

1. Pomiar wysokiego napięcia.

Kwestja pomiaru napięcia nasuwa dość znaczne trudności przy napięciach bardzo wysokich. Stosowanie transformatorów miernikowych, dogodne przy napięciach średnich i niższych, tu staje się kłopotliwe ze względu na pokaźne wymiary, jakich te przyrządy wymagają ze wzrostem napięcia roboczego. Szczególnie niedogodnym byłoby stosowanie ich w urządzeniach laboratoryjnych o bardzo wysokiem napięciu, gdzie się ma do czynienia zwykle z niewielką względnie mocą. To też do pomiaru takich napięć stosuje się metody pomiarowe, nie wymagające użycia transformatorów miernikowych. Jedną z takich metod polega na mierzeniu miliamperomierzem na prąd stały prądu pojemnościowego, płynącego przez kondensator o znanej pojemności, po wyprostowaniu go w układzie kenotronowym lub przy pomocy prostownika mechanicznego¹⁾; inna — na zastosowaniu dzielnika napięcia w postaci kondensatorów, połączonych szeregowo, lub w postaci użytego do tego celu przepustowego izolatora kondensatorowego²⁾; przy innej wreszcie mierzy się napięcie wprost woltomierzami elektrostatycznymi, które wykonywane są już dla napięć do 300 i więcej kilowoltów.

Przyrządy pomiarowe, stosowane przy tych metodach, wskazują wogóle wartość całkową mierzonego napięcia, a więc w pierwszym z podanych przykładów — średnią, w innych — skuteczną; są więc wogóle czułe na odkształcenia fali i zmianę częstotliwości napięcia. Ma to szczególne znaczenie przy pomiarze napięć probierczych. Przy próbach bowiem wytrzymałości elektrycznej materiałów izolacyjnych miarodajną jest przeważnie wartość maksymalna (amplituda) napięcia, ponieważ od jej wysokości zależy przebieg ośrodka badanego, a kształt krzywej i częstotliwość w dość szerokich granicach posiadają

¹⁾ Por. J. Re y v a l: Les laboratoires à haute tension, Rev. Gén. de l'Electr. t. XVII, 1926.

²⁾ G. Ke i n a t h: Siemens Zeitschrift, 1926, zesz. 10 i 11.

wpływ nieznaczny. Braku tego nie posiada iskiernik pomiarowy, którego można z powodzeniem użyć do pomiaru napięcia. Wytrzymałość elektryczna powietrza, z uwzględnieniem wszelkich chyba możliwych czynników, została zbadana w stopniu wystarczającym do tego celu ¹⁾ ²⁾. Szczególnie wyróżniają się na tem polu prace F. W. Peek'a (juniora), wykonane w laboratorium Gen. El. Comp. w Pittsfield, (St. Zjedn. A. P.), doprowadzone do najwyższych dzisiaj napięć (2 miliony woltów) ³⁾.

Ze wszystkich możliwych kształtów używanych (płytki, ostrza, kule, walce) najczęściej na iskiernik pomiarowy nadają się kule o jednakowej średnicy. Elektrody płaskie, poza trudnością wykonania odpowiedniego kształtu krawędzi, musiałyby mieć przy wyższych napięciach wymiary bardzo znaczne; iskiernik walcowy jest niewygodny w manipulacji; najłatwiejszy do zbudowania — utworzony z ostrzy — jest niepewny ze względu na spalanie się ich i wrażliwość na wilgotność powietrza; jest on jednak dopuszczany do użycia przez niektóre przepisy (angielskie, szwajcarskie) dla napięć niższych (do 30 kV).

Wyniki pomiaru iskiernikiem, względnie charakterystyka iskiernika, t. j. zależność napięcia krytycznego od odstępów elektrod, zależy w dużym stopniu od całego szeregu czynników. Należało więc, w celu umożliwienia dostatecznie dokładnego pomiaru napięcia, warunki te ujednolicić. Pierwsi na polu normalizacji Amerykanie jako podstawę do tych przepisów wzięli wyniki badań Peek'a, wyżej wzmiankowane ³⁾. Projekt przepisów angielskich ⁴⁾ oraz przepisy szwajcarskie ⁵⁾ nie różnią się od nich tak co do ujęcia, jak i co do treści. Natomiast niemieckie ⁶⁾ różnią się wymiarami przepisanych kul, warunkami odniesienia (750 mm Hg i 20°C), nie dopuszczają, jak tamte, wo-

¹⁾ Por. W. O. Schumann: Elektrische Durchbruchfeldstärke von Gasen, str. 14. Berlin, 1923.

