

Laboratoria wysokich napięć

Przeznaczenie:

- badanie układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia.

Laboratoria wysokich napięć dzielą się na:

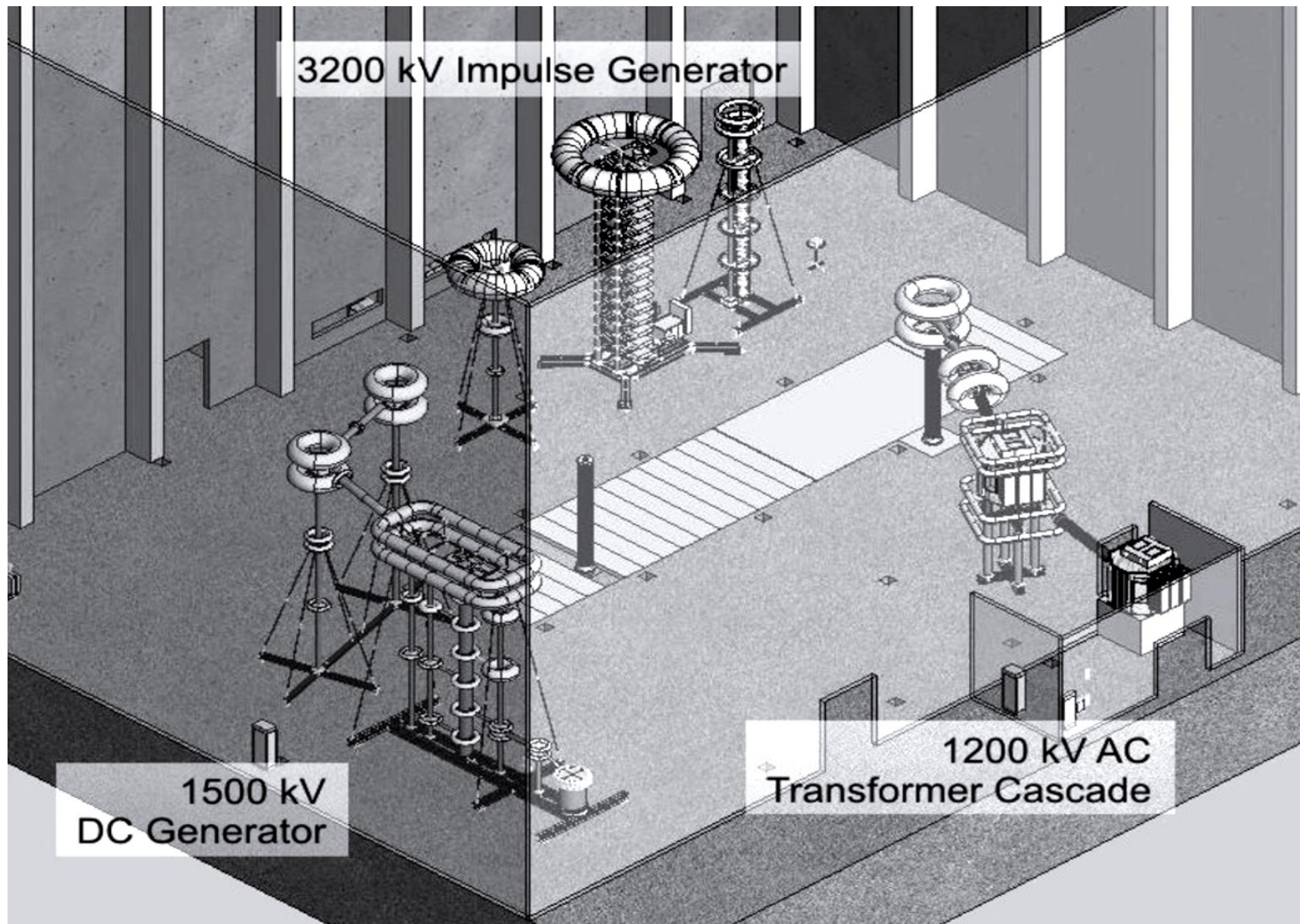
- naukowo-badawcze,
- naukowo-dydaktyczne,
- badawcze przemysłowe,
- stacje prób.

W laboratoriach naukowo-badawczych prowadzone są badania na modelach i gotowych obiektach w celu optymalizacji ich konstrukcji i technologii wytwarzania.

