20]) na wystąpienie wyładowania ciągłego ($R > -\frac{dv}{di}$, $\frac{1}{RC_k} + \frac{1}{L} \frac{dv}{di} \geq 0$), uproszczonych przez założenie w nich $L = 0$ ¹¹⁾. Warunki te, przy powyższym założeniu, sprowadzają się do jednego: $R > -\frac{dv}{di}$ ([14], str. 481). Jaskrawym przykładem niezgodności tego „uproszczonego” warunku ze zjawiskami w UWR jest występowanie WR w układzie 2 (prąd zasilający nie zależy od v , co odpowiada $R = \infty$). Przyczyna niezgodności, jak zauważył Seeliger ([19], str. 97), leży głównie w niedopuszczalności wstawiania $L = 0$ do wzorów ogólnych. $L = 0$ należy uwzględnić już w równaniach różniczkowych.

2. Uwzględnienie indukcyjności własnej ES. Herweg [3] założył, że ES przedstawia indukcyjność, wywołaną

⁹⁾ Przez zmianę prądu zasilającego.

¹⁰⁾ Tłumaczenie Geffckena jest zawarte w punkcie 3 (patrz dalej). Valle ([14], str. 490) uważa za przy czynę t. zw. powolną histerezę.

¹¹⁾ L — indukcyjność szeregową z ES.

histerezą wyładowania (analogia do teorii łuku Simona). Stosując pełny warunek Kaufmanna do stanów granicznych między WR i WC, Herweg określił ową indukcyjność hysteretyczną (dziesiątki ÷ tysiące henrów). Znaczenie fizyczne otrzymanej wielkości jest b. małe, jak słusznie zauważył Penning ([10], str. 194), gdyż nie jest ona stała dla danego ES i danego prądu. Nieścisłość popełniona przez Herwega polega, według Penninga (l. c.), na określaniu $\frac{dv}{di}$ z charakterystyki statycznej, podczas gdy zmiany dynamiczne v , i nie muszą koniecznie odpowiadać tej charakterystyce.

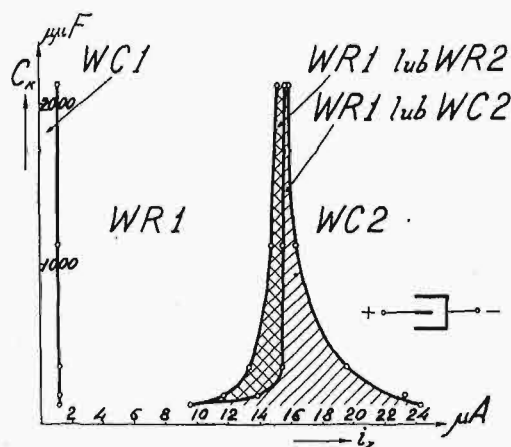
3. Inna interpretacja warunku Kaufmanna. Geffcken [6] potrafił pogodzić warunek „uproszczony” z występowaniem WR nawet w razie zasilania UWR przez wentyl nasyceny. Zgodnie z dawnym poglądem na charakterystykę dynamiczną (patrz rys. 5) WR powstaną zawsze — jak zauważył Geffcken — gdy prąd $i_0 < I_0$, nawet gdy linia $U - iR$ jest b. stroma, lub pionowa. Konieczne jest tylko, aby prąd zasilający był zwiększany począwszy od 0. Przeciwnie, jeśli prąd zaczniemy zmniejszać od wartości, przy której już było wyładowanie ciągłe, powinno się uzyskiwać wszystkie punkty opadającej (t. zn. posiadającej $\frac{dv}{di} < 0$) gałęzi charakterystyki statycznej. To tłumaczenie jest poparte następującym faktem doświadczalnym: rzeczywiście, przy zmniejszaniu prądu od WC, otrzymujemy zamiast WR część opadającej charakterystyki statycznej (odpowiada jej pole zakreskowane na rys. 10). Niemożność przejścia w omawianych warunkach całej charakterystyki statycznej Geffcken tłumaczy:

a) albo tem, że w punkcie urwania się charakterystyki statycznej jej stromość jest tak duża, że przypadkowe odchylenia od charakterystyki prowadzą do zgaszenia ES;

b) albo tem, że w punkcie urwania kończy się charakterystyka statyczna.

Geffcken [6] i Penning ([10] str. 194) przychylają się do tłumaczenia a). Tłumaczenie b) zbliża się do zapatrywania Vallejo (patrz punkt 4).

Jak wynika z powyższego, granicą naturalną WR — według Geffckena (i Haaka [15]) — przy zwiększaniu



Rys. 13.

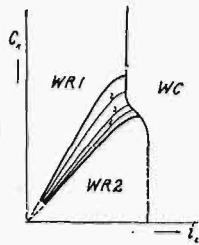
Jak rys. 12. Małe C_k .

prądu zasilającego (i_0 , układ 2), jest prąd odpowiadający zagięciu charakterystyki statycznej między jej gałęzią opadającą i wznoszącą się¹²⁾. Niezjawianie się WR, mające

¹²⁾ Stosownie do zdania wymienionych autorów zagięcie to odpowiada przejściu od spadku katodowego normalnego do anormalnego; z poglądem tym nie zgadza się Valle ([14], str. 482).

często miejsce dla prądów mniejszych, autorzy ci tłumaczą wolnym znikaniem jonów po zgaszeniu, które może doprowadzić — dla bardzo dużych częstotliwości (a więc dużego prądu zasilającego) — do zrównania napięcia zapłonu i napięcia zgaszenia. Wyładowanie przybiera wtedy postać ciągłego mimo, że granica naturalna i_s nie została osiągnięta.

4. Zaprzeczenie istnienia opadającej gałęzi ($\frac{dv}{di} < 0$) charakterystyki statycznej. Zaprzeczenie to Valle ([14], str. 481) opiera na teoretycznej — według jego za-



Rys. 14. Teoretyczny schemat rozkładu obszarów różnych rodzajów WR według Vallego ([14], rys. 5).

wynikiem błędów pomiaru, mianowicie wzięcia WR 2. rodzaju za WC. Między innymi rys. 10 jest według Vallego nieścisły, a przebieg rzeczywisty ma odpowiadać schematycznemu rys. 14 (dla małych i_z i C_k WR 2. rodzaju, a nie WC!).

Pomiary Penninga, Haaka i autora referatu stwierdziły ponad wszelką wątpliwość możliwość istnienia przy małych C_k charakterystyki statycznej opadającej (pomiar v metodą kompensacyjną, ([24], str. 96). Autor niniejszej pracy stwierdził nawet w jednym z przypadków współistnienie (oczywiście niejednoczesne) charakterystyki statycznej opadającej i WR 1. rodzaju ¹³⁾ (rys. 15). Wyładowania 2. rodzaju zjawiały się (niezawsze!) tylko w niewielkim zakresie tej charakterystyki.