²⁾ F. W. Peek (jr.): Dielectric phenomena in high voltage engineering. Wyszło we francuskim przekładzie: Phénomènes diélectriques dans la technique des hautes tensions. Paryż, 1924.

³⁾ Journ. of the AIEE, 1915, str. 1033.

⁴⁾ Proposal of Brit. Comité for intern. rules for measurement of voltages with spheres gaps. 1925.

⁵⁾ Bulletin d'Association Suisse des Electr. 1923, str. 681.

⁶⁾ Vorschriftenbuch d. V. D. E. 14 Aufl. 1926, oraz ETZ, 1926, str. 594 i 862.

góle używania iskiernika igłowego i zakreślają granice stosowalności znacznie niższe; pozatem przewidują stosowalność iskiernika do pomiaru napięcia wielkiej częstotliwości i fal uskokowych.

Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna (C. E. I.) przy pracach nad przepisami, dotyczącymi wytrzymałości elektrycznej izolacji maszyn, izolatorów i t. d., zwróciła uwagę na znaczenie dokładnego określania napięcia probierczego, i na kongresie w Nowym Yorku, w 1926 r., zaleciła do międzynarodowego przyjęcia normy amerykańskie na pomiar wysokiego napięcia, jako podstawę do norm krajowych¹⁾.

Na tej podstawie zostały opracowane w Laboratorium Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej poniższe przepisy pomiaru wysokiego napięcia za pomocą iskiernika kulowego i są one tam stosowane w granicach rozporządzalnego napięcia (150 kV). Pod względem liczbowym oraz pod względem warunków pomiaru i specjalnych zaleceń nie różnią się one od amerykańskich. Układ zaś ich jest nieco odmienny, a forma bardziej praktyczna. Zostały one przedłożone Polskiemu Komitetowi Elektrotechnicznemu jako projekt norm polskich.

I. Iskiernik pomiarowy.

§ 1. Zasada działania. Jeżeli do iskiernika, utworzonego z dwóch izolowanych kul metalowych, umieszczonych w pewnym, dającym się zmieniać odstępie, zostanie przyłożone napięcie (stałe lub zmienne) i będzie zwolna i jednostajnie podnoszone, lub jeżeli kule będą powoli zbliżane, to pierwsze wyładowanie elektryczne, czyli *przeskok elektryczny*, między kulami nastąpi przy pewnej wartości napięcia, dającej się określić dostatecznie dokładnie. Przy dostatecznie dużych kulach wyładowanie to posiada postać łuku — o ile źródło napięcia ma dostateczną moc, lub iskry — o ile moc jest za mała.

Zależność napięcia, przy którym następuje wyładowanie, czyli *napięcia przeskoku*, od odstępów kul, czyli *przerwy iskrowej*, jest w określonych warunkach dostatecznie dokładnie wyznaczona. Dlatego iskiernik kulowy, przy zachowaniu odpowiednich warunków i uwzględnieniu wpływów postronnych, nadaje się do pomiaru wysokiego napięcia z dokładnością, wystarczającą dla celów technicznych.

¹⁾ C. E. I. — Publ. RM 36 z 1926 r.

Przy prądzie zmiennym, otrzymane wyniki dotyczą wartości maksymalnych, wartość skuteczną zaś można określić — znając kształt krzywej napięcia źródła prądu — dzieląc wartość maksymalną przez współczynnik amplitudy; n. p. w przypadku sinusoidy — przez $1/\sqrt{2}$, (Tablica II, podana w § 9 jest w ten sposób przeliczona).

§ 2. B u d o w a. *Iskiernik pomiarowy* normalny składa się z dwóch kul metalowych, izolowanych od siebie, umieszczonych w pewnym odstępnie, dającym się łatwo zmieniać i mierzyć. Normalna średnica kul iskiernika wynosi 62,5, 125, 250 i 500 mm.