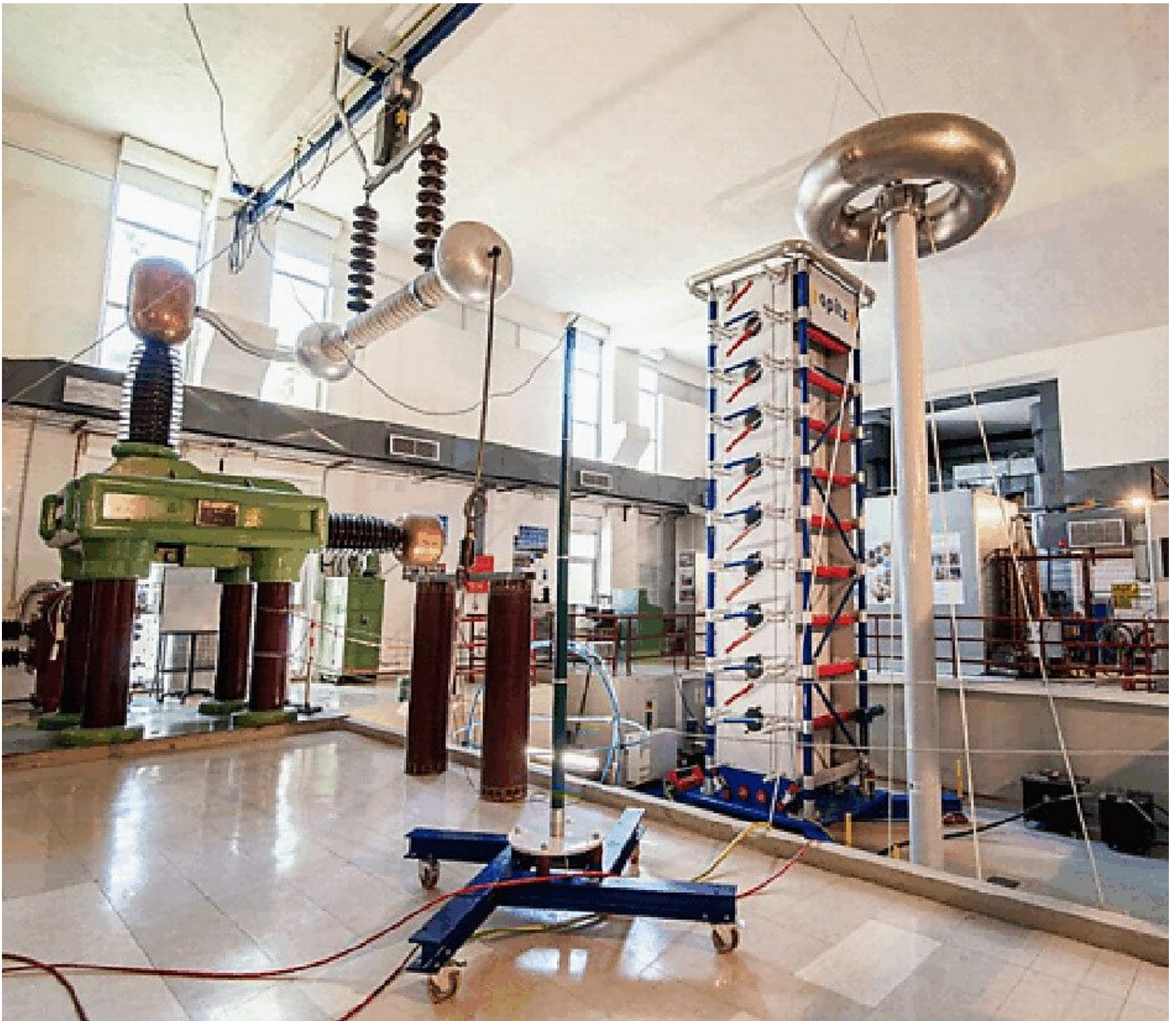
Laboratoria naukowo-dydaktyczne są wyposażone w stanowiska do badań eksperymentalnych, pokazów i ćwiczeń laboratoryjnych.

Przemysłowe laboratoria badawcze są wyposażone w stanowiska do badań międzyoperacyjnych oraz badań dla oceny procesu produkcyjnego.

W stacjach prób przeprowadza się badania w zakresie prób wyrobu i prób typu wyprodukowanych urządzeń elektroenergetycznych.