Omawiając wyniki pomiarów Penninga, Valle ([14], str. 503) podtrzymuje w dalszym ciągu przypuszczenie, że na części opadającej charakterystyki statycznej występują WR 2. rodzaju, przyczem przypisuje im b. małą różnicę $V_{max} - V_{min}$, leżącą w granicach dokładności metod pomiaru V_{max} i V_{min} ¹⁵⁾ (wyładowanie „pseudociągłe”). Ten pogląd nie został dotąd stwierdzony doświadczalnie.

5. Zastosowanie prawidłowo wyprowadzonych warunków Kaufmanna dla $L = 0$, $C_k \neq 0$ ([11], [19], [20]). Warunki te sprowadzają się do nierówności $R < -\frac{dv}{di}$ (stan ustalony), to znaczy dają wyniki wprost przeciwne niż

¹³⁾ Ten pogląd Vallego jest związany ze stałością normalnego spadku katodowego, t. j. spadku występującego, gdy katoda nie jest pokryta całkowicie poświatą ujemną. Malenie napięcia przy quasistatycznym wzroście prądu jest charakterystyczne, według Vallego, tylko dla wyładowań świetlających z zorzą dodatnią. Penning ([10], str. 195) jest innego zdania; według niego istnienie opadającej gałęzi charakterystyki statycznej może być również wywołane zjawiskami przy anodzie.

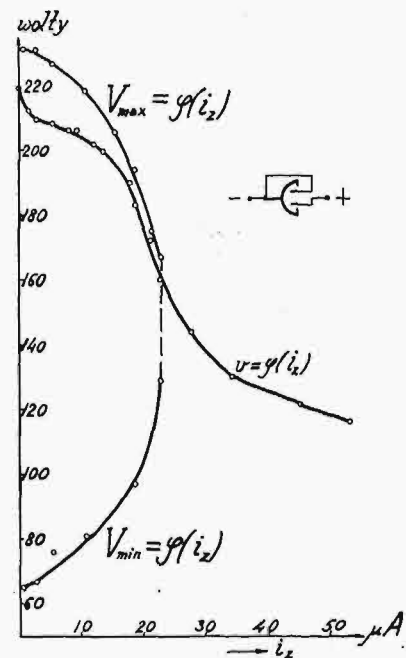
¹⁴⁾ Występowanie jednej, lub drugiej formy wyładowania było zależne od sposobu regulacji prądu zasilającego. Bliższe szczegóły będą opublikowane w artykule autora w Prz. El. w r. b.

¹⁵⁾ 0,5 V przy pomiarach Haaka ([15], str. 127). 2 V przy pomiarach Penninga ([10], str. 195).

„uproszczony” warunek (patrz wyżej, punkt 1) ¹⁶⁾. Na ich podstawie opiera się podane wyżej tłumaczenie Friedländera, odnoszące się do rys. 6.

Warunek prawidłowo wyprowadzony nie rozwiązuje jednak zagadnienia, o czym świadczy istnienie stanów ustalonych na opadającej gałęzi charakterystyki statycznej w UWR 2.

6. Zastosowanie kryteriów niewystępowania niezaniakających prądów wyrównawczych przy naruszeniu równowagi i uwzględnienie charakterystyki dynamicznej. Powyższe kryteria sprowadzają się do warunku ujemnej wartości α w wyrażeniach postaci $A e^{(\alpha + i\beta)t}$, których suma jest rozwiązaniem równania różniczkowego na v , lub i . Stosując je formalnie do UWR, otrzymujemy warunki Kaufmanna. Oznacza to, że nowością w opisywanym rozwiązaniu Dällenbacha [13] jest tylko uwzględnienie charakteru dynamicznego charakterystyki ES. Wprowadził już Herweg [3] brał pod uwagę ten charakter (chęć wyznaczenia indukcyjności histerycznej), ale jednocześnie korzystał z charakterystyki statycznej dla określenia $\frac{dv}{di}$. Dällenbach, w przeciwieństwie do Herwega, do równań zastosował wielkości z charakterystyki dynamicznej, otrzymanej w sposób analogiczny do zastosowanego w teorii łuku Simona (parametr S związany z ilością zjonizowanych cząstek w gazie). Wyniki dość skomplikowanych rachunków są jakościowo zgodne z zakresami WR, otrzymanymi przez Penninga (rys. 11). Dzięki temu, założenia Dällenbacha są obecnie najbardziej prawdopodobnym rozwiązaniem



Rys. 15.

Przebieg charakterystyki statycznej (v) i krzywych V_{max} i V_{min} w funkcji $i_z (= i_s)$ według pomiarów autora referatu. ES — prostownik RGN 1500 firmy Telefunken (duża elektroda — katoda, jedna z małych elektrod połączona z katodą). Rys. uwiadamia współistnienie wszystkich wymienionych krzywych.

sprawy granic WR, jakkolwiek formalność założeń co do przebiegu charakterystyki dynamicznej może budzić nieufność.

¹⁶⁾ Warunek „uproszczony” jest słuszny, ale dla szeregowego połączenia indukcyjności z idealnym ES, nie posiadającym indukcyjności.

8. Wyładowania relaksacyjne 2. i 3. rodzaju.

Pod nazwą WR 2. rodzaju będą rozumiane WR, których zakresy sąsiadują z WR 1. rodzaju i podczas których prąd nigdy nie spada do 0. WR 2. są związane z tą samą gałęzią opadającej charakterystyki statycznej, co WR 1. Terminologia Vallego [14] jest co do WR 1. i WR 2. zgodna z użytą w niniejszym referacie. Natomiast termin „WR 3., 5.,... i t. d. rodzaju”¹⁷⁾ został wprowadzony przez autora referatu na oznaczenie WR, związanych z następującymi po pierwszej, niezależnymi od niej częściami opadającej charakterystyki statycznej. WR 3. charakteryzują się, podobnie jak WR 2., nieprzechodzeniem chwilowej wartości prądu i przez 0, odpowiadają jednak, z punktu widzenia genetycznego, WR 1.