Kule mają być wykonane z miedzi lub jej stopów w sposób dowolny (toczone, wytłaczane) lecz możliwie dokładny; muszą być dobrze wypolerowane, lecz nie niklowane lub t. p. Średnica nie może różnić się więcej niż o 0,5% od normalnej, a krzywizna, mierzona przy pomocy sferometru — więcej niż 1% od idealnej kuli danej średnicy; szczególnie tyczy się to strony przerwy iskrowej. Przy kulach, złożonych z dwóch czasz, szwy i wogóle wszelkie nieuniknione nierówności należy umieszczać możliwie zdala od przerwy iskrowej.

Pręty, na których kule są osadzone, mają mieć średnicę równą ok. $1/10$ średnicy kuli, powierzchnię nieizolowaną i łączyć się z kulami ze strony średnicowo przeciwległej przerwie iskrowej, możliwie bez pomocy wystających kołnierzy lub t. p. Uchwytu, trzymającego powyższy pręt, nie można umieszczać bliżej, niż w odległości jednej średnicy od kuli; ma on być możliwie mały i bez ostrych krawędzi i kantów.

§ 3. U s t a w i e n i e. Pomieszczenie, w którym ustawiono iskiernik, ma być możliwie wolne od kurzu i dymu (np. z papierosów). Iskiernik należy umieszczać w miejscu praktycznie wolnym od obcych pól elektromagnetycznych i elektrostatycznych, a wszystkie części obwodu prowadzić zdala od przerwy iskrowej; szczególnie tyczy się to przewodników o dużej powierzchni, jak np. oporniki. Wogóle wszystkie ciała obce, zarówno przewodniki jak izolatory, nie mogą się znajdować w mniejszej odległości od przerwy iskrowej niż dwukrotna średnica kuli; poza tem, gdy jedna z kul jest uziemiona, odległość przerwy iskrowej od ziemi, sufitu lub innej dużej powierzchni uziemionej (np. siatki ochronnej) nie może być mniejsza od pięciokrotnej średnicy kuli.

Kule iskiernika można umieszczać względem siebie w położeniu zarówno poziomem jak i pionowym. Ostatni układ nadaje się szczególnie, gdy jedna z kul ma być uziemiana; uziemia się wtedy dolną kulę.

§ 4. Połączenie. Iskiernik może być użyty albo w układzie symetrycznym (układ A); obie kule izolowane, środek uzwojenia wysokiego napięcia transformatora uziemiony; albo w niesymetrycznym (układ B): jedna z kul, a więc i odpowiedni biegun transformatora, uziemione. Nieuziemiania wogóle uzwojenia górnego napięcia należy unikać ¹⁾).

Iskiernik łączy się równolegle do badanego przedmiotu (np. izolatora) przez oporniki bezindukcyjne o ogólnej oporności 1 do 4 omów na jeden wolt nominalnego napięcia transformatora ²⁾). Pożądana jest możliwość regulacji oporności (zgruba), stosownie do używanego napięcia.

Przepis ten nie dotyczy oporników, włączonych w obwód wysokiego napięcia (lecz z pominięciem obwodu utworzonego przez iskiernik i przedmiot badany) w celu zmniejszenia prądu zwarcia w chwili przeskoku i zabezpieczenia uzwojeń transformatora od przepięć; oporność ich ma być tak dobrana, aby z jednej strony przeskok posiadał wyraźną postać łuku elektrycznego barwy żółto-różowej (nie iskier) i miał zdolność do utrzymania się na kulach (wzgl. izolatorze), z drugiej zaś strony, żeby prąd w chwili przeskoku nie przekraczał znacznie mocy źródła prądu.

Przy układzie A oporniki rozmieszcza się symetrycznie w obu gałęziach iskiernika, przy układzie B opornik, o całkowitej oporności przepisanej, umieszcza się w gałęzi nieuziemionej.

Oporniki mogą być metalowe lub płynowe. Używania do tego celu półprzewodników (grafit, silit i t. p.) nie zaleca się.

Przy wielkich częstotliwościach i falach uskokowych nie daje się oporników, iskiernik zaś umieszcza się możliwie blisko przedmiotu badanego.