Ekranowane laboratorium badawcze ultra wysokiego napięcia (UHV) z kaskadą napięcia przemiennego 1200 kV, generatorem napięcia stałego 1500 kV i generatorem napięcia udarowego 3200 kV, wymiary hali 35 x 50 x 30 m³ (szer. x dł. x wys.), Drezno, rok budowy 2007.



Widok LWN w Narodowym Uniwersytecie Technicznym w Atenach

Zakres prac badawczych w laboratoriach wysokich napięć:

- badania wytrzymałości elektrycznej dielektryków stałych, ciekłych i gazowych przy różnych rodzajach napięcia probierczego,
- badania różnych form wyładowań elektrycznych, w tym wyładowań ślizgowych, ulotu elektrycznego, łuku elektrycznego,
- badania nad doбором maksymalnego napięcia roboczego różnych układów izolacyjnych,
- badania wpływu narażeń eksploatacyjnych w układach modelowych i na prototypach,
- pomiary przepięć piorunowych, łączeniowych i dorywczych w układach modelowych,
- badania w zakresie uziemień układów i urządzeń wysokiego napięcia,
- badania nad rozwojem i doskonaleniem wysokonapięciowych przyrządów i układów pomiarowych,
- badania rozkładu pola elektrycznego w układach izolacyjnych dla doboru naprężeń roboczych do wytrzymałości elektrycznej,
- badania oddziaływania pola elektromagnetycznego na środowisko,
- badania na pograniczu innych dziedzin, w tym głównie fizyki i chemii.

Podstawowe wyposażenie laboratoriów wysokich napięć

Układy probiercze (źródła napięcia i prądu probierczego):

- napięcia przemiennego: transformatory, układy kaskadowe,
- napięcia udarowego: generatory napięć udarowych piorunowych i łączeniowych,
- napięcia stałego: jedno- i wielostopniowe układy prostownikowe,
- prądu udarowego: generatory prądów udarowych.

Układy pomiarowe wysokiego napięcia:

- iskierniki kulowe (pomiar napięć przemiennych, stałych i udarowych),
- woltomierze elektrostatyczne,
- dzielniki rezystancyjne i pojemnościowe,
- układy pomiarowe prostownikowe,
- układy specjalne.

Aparatura pomiarowa, w tym między innymi:

- mostki wysokonapięciowe do pomiaru strat dielektrycznych,
- oscyloskopy,
- urządzenia do pomiaru wyładowań niezupełnych,
- mierniki natężenia pola elektrycznego.

Układy probiercze napięcia przemiennego

Próby urządzeń elektrycznych napięciem przemiennym należą do podstawowych i najbardziej powszechnych.

Zakres napięć probierczych: 1 kV do kilku megawoltów.

Źródłem napięcia probierczego może być:

- pojedynczy transformator (do 500 kV),
- połączenie kaskadowe kilku transformatorów,
- połączenie równoległo-kaskadowe kilku transformatorów.

Układ z pojedynczym transformatorem może wytwarzać:

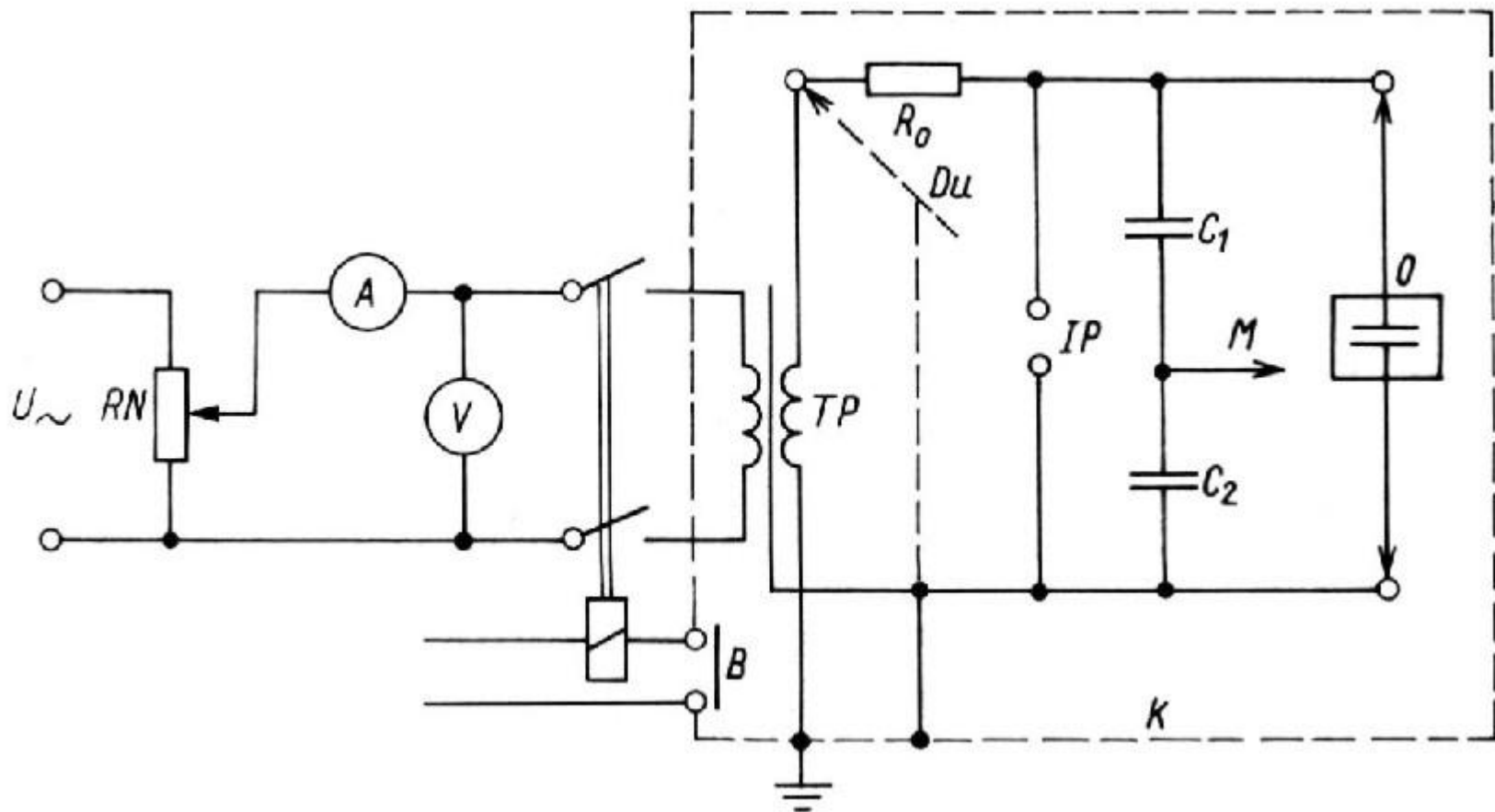
- napięcie probiercze symetryczne: obydwa bieguny uzwojenia WN są wyprowadzone, a jego środek jest uziemiony,
- napięcie probiercze niesymetryczne: jeden biegun uzwojenia WN jest wyprowadzony, a drugi uziemiony.

Wymagania dotyczące napięcia probierczego:

- współczynnik kształtu $k = \sqrt{2} \pm 5\%$,
- różnica wartości maksymalnych dodatniej i ujemnej $\leq 5\%$,
- częstotliwość w zakresie od 40 do 62 Hz.