WR 2. mają małe znaczenie dla miernictwa elektrycznego ze względu na wąskość i niestałość ich zakresów oraz b. małą wielkość amplitudy prądów i napięć. Np. w przypadku z rys. 12 zakresy te były tak wąskie, że nie można było uwidocznić ich na wykresie. Jak stwierdził autor referatu WR 2. mogą występować zarówno w pobliżu większo-, jak i mniejszo-prądowej¹⁸⁾ granicy zakresu WR 1. W obu przypadkach łatwo je odróżnić od WR 1. po wysokości i sile tonu odpowiednio włączonej słuchawki (ważne dla techniki pomiarowej). Odmianą WR 2. są opisane najpierw przez Vallego ([14], str. 487 i [10], str. 195) wyładowania grupowe, których zakresy są jeszcze węższe, niż zakresy WR 2. Na rys. 14 zakresy te, oznaczone wprost cyframi: 2, 3..., są naumyślnie powiększone, dla uwidocznienia ich na wykresie. Charakteryzują się one łączeniem się WR w grupy (WR 1 i kilku WR 2), powtarzającym się periodycznie. Szczegółowo dotyczące WR 2. i grupowych można znaleźć w b. konsekwentnie ułożonej teorii Vallego ([14], str. 487)¹⁹⁾.

WR 3. były obserwowane przez Penninga ([10], str. 195) a WR 3, 5 i t. d. — przez Vallego. W przypadku Vallego w ES występowała uwarstwiona zorza dodatnia, a wspomniane WR odpowiadały przejściom od wyładowania z n warstwami do $n+1$ warstw. W powyższych przypadkach zakresy WR były b. wąskie; autor referatu stwierdził natomiast b. szeroki obszar WR 3 (rys. 12). Opadanie charakterystyki statycznej²⁰⁾ w zakresie WR 3 (rys. 12) było prawdopodobnie wywołane przeniesieniem się wyładowania z rozpórki w katodzie walcowej, na której zaczął powstawać spadek anormalny, na właściwą katodę, walec o dużej powierzchni, na której mógł rozwinąć się normalny spadek katodowy. WR 3. odznaczały się b. dużą amplitudą prądu i i na oko charakterystyczną dla WR 1. zależnością częstotliwości od i_z i C_k ; od WR 1. można je było odróżnić, mierząc prąd minimalny ES metodą kompensacyjną ([23] str. 96, pomiar spadku napięcia na oporze $10\text{ k}\Omega$). Charakterystyczne jest, że dla dużych C_k (rys. 12), gdzie zakresy WR 1. i

WR 3. stykają się z sobą, zastosowanie metody kompensacyjnej pozwalało zawsze odróżnić obie formy wyładowania²¹⁾.

9. Wnioski.

Rozważania referatu prowadzą do następujących wniosków ogólnych:

1. Wzory na częstotliwość są nieściśle. Przyczyna tego leży w niedopuszczalności stosowania V_z i V_0 , określonych z charakterystyki statycznej, i w niesłuszności pomijania okresu wyładowania (t_2). Według obecnych zapatrywań największe napięcie (V_{max}) występujące na ES jest równe lub prawie równe dynamicznemu napięciu zapłonu i jest różne od statycznego V_z . Przeciwnie, V_{min} nie równa się dynamicznemu V_0 , ale jest mniejsze. Ani wstawienie V_{min} do wzoru na f , ani wstawienie V_0 nie da wyników prawidłowych. Z dokładnej analizy rozgraniczenia okresów t_1 i t_2 wynika, że wzory teoretyczne są zasadniczo niesłuszne, przyczem ma to miejsce zarówno przy uważaniu za koniec t_2 chwili rzeczywistego zgaszenia, jak chwili wystąpienia V_{min} , lub rzeczywistego zaniku (w sposób asymptotyczny!) prądu i .

2. Nie można ściśle przewidzieć granic WR 1. rodzaju. Naogół prądy graniczne WC, przy których następuje przejście do WR 1., leżą na opadającej części charakterystyki statycznej, położonej najbliżej do osi napięć. Największy prąd graniczny zasadniczo nie przekracza wielkości, odpowiadającej przejściu od charakterystyki opadającej do podnoszącej się.

3. Największa chwilowa wartość prądu i w czasie WR 1. jest tem większa, im większe jest wyrażenie $C_k(V_{max} - V_{min})$.

4. WR 3. mogą zachodzić w dużych obszarach prądów i_z i mogą być łatwo wzięte za WR 1. Wniosek powyższy jest sformułowany w niniejszym referacie po raz pierwszy.

Przejrzymy teraz metody pomiarowe, korzystające z WR 1. rodzaju, i wskazania praktyczne, wynikające z wniosków ogólnych. Ważniejsze zastosowanie WR 1. są następujące:

a) pomiar oporności i pojemności. Dwie metody: obliczanie wielkości mierzonej ze wzorów teoretycznych (Kurcz, Würschmidt²²⁾); określanie — przez podstawienie, przyczem wskaźnikiem osiągnięcia tego samego stanu UWR jest częstotliwość (Geffcken i Richter).

b) Pomiar fotoelektryczne. Należy tutaj metoda J. H. J. Poole'a, polegająca na zastąpieniu oporu R przez komórkę fotoelektryczną i wykorzystująca zależność częstotliwości od prądu zasilania.

c) Wytwarzanie błysków światła o określonej częstotliwości. Zastosowanie do metod stroboskopowych (np. do pomiaru poślizgu silników asynchronicznych).

d) Wytwarzanie linjowych osi czasu w oscylografach katodowych.

e) Wytwarzanie prądów zmiennych (największa osiągalna częstotliwość ok. 6 000 okr./sek).

Wskazania praktyczne są następujące: ad a, b, c, e. Korzystanie z wzorów teoretycznych na f jest naogół niedopuszczalne. Można je stosować tylko wtedy, gdy sprawdziło się niezmiennosc stałych ($const_1$, $const_2$...) i określiło ich wartości doświadczalnie. Wtedy jednak wzory mają już charakter empiryczny.

ad d. Linjowość przebiegu napięcia na ES (w czasie), uzyskiwana dzięki stosowaniu układu 2, jest zachowana tyl-

¹⁷⁾ Nazwy „WR 4, 6...” zostały zarezerwowane dla WR grających taką rolę w stosunku do WR 3, 4..., jaką grają WR 2. względem WR 1. WR 4. występują np. na granicach zakresów WR 3 (patrz dalej) i różnią się od WR 3. b. małą amplitudą zmian i i v .

¹⁸⁾ Trudno bez specjalnych badań osądzić, czy ostatnio wzmiankowane wyładowania nie odpowiadają czasem WR 1. na charakterystyce „korony”, odkrytym przez Clarksona ([16], str. 130). Zresztą sprawa ta nie jest ważna dla miernictwa; to samo dotyczy przypisywania wyładowaniom ciągłym dla najmniejszych prądów (rys. 13) charakteru wyładowań Townsenda czyli „korony” (Seeliger i Schmekel [7]).

¹⁹⁾ Zwolennikiem tej teorii jest Seeliger [19].