§ 5. Zakres stosowania. Górną granicę stosowalności iskiernika w kilowoltach (wartości skuteczne napięcia sinusoidalnie zmiennego) w zależności od średnicy kul podaje Tablica I.

¹⁾ Ze względu na nieznany wówczas rozkład potencjałów.

²⁾ Oporniki mają na celu tłumienie przepięć, jakie przeskoki na kulach wywoływa na obiekcie badanym.

Tablica I.
Zakres stosowania.

Układ	Średnica kul w mm			
	62,5	125	250	500
A	80	150	260	500
B	75	135	240	460

Dolną granicę stosowalności stanowi 10 kV.

Korzystając z niżej podanej tablicy II (§ 9), lub wykonanych według niej wykresów, można dokonywać pomiaru napięcia iskiernikiem przy prądzie stałym, tętniącym, zmiennym o częstotliwości technicznej i przy wielkich częstotliwościach do 10^6 okr./sek. Dla częstotliwości ponad 10^4 okr./sek. granice stosowalności, powyżej podane, należy zmniejszyć o ok. 25%.

II. Pomiar.

§ 6. Regulowanie napięcia. Napięcie należy regulować w sposób ciągły. O ile większa dokładność nie jest wymagana, dopuszcza się regulowanie stopniowe, lecz stopnie mają być możliwie drobne. Przy stopniach nieprzekraczających $\frac{1}{2}\%$ mierzonego napięcia wyniki otrzymane mogą być obciążone błędem do 2% (przy stopniach 1% — błąd do 5%).

Do regulowania napięcia po stronie pierwotnej transformatora, najlepiej używać prądnicy o praktycznie sinusoidalnym przebiegu napięcia, ze wzbudzeniem regulowanym w sposób ciągły, np. przy użyciu opornika wodnego. Transformatory z regulowaniem stopniowym nadają się tylko przy stopniach dostatecznie drobnych. Natomiast regulowania napięcia przy pomocy dławików lub oporników, włączonych szeregowo, należy stanowczo unikać¹⁾.

§ 7. Określanie przekładni. W razie pomiaru napięcia, np. przy próbie izolatora, ustala się najpierw przekładnię transformatora dla pewnego napięcia V_1 , ok. 20% niższego od napięcia wymaganego przy próbie (np. napięcia przeskoku); czyni się to jednym ze sposobów niżej podanych, notując wskazanie v_1 woltomierza po stronie pierwotnej transformatora. Przekładnia będzie określona stosunkiem $\vartheta = v_1/V_1$. Należy przytem uważać, aby na przedmiocie badanym nie powstawały wyładowania ślizgowe; w razie ich zjawienia się należy ustalać przekładnię przy napięciu odpowiednio niższem. Następnie

¹⁾ Ze względu na odkształcenie krzywej napięcia.

kule rozsuwa się na odległość, odpowiadającą napięciu, ok. 15% wyższemu od napięcia próby, nie zmieniając niczego poza tem w obwodzie, a napięcie pierwotne podnosi się do wysokości $v_2 = \vartheta V_2$, gdzie V_2 jest napięciem żądanem.

§ 8. Sposób pomiaru. Przed pomiarem należy kule przetrzeć z kurzu i wywołać kilka przeskoków iskry w celu usunięcia cząstek kurzu z otoczenia. Częstsze polerowanie, nawet po wielu przeskokach, nie jest konieczne. Zaleca się, szczególnie przy niższych napięciach (mn. w. do 30 kV), sztuczne zjonizowanie przerwy iskrowej, np. przez naświetlanie promieniami pozafioletkowymi (lampa łukowa lub rtęciowa i t. d.).