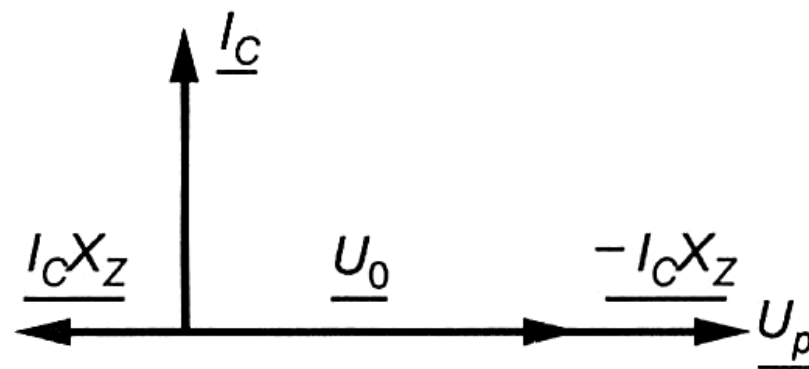
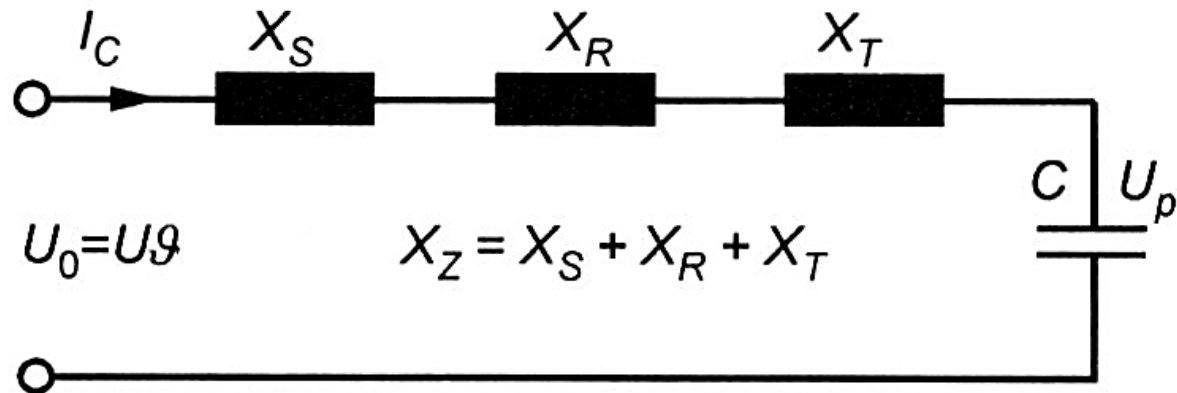
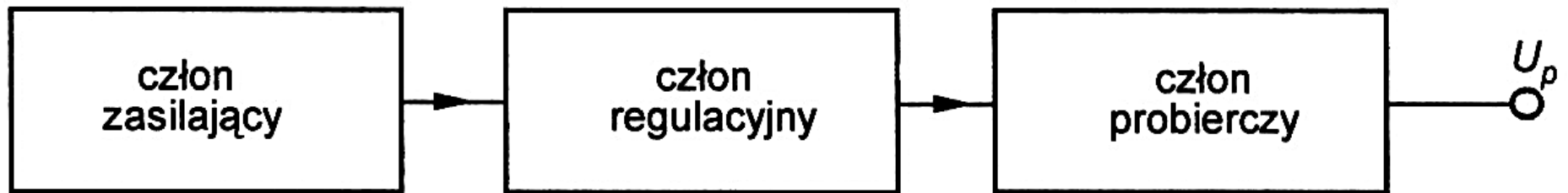
Układy probiercze napięć przemiennych

Uproszczony schemat wybranego układu probierczego napięcia przemiennego małej mocy.



RN - regulator napięcia,
 TP - transformator probierczy,
 B - blokada wejścia na pole WN,
 R_o - rezystor ograniczający,
 Du - drążek uziemiający,

IP - iskiernik pomiarowy,
 C_1 i C_2 - dzielnik napięcia,
 M - do miernika napięcia,
 O - obiekt badany,
 K - klatka ochronna (ogrodzenie).



Schemat blokowy i zastępczy zespołu probierczego oraz wykres wskazowy:

X_S , X_R , X_T - reaktancje członów,

U_0 - napięcie zasilające,

U_p - napięcie probiercze,

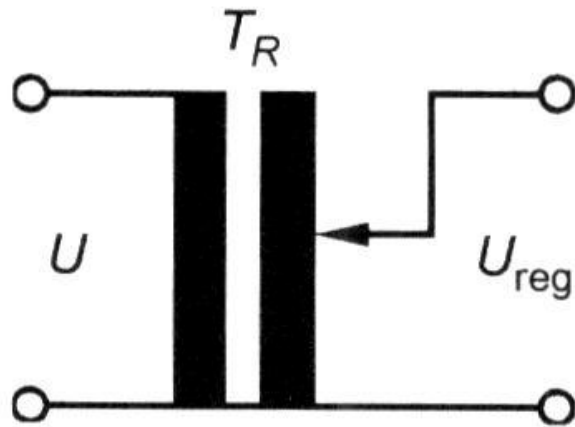
$\mathcal{G}$ - przekładnia napięciowa zespołu.