²⁰⁾ Istnienie tej charakterystyki dla małych C_k wskazuje jeszcze raz na niesłuszność zapatrywania Vallego, widzącego źródło WR w nieciągłości charakterystyki statycznej.

²¹⁾ Opornik szeregowy 10 k Ω , włączony w szereg z ES, miał pewien wpływ modyfikujący na wielkość zakresu WC, leżącego między obszarami WR 1. i WR 3. Przy stosowaniu tego opornika b. wąski zakres WC występował nawet dla $C_k = 0.1\text{ }\mu\text{F}$.

²²⁾ Literatura zastosowań WR znajduje się w pracach [24] i [25].

ko wtedy, gdy okres czasu między wystąpieniem V_0 i V_{min} jest krótki w stosunku do całego okresu ładowania.

ad e. Aby uzyskać duże wartości maksymalne prądu, należy stosować ES, dla których wyrażenie $C_k (V_z - V_0)$ (a więc i $C_k (V_{max} - V_{min})$ jest możliwie duże.

Referat niniejszy został opracowany w Zakładzie Miernictwa El. i Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej. Pod względem układu materiału, terminologii i oznaczeń wiąże się on z artykułem autora o metodzie prostownikowej, który będzie opublikowany w Przeglądzie El. w r. b.

Przy opracowywaniu niniejszego referatu autor korzystał z licznych rad i ułatwień ze strony p. prof. K. Drewnowskiego, za które składa Mu gorące podziękowanie.

LITERATURA.

1. Działy pomocnicze.

a) Wyładowania świetlące.

[1] Jakubowski, J. L. Zjawiska w rurach świetlanych z zimną katodą. Przegląd El. 1933, Nr. 9—11, publikacja Z. M. E. i W. N. Nr. 22.

b) Wyładowania ciemne, warunek Kaufmanna.

[2] Jakubowski, J. L. Podstawy fizyczne zastosowania iskierników do pomiaru wysokiego napięcia. Przegląd El. 1930, Nr. 19, 21, 23 i 24, publ. Z. M. E. i W. N. Nr. 10.

2. Prace specjalne.

[3] Herweg, J. Schwingungen und Hysteresis bei Glimmentladung. Phys. Zeitschr. XIII/1912, str. 633.

[4]²³⁾ Schallreuter, W. Ueber Schwingungserscheinungen in Entladungsröhren. Braunschweig, 1923.

[5] Mauz, E. i Seeliger, R. Ueber die dynamische Zündspannung der Glimmentladung. Phys. Zeitschr. XXVI 1925, str. 47.

[6] Geffcken, H. Zündspannung und Stabilität der intermittierenden Glimmentladung. Phys. Zeitschr. XXVI 1925, str. 241.

[7] Seeliger, R. i Schmekel J. Bemerkung über Gasentladungen bei sehr kleinen Stromstärken. Phys. Zeitschr. XXVI/1925, str. 471.

[8] Valle, G. Ueber die Zündspannung der Glimmentladung, zugleich Bemerkungen zu H. Geffckens Arbeit: „Zündspannung und Stabilität der Glimmentladung“. Phys. Zeitschr. XXVI/1925, str. 495.

[9] Dällenbach, W. Zur Frage der Stabilität von Gasentladungen. Phys. Zeitschr. XXVII/1926, str. 101.

[10] Penning, F. M. Ueber die intermittierende Glimmentladung in Neon. Phys. Zeitschr. XXVII/1926, str. 187.

[11] Friedländer, E. Ueber Stabilitätsbedingungen und ihre Abhängigkeit von Steuerorganen und Energiespeichern. Phys. Zeitschr. XXVII/1926, str. 361.

[12] Friedländer, E. Ueber Kippschwingungen, insbesondere bei Elektronenröhren. Arch. f. El. XVI/1926, str. 273; XVII/1926, str. 1.

[13] Dällenbach, W. Zur Frage der Stabilität von Gasentladungen. II. Phys. Zeitschr. XXVII/1926, str. 448.

[14] Valle, G. Die diskontinuierlichen Entladungen. Phys. Zeitschr. XXVII/1926, str. 473. (Monografia).

[15] Haak, E. Ueber Glimmlichtintermittenzen. Ann. der Physik. 84/1927, str. 119.

[16] Clarkson, W. The lag in electrical discharges. Phil. Mag. 4/1927, str. 121.

[17] Clarkson, W. Condenser discharges in discharge-tubes. Phil. Mag. 4/1927, str. 1002 i 1341.

[18] Bär, R. Die Glimmentladung. Handb. d. Physik, Geiger - Scheel, XIV, 1927, str. 175—182.

[19] Seeliger, R. Einführung in die Physik der Gasentladungen, Lipsk, 1927, str. 91—115.

[20] Seeliger, R. Allgemeine Eigenschaften der selbständigen Entladungen. Handb. d. Exp. Physik, XIII, 3, 1929, str. 76—89.

[21] Leyshon, W. A. Characteristics of discharge tubes under „flashing“ conditions as determined by means of the cathode ray oscillograph. Proc. Phys. Society, London 42/1930, str. 157.

[22] Rothe, A. J. Zur Frage der Restionen in der intermittierenden Glimmentladung. Phys. Zeitschr. XXXI 1930, str. 520.

[23] Franck, S. Messentladungsstrecken (Ionenstrecken), Berlin, 1931, str. 118 — 134 (Monografia).

3. Zastosowania wyładowań relaksacyjnych.

[24] Franck, S. patrz wyżej [23].

[25] Schröter, F. Die Glimmlampe und ihre Schaltungen. Lipsk, 1932.

²³⁾ Praca nieznana autorowi referatu.

BADANIA METODĄ MOSTKOWĄ PÓL ELEKTRYCZNYCH, WYTWARZANYCH PRZEZ FALE USKOKOWE.

Inż. Stanisław Szpor.

Streszczenie. W dalszym ciągu prac nad mostkiem fal uskokowych przedstawione są uzupełnienia teoretyczne w sprawie czułości metody. Opisany jest mostek na 300 kV i opracowane warunki stosowania sond kulkowych.

Dokładne badania ilościowe pól bez wyładowań, np. w iskierniku walcowym, dają zgodność z wzorami elektrostatyki. Rozważania teoretyczne nad polem elektromagnetycznym uzasadniają tę zgodność. Badania jakościowe pól na powierzchni izolatorów przy wyładowaniach niezupełnych pozwalają stwierdzić działanie wyładowań na rozkład pola,

wpływ biegunowości fali, zmianę wpływu wyładowań w ciągu przebiegu falowego.