Pomiar może być wykonywany w sposób dwójaki:

a) utrzymując stały odstęp kul—podnosi się zwolna napięcie do uzyskania przeskoku;

b) utrzymując stałe napięcie — zbliża się zwolna kule.

a) *Stała przerwa iskrowa.* Posługując się tablicami względnie wykresami według § 9, oraz uwzględniając poprawki § 10, nastawia się kule na odległość, odpowiadającą żądanemu napięciu. Napięcie przyłożone podnosi się zwolna i możliwie jednostajnie w ten sposób, by od mniej więcej 80% przewidywanego napięcia przeskoku, do chwili nastąpienia przeskoku, upłynęło ok. $\frac{1}{2}$ minuty. (Tyczy się to szczególnie napięć poniżej 30 kV przy braku sztucznego zjonizowania przerwy iskrowej). W chwili przeskoku notuje się odchylenie woltomierza (v_2), skąd określa się przekładnię transformatora według wzoru z § 7.

b) *Stałe napięcie.* W tym przypadku kule należy zbliżać powoli, począwszy od odległości ok. 10% większej od przypuszczalnej długości przeskoku; przy odstępach większych od 50 mm nie szybciej niż 1 mm na sekundę, przy mniejszych — odpowiednio wolniej. Zmierzywszy odstęp, przy którym nastąpił przeskok, określa się napięcie szukane z tablic, względnie z wykresów (§ 9), z uwzględnieniem poprawek (§ 10).

§ 9. Napięcie przeskoku dla kul w powietrzu przy 25°C, 760 mm Hg i 80% wilgotn. wzgl., dla prądu sinusoidalnego podaje następująca

Tablica II.
Napięcie przeskoku.

Napięcie kV skut.	Przerwa iskrowa w mm							
	62,5		125		250		500	
Średnica kuli w mm								
Układ	B	A	B	A	B	A	B	A
10	4.2	4.2	—	—	—	—	—	—
20	8.6	8.6	—	—	—	—	—	—
30	14.1	14.1	14.1	14.1	—	—	—	—
40	19.2	19.2	19.1	19.1	—	—	—	—
50	25.5	25.0	24.4	24.4	—	—	—	—
60	34.5	32.0	30.0	30.0	29	29	—	—
70	46.0	39.5	36	36	35	35	—	—
80	62.0	49.0	42	42	41	41	41	41
90	—	60.5	49	49	46	45	46	45
100	—	—	56	55	52	51	52	51
120	—	—	79.7	71	64	63	63	62
140	—	—	108	88	78	77	74	73
160	—	—	150	110	92	90	85	83
180	—	—	—	138	109	106	97	95
200	—	—	—	—	128	123	108	106
220	—	—	—	—	150	141	120	117
240	—	—	—	—	177	160	133	130
260	—	—	—	—	210	180	148	144
280	—	—	—	—	250	203	163	158
300	—	—	—	—	—	231	177	171
320	—	—	—	—	—	265	194	187
340	—	—	—	—	—	—	214	204
360	—	—	—	—	—	—	234	221
380	—	—	—	—	—	—	255	239
400	—	—	—	—	—	—	276	257
420	—	—	—	—	—	—	300	275
440	—	—	—	—	—	—	326	295
460	—	—	—	—	—	—	356	315
480	—	—	—	—	—	—	—	336
500	—	—	—	—	—	—	—	358

§ 10. Poprawki. Napięcie przeskoku zmienia się proporcjonalnie ze względną gęstością powietrza, t. j. wprost proporcjonalnie do prężności i odwrotnie do temperatury bezwzględnej; od wilgotności, w granicach praktycznych, nie zależy. Wobec tego, jeżeli pomiar wykonywa się w innych warunkach niż te, dla których są podane wartości w § 9, należy uwzględnić współczynnik poprawki:

$$\delta = \frac{b}{760} \cdot \frac{273 + 25}{273 + t} = 0,392 \frac{b}{273 + t}$$

gdzie b oznacza stan barometru w mm słupa rtęci, a t — temperaturę w stopniach C. Wartości współczynnika δ w granicach, normalnie spotykanych, podaje tablica III.

Tablica III.

Gęstość względna powietrza δ .