Człon zasilający:

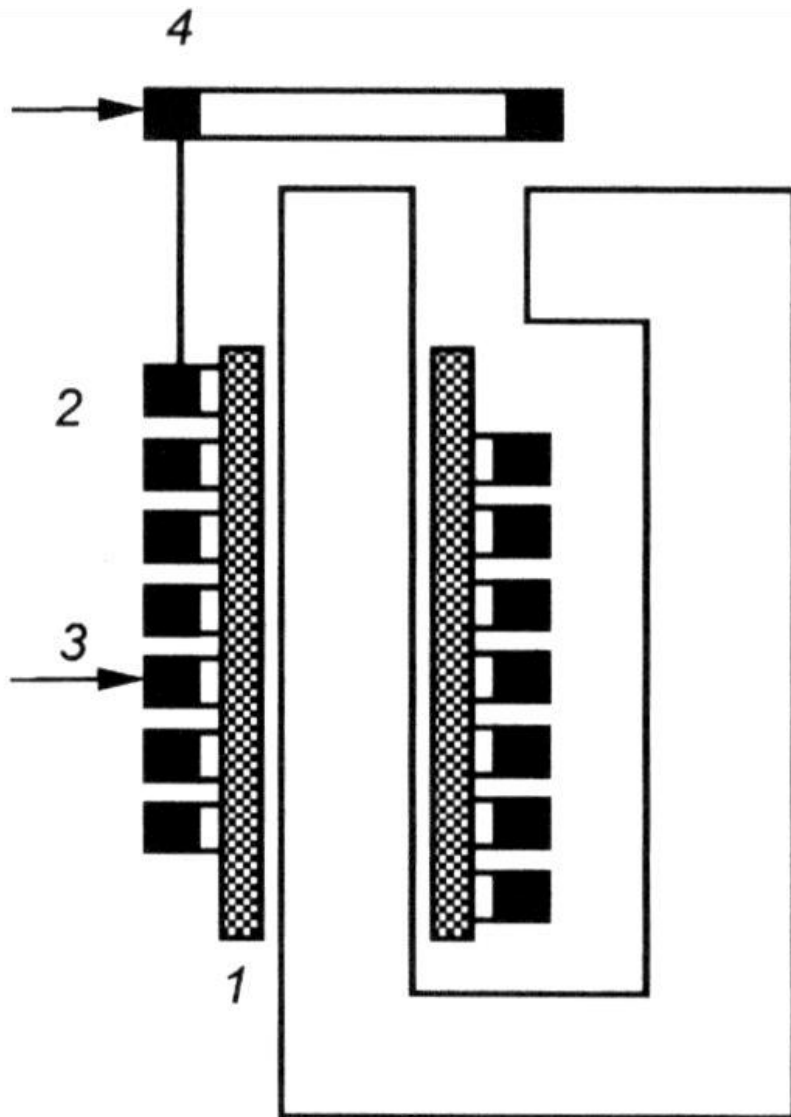
- sieć niskiego napięcia (przy małych mocach zespołu probierczego),
- specjalny transformator (przy dużych mocach zespołu probierczego).

Człon regulacyjny:

- autotransformator lub transformator 1-fazowy, ze stykiem przemieszczającym się osiowo ze zwoju na zwój,
- transformator Thoma, z obrotowym uzwojeniem regulacyjnym, ponad 100 kV·A,
- transformator regulacyjny z przesuwным rdzeniem i przeciwsobnymi uzwojeniami, do 1 MV·A,
- zahamowany silnik indukcyjny (regulator indukcyjny), do 100 kV·A,
- prądnica synchroniczna z regulacją wzbudzenia.