Przed rokiem przedstawiono zasadę mostka fal uskokowych, zastosowanego do badania pól elektrycznych¹⁾. Dalszy ciąg prac nad tą metodą miał na celu rozszerzenie zakresu stosowania i wyjaśnienie niektórych własności pól elektrycznych nieustalonych w elementach o ograniczonych wymiarach geometrycznych, np. u powierzchni izolatorów i w iskiernikach.

¹⁾ St. Szpor. Przegl. El. 1933, str. 386.

I. Metoda mostkowa.

1. Schemat i zasada.

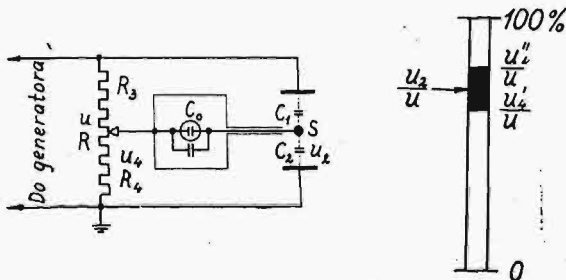
Rys. 1 przedstawia schemat mostka. Sprężenia między sondą S i elektrodami badanego układu izolacyjne przedstawiamy w postaci pojemności C_1 , C_2 , jeżeli w polu niema wyładowań, a wymiary pola są bardzo małe w porównaniu z długością czoła fali uskokowej; wyniki doświadczalne potwierdzają to założenie.

Pojemności C_1 , C_2 i oporności R_3 , R_4 potencjometru stanowią gałęzie mostka; przy równowadze lampa świetlająca w gałęzi zerowej nie zapala się, a napięcie rozpatrywanego punktu pola względem elektrody uziemionej w stosunku do napięcia międzyelektrodowego odpowiada wzorowi:

$$\frac{u_2}{u} = \frac{R_4}{R} \quad (1)$$

2. Czułość, zakres ciemny.

Jeżeli zmieniamy położenie zaczepu na potencjometrze, szukając punktu równowagi, to możemy dokładnie określić „zakres ciemny”, w którym lampa świetlająca nie zapala się (rys. 2). Dolna granica tego zakresu u , zależy



Rys. 1.

Rys. 2.

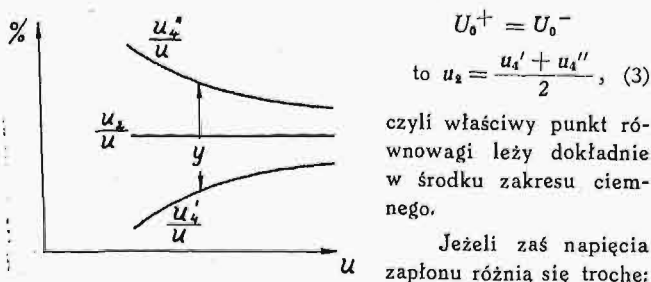
od napięcia zapłonu lampy przy pewnym znaku, np. U_0^+ , górna od napięcia zapłonu przeciwnego znaku U_0^- . Zachodzą przytem związki:

$$U_0^+ = \frac{C_1 + C_2}{C_0 + C_1 + C_2} (u_2 - u_4') \quad (2a)$$

$$-U_0^- = \frac{C_1 + C_2}{C_0 + C_1 + C_2} (u_2 - u_4'') \quad (2b)$$

gdzie u_2 jest napięciem w badanym punkcie pola bez wpływu układu pomiarowego.

Jeżeli napięcia zapłonu obu znaków są równe:



Rys. 3.

$$U_0^+ = U_0^-$$

$$\text{to } u_2 = \frac{u_4' + u_4''}{2}, \quad (3)$$

czyli właściwy punkt równowagi leży dokładnie w środku zakresu ciemnego.

Jeżeli zaś napięcia zapłonu różnią się trochę:

$$U_0^+ \neq U_0^-,$$

to, przyjmując u_2 wg. wzoru (3), popełniamy uchyb czułości $\frac{1}{4} y$, z, wyrażony w % napięcia u ,

$$\text{przyczem } y = \frac{u_4'' - u_4'}{u} 100\% \quad (4)$$

$$z = \frac{U_0^+ - U_0^-}{\frac{1}{2}(U_0^+ + U_0^-)} \quad (5)$$

Ponieważ potencjometr ma ograniczoną ilość zaczepów, pozwalającą na zmiany co $x\%$ napięcia u , przy określaniu granic u_4' , u_4'' występuje dodatkowy uchyb czułości, obciążający napięcie u_2 wg. wzoru (3). Sumaryczny uchyb czułości:

$$\frac{\Delta u_2}{u} 100\% = x + \frac{1}{4} yz \quad (6)$$

Dla uzyskania wymaganej czułości należy więc 1) zastosować odpowiednią ilość zaczepów na potencjometrze, 2) używać lamp o możliwie jednakich napięciach zapłonu, 3) ograniczyć szerokość zakresu ciemnego przez zmniejszenie C_0 .

Jeżeli zmieniamy u przy stałych innych warunkach, to wg. wzorów (2a), (2b) różnica $(u_4'' - u_4')$ pozostaje stała: względna szerokość zakresu ciemnego $y = \frac{u_4'' - u_4'}{u}$ zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do u . Krzywe graniczne $\frac{u_4'}{u}$, $\frac{u_4''}{u}$ jako funkcje u mają zatem przebiegi hiperboliczne (rys. 3).

Zbytne zważanie zakresu ciemnego jest niekorzystne, gdyż utrudnia szukanie punktu równowagi. Bardzo szeroki zakres ciemny grozi powstawaniem wyładowań z sondy na granicach zakresu, gdyż przy u_4' , u_4'' znacznie różniących się od u_2 sonda znacznie odkształca „naturalny” rozkład pola. Pozatem zbyt wielka szerokość zakresu ciemnego uniemożliwia określenie dolnej granicy dla punktów bliskich elektrody uziemionej i górnej dla punktów w sąsiedztwie drugiej elektrody. Dość korzystne warunki pracy uzyskuje się przy szerokości zakresu ciemnego wynoszącej kilka, a nawet kilkanaście %.

3. Dokładność.

Oprócz uchybu, wynikającego z wzorcowania potencjometru np. zapomocą mostka Wheatstone'a, występują źródła dodatkowych uchybów: pojemności szkodliwe, które bocznikują oporności potencjometru, indukcyjności, zjawiska falowe w przewodach łączących. Źródła te nie dają jednak poważniejszego uchybu systematycznego, na co wskazuje dobra zgodność wyników doświadczalnych z wzorami teoretycznymi elektrostatyki (dla iskiernika walcowego), jeżeli układ jest starannie opracowany: potencjometr bezindukcyjny i bezpojemnościowy, odpowiednio wykonany układ zerowy, krótkie przewody.