Temp. °C	P r e ż n o ś ć w m m Hg						
	730	735	740	745	750	755	760
2	1.041	1.048	1.055	1.062	1.070	1.076	1.083
4	1.033	1.040	1.047	1.054	1.061	1.068	1.076
6	1.026	1.033	1.040	1.047	1.054	1.061	1.068
8	1.018	1.025	1.032	1.039	1.046	1.053	1.060
10	1.011	1.018	1.025	1.032	1.039	1.046	1.053
12	1.004	1.011	1.018	1.025	1.032	1.039	1.045
14	0.997	1.004	1.011	1.018	1.024	1.031	1.038
16	0.990	0.997	1.004	1.011	1.017	1.024	1.031
18	0.983	0.990	0.997	1.004	1.010	1.017	1.024
20	0.977	0.983	0.990	0.997	1.003	1.010	1.017
22	0.970	0.977	0.983	0.990	0.997	1.003	1.010
24	0.964	0.970	0.977	0.983	0.990	0.997	1.003
26	0.957	0.964	0.970	0.977	0.983	0.990	0.996
28	0.951	0.957	0.964	0.970	0.977	0.983	0.990
30	0.944	0.951	0.957	0.964	0.970	0.977	0.983
32	0.938	0.945	0.951	0.958	0.964	0.970	0.977
34	0.932	0.939	0.945	0.951	0.958	0.964	0.970

a) *Pomiar przy stałym odstepie kul.* Wartość napięcia, które pragnie się uzyskać, dzieli się przez współczynnik δ i dla otrzymanej wartości znajduje się z tablicy lub wykresu odstęp, na który kule należy nawiązać.

b) *Pomiar przy stałym napięciu.* Zmierzywszy otrzymany odstęp kul, znajduje się z krzywej lub tablicy II (§ 9), odpowiadającą mu wartość napięcia przeskoku, w warunkach normalnych; pomnożysz ją przez współczynnik δ , otrzyma się rzeczywistą wartość napięcia.

O ile wymagana jest większa dokładność, oraz wogóle dla wartości znacznie różniących się od jedności (praktycznie poczynając od różnicy $\pm 0,05$), poprawka powyższa nie daje wystarczającej dokładności. Należy wtedy zamiast δ stosować inną poprawkę, (współczynnik δ'), uwzględniającą i średnicę kuli. Poprawkę tę oblicza się z następującego wzoru

$$\delta' = \delta \frac{1 + \frac{0,775}{\sqrt{D\delta}}}{1 + \frac{0,775}{\sqrt{D}}}$$

gdzie D jest średnicą kuli w cm, a δ — poprawką z Tabl. III.

za Wartości współczynnika δ' , w granicach normalnie chodzących, podane są w tablicy IV.

Tablica IV.

Poprawka δ' ze względu na średnicę kuli

δ	Średnica kul w mm			
	62.5	125	250	500
0.70	0.732	0.724	0.718	0.711
0.75	0.777	0.771	0.766	0.759
0.80	0.821	0.816	0.812	0.807
0.85	0.866	0.862	0.859	0.855
0.90	0.910	0.908	0.906	0.904
0.95	0.956	0.955	0.954	0.952
1.00	1.000	1.000	1.000	1.000
1.05	1.044	1.045	1.046	1.048
1.10	1.090	1.092	1.094	1.096

2. Normy na izolatory wysokiego napięcia *).

Uwagi i wymagania ogólne,

§ 1. Określenie pojęć. Izolator *stojący* umocowany jest od spodu, a przewód — zawieszony na szyjce lub główce izolatora.

Izolator *wiszący* umocowany jest u góry, a dźwiga przewód, zawieszony od dołu; jest on obciążony całą wagą przewodu.

Izolator *odciągowy* umocowany jest z jednego końca, a trzyma przewód, umocowany na drugim końcu; jest on obciążony naciągami przewodu.

Łańcuch izolatorów wiszących lub odciągowych składa się z szeregu *ogniw* izolatorowych.

Izolator *wielodzielny* składa się z kilku *porcelanek* lub *szklanek*, spojonych w jedną izolacyjną całość.

Okuciem izolatora nazywają się metalowe przybory, jako to *trzon*, *kołpak*, *wieszak* i t. d.

Napięciem nominalnem izolatora nazywa się najwyższe napięcie, dla którego izolator jest przeznaczony.

Przeskokiem nazywa się zjawisko świetlnego wyładowania elektrycznego naokoło izolatora.

Napięciem przeskoku nazywa się napięcie, przy którym powstaje połączenie obu biegunów łukiem świetlnym barwy żółtej.

Przebiciem nazywa się zjawisko wyładowania elektrycznego przez materiał izolacyjny nawskroś.

*) PPNE 8. Przyjęte przez PKE d. 12.III. 27. Obowiązują od 1 lipca 1927.