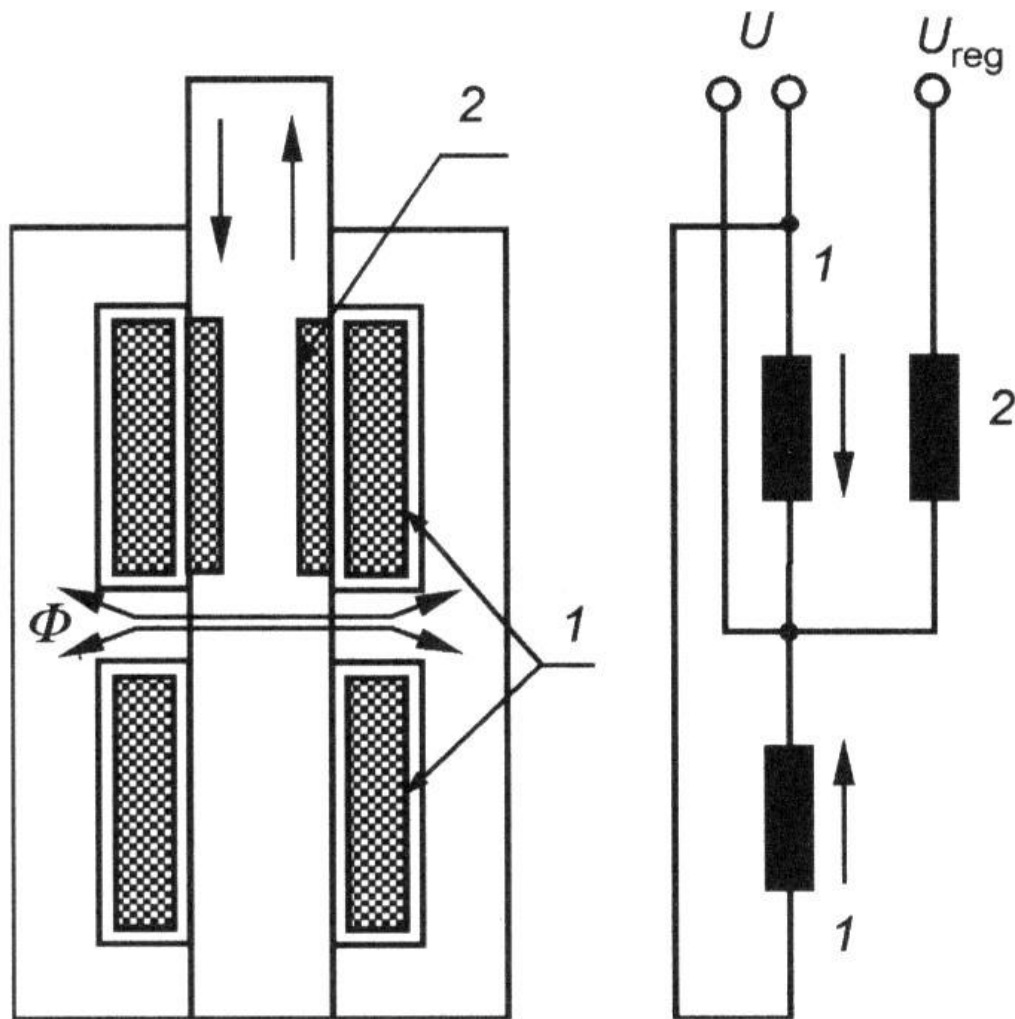


Schemat transformatora ze stykiem przemieszczającym się osiowo z przeskokiem ze zwoju na zwój uzwojenia wtórnego.



Schemat transformatora Thoma:

- 1 - uzwojenie pierwotne na kolumnie rdzenia ze szczeliną,
- 2 - uzwojenie wtórne obracające się wokół osi kolumny rdzenia,
- 3 - styk ruchomy przemieszczający się osiowo bez przeskoku ze zwoju na zwój,
- 4 - styk nieruchomy i pierścień ślizgowy połączony z uzwojeniem wtórnym.



Transformator regulacyjny
z przesuwanym rdzeniem:

- 1 - uzwojenia pierwotne,
przeciwsobne,
- 2 - uzwojenie wtórne na
rdzeniu przesuwanym

Uzwojenia pierwotne są umieszczone przeciwsobnie w oknach zewnętrznej (nieruchomej) części rdzenia.

Uzwojenie wtórne jest nawinięte na środkowej przesuwnej części rdzenia.

W położeniu górnym kolumny środkowej rdzenia (jak na rysunku), napięcie wtórne ma największą wartość.

W czasie przesuwania tej kolumny do położenia środkowego napięcie wyjściowe (regulowane) maleje, a po dojściu do tego położenia jego wartość wynosi zero.

Człon probierczy

Głównym urządzeniem zespołu probierczego jest jednofazowy transformator probierczy lub kaskada takich transformatorów.

Konstrukcja transformatora probierczego różni się od konstrukcji zwykłych transformatorów energetycznych.

Ma izolację o większej grubości, dużą przekładnię (~ 700). Jego praca ma charakter dorywczy przy obciążeniu pojemnościowym.

Moc znamionowa transformatora probierczego:

$$S_n = \omega C U_{pr}^2$$

ω - pulsacja napięcia,

C - największa spodziewana pojemność obiektu badanego i urządzeń pomiarowych, 0,01...100 nF,

U_{pr} - wartość skuteczna najwyższego napięcia probierczego.