4. Praktyczne rozwinięcie metody.

Mostek dostosowano do generatora fal uskokowych na 300 kV. Potencjometr nawinięto bezindukcyjnie i bezpojemnościowo na rurze hefelitowej o długości ok. 1 m drutem chromonikielinowym \varnothing 0,15 mm, stosując podział na 200 odcinków, czyli umożliwiając regulację co 0,5%. Drut był prowadzony w toczonych rowkach, ażeby uniknąć przesunięć pod wpływem prądów znacznych (około 100 A), choć krótkotrwałych. Oporność potencjometru wynosiła 3385 Ω , a długość grzbietu fali około 5 μ sek.

Pojemność układu zerowego (wraz z doprowadzeniem do sondy) C_0 należy ograniczyć dla zwiększenia czułości; dlatego stosujemy możliwie krótkie doprowadzenie z cienkiego drutu na dość szerokiej rurze osłonnej. Sztuczne zmniejszenie czułości przy wielkich sondach (np. okuciach izolatorów wiszących) wymaga bocznikowania lampy świetlającej kondensatorami; zwiększa to wymiary osłony na układzie zerowym i zmusza do stosowania dłuższego doprowadzenia do sondy dla uniknięcia wpływu wielkiego układu zerowego na pole badane. Taki układ zerowy nie jest od-

powiedni dla małych sond i dlatego stosujemy w niektórych przypadkach mniejsze układy zerowe, nie pozwalające na włączanie kondensatorów. Stosując np. lampę Osram 11 Δ w osłonie o wymiarach \varnothing 20 mm \times 50 mm, otrzymano, przy doprowadzeniu z drutu miedzianego \varnothing 0,8 mm w ba-welnie, w rurce izolacyjnej i w rurce mosiężnej \varnothing 4 mm o długości 40 cm, pojemność $C_0 = 53 \mu\text{F}$, a przy długości 20 cm $C_0 = 31 \mu\text{F}$. Dzięki ograniczeniu C_0 można zastoso-wać sondę kulkową, znacznie dogodniejszą od wielkich sond prostych, pierścieniowych i okuciowych.

Wybitne ograniczenie pojemności C_0 można uzyskać przez uniknięcie doprowadzenia i umieszczenie lampy w samej sondzie. Taką sondę „lampową” wykonano z lampy Osram 11 Δ , owijając ją drobną siatką mosiężną, która stykała się z gwintem i stanowiła sondę o wymiarach \varnothing 14 mm \times 23 mm; do drugiej końcówki lampy był przy-lutowany przewód dla połączenia z potencjometrem. Na-leży przytem zwrócić uwagę na niebezpieczeństwo przedo-stawiania się pola do lampy bez pośrednictwa sprzężeń po-jemnościowych; pozatem sonda lampowa daje zwykle zbyt wielką czułość.

II. Badanie pól bez wyładowań.

1. Pomiary w iskierniku walcowym.

Przy pomocy dawnego zespołu do 50 kV wykonano szereg pomiarów pól, w których nie było dostrzegalnych wyładowań. Pomiary w układach izolacyjnych, dla których mamy proste wzory elektrostatyki, pozwoliły stwierdzić zgodność wyników doświadczalnych z teoretycznym roz-kładem elektrostatycznym. Po opracowaniu nowego zespo-łu na 300 kV wykonano znowu pomiary w iskierniku wal-cowym, ażeby jeszcze raz stwierdzić, że wyniki pomiarów odpowiadają wzorom elektrostatyki, i przekonać się, że w nowych warunkach (przy dłuższych przewodach łączących, większej oporności potencjometra i trochę innych szczegó-łach konstrukcyjnych) nie otrzymamy poważnych uchybów od pojemności szkodliwych, lub od przebiegów falowych w przewodach łączących.

Wykonano pomiary w iskierniku walcowym o promie-niu elektrody zewnętrznej $R = 7,5$ cm, wewnętrznej $r = 1$ cm, przy różnych odległościach x sondy od osi; sonda była prosta i płaska o wymiarach 0,5 mm \times 5 mm \times 160 mm. Przy $x = 3$ cm pomiary w różnych warunkach dały wyniki:

a) przy fali (—) i uziemionej elektrodzie zewnętrznej

$$\frac{u_2}{u} = 45,75 \%,$$

b) przy fali (+) i uziemionej elektrodzie wewnętrznej

$$54,5 = 100 - 45,5,$$

c) przy fali (+) i uziemionej elektrodzie wewnętrznej

$$54,75 = 100 - 45,25,$$

d) przy fali (+) i uziemionej elektrodzie zewnętrznej 45,25.

Zestawienie wyników doświadczalnych i przeliczonych wg. wzorów elektrostatyki jest podane w tabeli (napiecie względem elektrody zewnętrznej w %):

x cm =	2	3	4,5	6
Zmierzone %	0,6675	0,4544	0,2575	0,11
Obliczone %	0,655	0,454	0,254	0,1106

Otrzymana zgodność pozwala wyprowadzić wniosek, że pole wytworzone przez falę uskokową w układzie izola-

cyjnym o ograniczonych wymiarach ma w przypadku bez wyładowań przebieg bardzo zbliżony do elektrostatyczne-go, jest więc polem potencjalnym.

2. Rozpatrzenie wyników ze stanowiska teorii szybkozmiennego pola elektromagnetycznego.

Dla określenia przebiegów w zmiennym polu elektro-magnetycznym mamy 2 równania Maxwell'a:

$$\text{rot } \hat{H} = \varepsilon \frac{d\hat{K}}{dt} \dots \dots \dots (7)$$

$$\text{rot } \hat{K} = -\mu \frac{d\hat{H}}{dt} \dots \dots \dots (8)$$

gdzie K natężenie pola elektrycznego, H magnetycznego, ε stała dielektryczna, μ przenikalność magnetyczna (jedno-stki praktyczne; dla powietrza $\varepsilon = 0,08859 \cdot 10^{-12}$ F/cm, $\mu = 1,256 \cdot 10^{-8}$ H/cm).

Pierwsze równanie przedstawia zależność natężenia pola magnetycznego H od prądu przesunięciowego $\varepsilon \frac{dK}{dt}$ (prąd przesunięciowy wzbudza pole magnetyczne), drugie zależność K od zmian indukcji magnetycznej μH w czasie (w obwodzie zamkniętym pochodna strumienia magnetycz-nego względem czasu daje SEM-a).

Przy prądzie stałym niema zmiennego pola magnetycz-nego, $\text{rot } \hat{K} = 0$, pole elektryczne jest bezwirowe — po-tencjalne. Przy prądzie zmiennym pole może być wirowe szczególnie w przypadkach znacznego strumienia magne-tycznego, wzbudzanego przez wielkie prądy zmienne (obce, niezwiązane z prądem przesunięciowym); jeżeli pole ma-gnetyczne jest wywoływane tylko przez prądy przesunię-ciowe samego pola elektrycznego, to przy niskiej często-tliwości jest tak słabe, że $\text{rot } \hat{K}$ wypada bardzo mała wobec \hat{K} , pole elektryczne jest w przybliżeniu potencjalne.

Wirowość pola elektrycznego występuje wyraźnie w przebiegach szybkozmiennych. Korzystając z wzorów Max-well'a, można analitycznie określić przebieg pola elektro-magnetycznego w czasie i w przestrzeni w prostych przy-padkach [oscylator Hertz'a, anteny, fala płaska]. Zagad-nienie wirowości pola elektrycznego, wytworzonego przez falę uskokową w przestrzeni o ograniczonych wymiarach, można rozważyć na podstawie równań Maxwell'a, wpro-wadzając w dowodzeniu matematycznym pewne uproszcze-nia — dopuszczalne, jeżeli chodzi tylko o określenie rzędów wielkości.

Wg. pierwszego równania Maxwell'a całka linjowa wektora H wzdłuż obwodu zamkniętego równa się strumie-niowi wektora $\varepsilon \frac{dK}{dt}$ przez powierzchnię objętą obwodem:

$$\oint \hat{H} dl = \int \varepsilon \frac{d\hat{K}}{dt} d\hat{s}.$$

Aby określić rząd wielkości H , jaki wynika ze zmia-ny K , bierzemy wg. szkicu 4 drogę zamkniętą $\oint dl$, obej-mującą znaczną część pola o przekroju $\int ds$. Jeżeli wy-miary linjowe tej drogi zamkniętej są rzędu d , to rząd wielkości obwodu $\oint dl$ można ocenić na πd , przekroju $\int ds$ na $\frac{\pi}{4} d^2$.

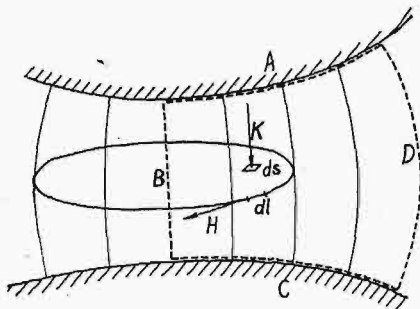
Operując rzędami wielkości H , K , jak wartościami średnimi, i zgruba traktując wektor K jako pro-stopadły do powierzchni ds , wektor H jako styczny do drogi dl , otrzymujemy wg. pierwszego równania Maxwell'a:

$$H = \varepsilon \frac{dK}{dt} \cdot \frac{\pi}{4} \frac{d^2}{\pi d} = \varepsilon \frac{dK}{dt} \cdot \frac{d}{4} \dots \dots (9)$$

Wg. drugiego równania Maxwell'a całka linjowa K wzdłuż obwodu zamkniętego równa się strumieniowi wektora $-\mu \frac{dH}{dt}$ przez powierzchnię objętą obwodem:

$$\oint \vec{K} \cdot d\vec{l} = \int -\mu \frac{d\vec{H}}{dt} \cdot d\vec{s}.$$

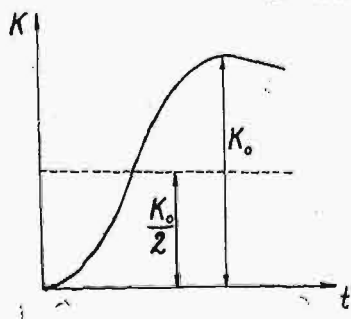
Gdyby nie było zmiennego pola magnetycznego, to całka linjowa K wzdłuż obwodu zamkniętego równałaby się 0; np. na rys. 4 całka linjowa K od punktu A przez B



Rys. 4.

do C (gruba linia przerywana) równałaby się całce od A przez D do B, pole byłoby potencjalne, jak elektrostatyczne. Wpływ pola magnetycznego jest taki, że do pola elektrycznego potencjalnego dodaje się wektor ΔK z pewnym znakiem w gałęzi B, z innym w gałęzi D, wskutek czego całka linjowa wzdłuż obwodu zamkniętego ABCD otrzymuje wartość różną od 0. Dla określenia rzędu wielkości ΔK postępujemy z drugim równaniem Maxwell'a podobnie, jak z pierwszym, zakładając wymiary linjowe rzędu d (jak poprzednio):

$$\Delta K = \mu \frac{dH}{dt} \cdot \frac{d^2}{4d} = \mu \frac{dH}{dt} \cdot \frac{d}{4} \dots (10)$$



Rys. 5.

Zależności (9) i (10) dają:

$$\Delta K = \epsilon \mu \frac{d^2 K}{dt^2} \cdot \frac{d^2}{16} \dots (11)$$

Ponieważ przebieg czoła fali jest trochę zbliżony do sinusoidalnego (rys. 5), można zgruba założyć;

$$K = \frac{K_0}{2} - \frac{K_0}{2} \cos \omega t \quad (12)$$

Podstawiając ten wzór w równaniu (11), otrzymujemy:

$$\Delta K = \epsilon \mu \omega^2 \frac{d^2}{16} \frac{K_0}{2} \cos \omega t \approx \epsilon \mu \cdot u^2 \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \cdot K_0 \cos \omega t \quad (13)$$

gdzie długość fali $\lambda = \frac{2\pi u}{\omega}$, gdzie $u = 3 \cdot 10^{10}$ cm/sek.

$$\text{Dla powietrza } \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = u, \Delta K = \left(\frac{d}{\lambda} \right)^2 \cdot K_0 \cos \omega t \quad (14)$$

Jeżeli wymiary rozpatrywanego pola są rzędu 1 m, λ około 30 m (bierzemy pod uwagę np. wielki izolator przy bardzo krótkim czołe fali), to:

$$\frac{\Delta K_{max}}{K_0} \approx \frac{1}{1000}.$$

Otrzymany wynik wskazuje, że pole elektryczne w badanych układach izolacyjnych o ograniczonych wymiarach nawet przy falach o bardzo krótkich czołach jest w przybliżeniu bezwzględnie, potencjalne, a zatem o przebiegu elektrostatycznym.

III. Badanie pól przy wyładowaniach niezupełnych.

1. Zastosowanie metody mostkowej do badań jakościowych.

Jeżeli nie ma wyładowań, to pole elektryczne, wytworzone przez falę uskokową na powierzchni izolatorów, w iskiernikach i w innych układach izolacyjnych o wymiarach niewielkich w porównaniu z długością czoła fali, ma przebieg zbliżony do elektrostatycznego. W czasie całego przebiegu stosunek napięcia między pewnym punktem pola i jedną z elektrod do napięcia międzyelektrodowego pozostaje jednak, określony elementarnymi pojemnościami pola. Metoda mostkowa pozwala w tym przypadku określić dokładnie ilościowo rozkład pola.

Jeżeli w polu występują wyładowania niezupełne, to prądy przewodzeniowe bocznikują prądy przesunięciowe, przyczem to działanie zmienia się w czasie całego przebiegu falowego. Możemy spodziewać się, że w tym przypadku stosunek napięcia jakiegoś punktu pola do napięcia międzyelektrodowego nie jest stały w ciągu całego przebiegu, podobnie jak przy wyładowaniach niezupełnych przy prądzie zmiennym o małej częstotliwości, kiedy przy sinusoidalnym napięciu międzyelektrodowym napięcie w dowolnym punkcie pola odbiega od sinusoidy²⁾.

Zastosowanie mostka w tym przypadku nie może dać dokładnych wyników ilościowych, ale wobec braku innej metody doświadczalnej pożądane są wyniki nawet tylko jakościowe dla rozstrzygnięcia szeregu zagadnień. Przedstawione wyniki doświadczalne mają służyć jako przykład stosowalności mostka dla badań przy wyładowaniach niezupełnych.

2. Krzywe graniczne zakresu ciemnego.

Rys. 6 przedstawia krzywe graniczne zakresu ciemnego przy obu znakach fal (+) i (—) dla porcelanowego izolatora deltowego firmy Rosenthal na 35 kV; pomiary wykonano dla punktu krańcowego środkowego klosza przy zastosowaniu sondy kulkowej o średnicy 14,2 mm; pojemność układu zerowego wynosiła 53 pF.

Widzimy, że ze wzrostem amplitudy napięcia międzyelektrodowego u krzywe graniczne coraz bardziej odbiegają od teoretycznych hiperbol rozkładu bez wyładowań; w rozpatrywanym przypadku obie krzywe odginają się ku górze, ale dolna krzywa silniej i przy niższych napięciach.

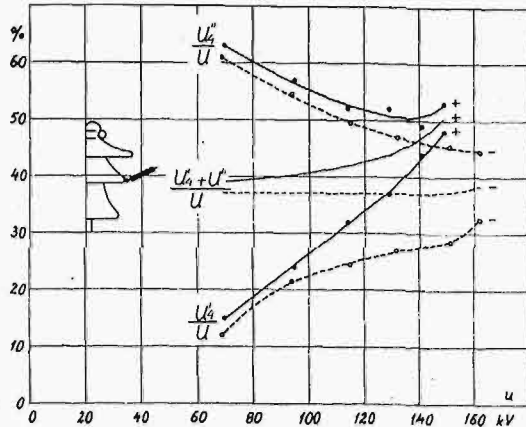
Własności te można wyjaśnić zmiennym działaniem wyładowań w przebiegu falowym. Na początku fali przy małych napięciach nie ma wyładowań; następnie wyładowania wprowadzają w pole ładunki z pewną szybkością; wpływ wyładowań zjawia się więc z pewną bezwładnością. W późniejszej fazie fali pole jest silnie odkształcone ładunkami przestrzennymi i powierzchniowymi, wskutek czego występuje dążność do przesunięcia krzywych granicznych od teoretycznych hiperbol (np. ku górze). Ponieważ jednak na początku fali przebieg pola jest więcej zbliżony do elektrostatycznego, zakres ciemny nie może sięgać bardzo daleko poza granice, jakie mielibyśmy przy rozkładzie bez wyładowań; dlatego jedna z krzywych granicznych odbiega od hiperboli teoretycznej stosunkowo mało (np. na rys. 6 krzywa górna). Widzimy to na rys. 6 szczególnie wyraźnie przy falach znaku (—).

Niewielkie różnice między wynikami pomiarów dla obu znaków przy niższych napięciach można przypisać uchy-

²⁾ Drewnowski, Szpor. Przegl. El. 1932, str. 1. Szpor, Miłodrowski. Przegl. El. 1932, str. 91, 114.

bowi czułości, znacznemu wobec wielkiej szerokości zakresu ciemnego (y we wzorze (6)).

Wpływ biegunowości fali jest bardzo znaczny. Przy falach (+) wyładowania więcej odkształcają rozkład pola i przy niższych napięciach, niż przy falach (—). Wyniki te są zgodne z niedawno ogłoszoną pracą o rozchodzeniu się jonów, wytworzonych przez koronę przy fali uskoko-



Rys. 6.

wej³⁾; przy fali o znaku (+) na przewodzie stwierdzono wpływ jonów w znacznie większej odległości od przewodu, niż przy znaku (—).

³⁾ Toriyama. ETZ 1933, str. 909.

Pomiary, wykonane w różnych punktach na powierzchni izolatorów, wskazują, że wpływ wyładowań jest silniejszy na krańcach kłosów, niż na dnie rowków międzykłosowych.

Wyniki.

1) Opracowano mostek fal uskokowych dla napięć do 300 kV bez poważniejszych trudności; zastosowanie dla wyższych napięć wydaje się łatwe.

Zastosowanie sondy kulkowej obok dawniej używanych sond większych okazało się możliwe przy odpowiednim wykonaniu układu zerowego.

2) Metoda mostkowa pozwala badać dokładnie ilościowo pole elektryczne bez wyładowań. Pomiary w polach o wymiarach niewielkich w porównaniu z długością czoła fali wykazują zgodność z rozkładem elektrostatycznym; badane pola są praktycznie bezwzględnie — potencjałowe, zgodnie z wynikami rozważań teoretycznych.

3) Przy wyładowaniach niezupełnych w polu badanym mostek może służyć tylko do badań jakościowych. Pomiary na izolatorach linowych wskazują, że wyładowania znacznie zmieniają rozkład pola, przyczem ten wpływ rośnie ze wzrostem napięcia; wpływ wyładowań jest silniejszy przy falach znaku (+) i zmienia się w ciągu przebiegu falowego.

Przedstawione badania laboratoryjne były ukończone we wrześniu 1933 r. w Zakładzie Wysokich Napięć Pol. Warsz. Kierownikowi Zakładu, P. Profesorowi Drewnowskiemu autor składa podziękowanie za umożliwienie pracy i cenne rady.

SEKCJA TELEKOMUNIKACYJNA

DZIAŁ RADJOTECHNIKI

Patrz zeszyt 9—10 „Przeglądu Radjotechnicznego”.