Moc zwarciova zespołu probierczego:

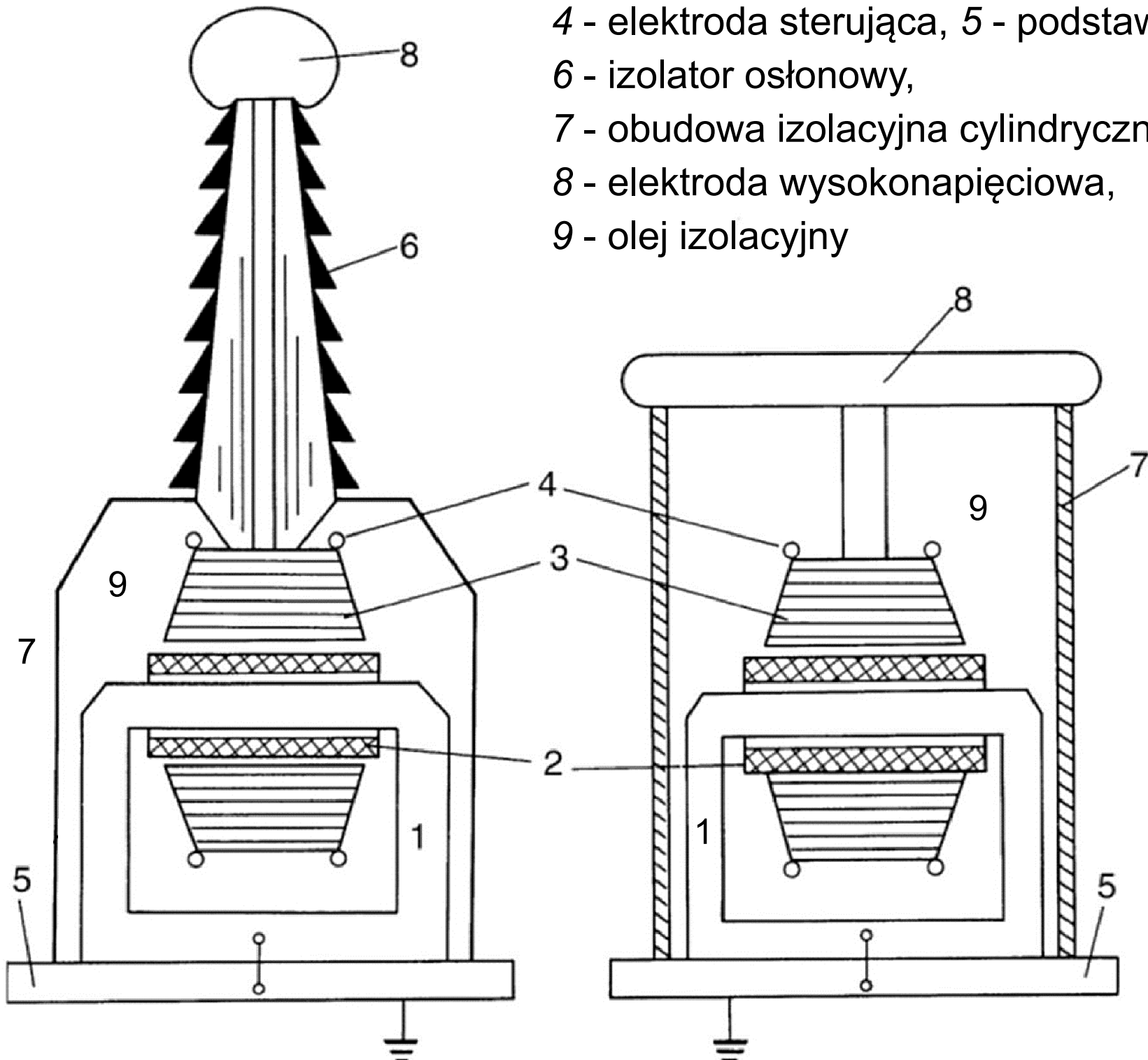
$$S_z = I_z U_{pr} = \frac{U_{pr}^2}{X_z}$$

X_z - reaktancja zwarciova całego zespołu probierczego,

I_z - prąd zwarciovy, 0,1...1 A (wyładowania w obiekcie).

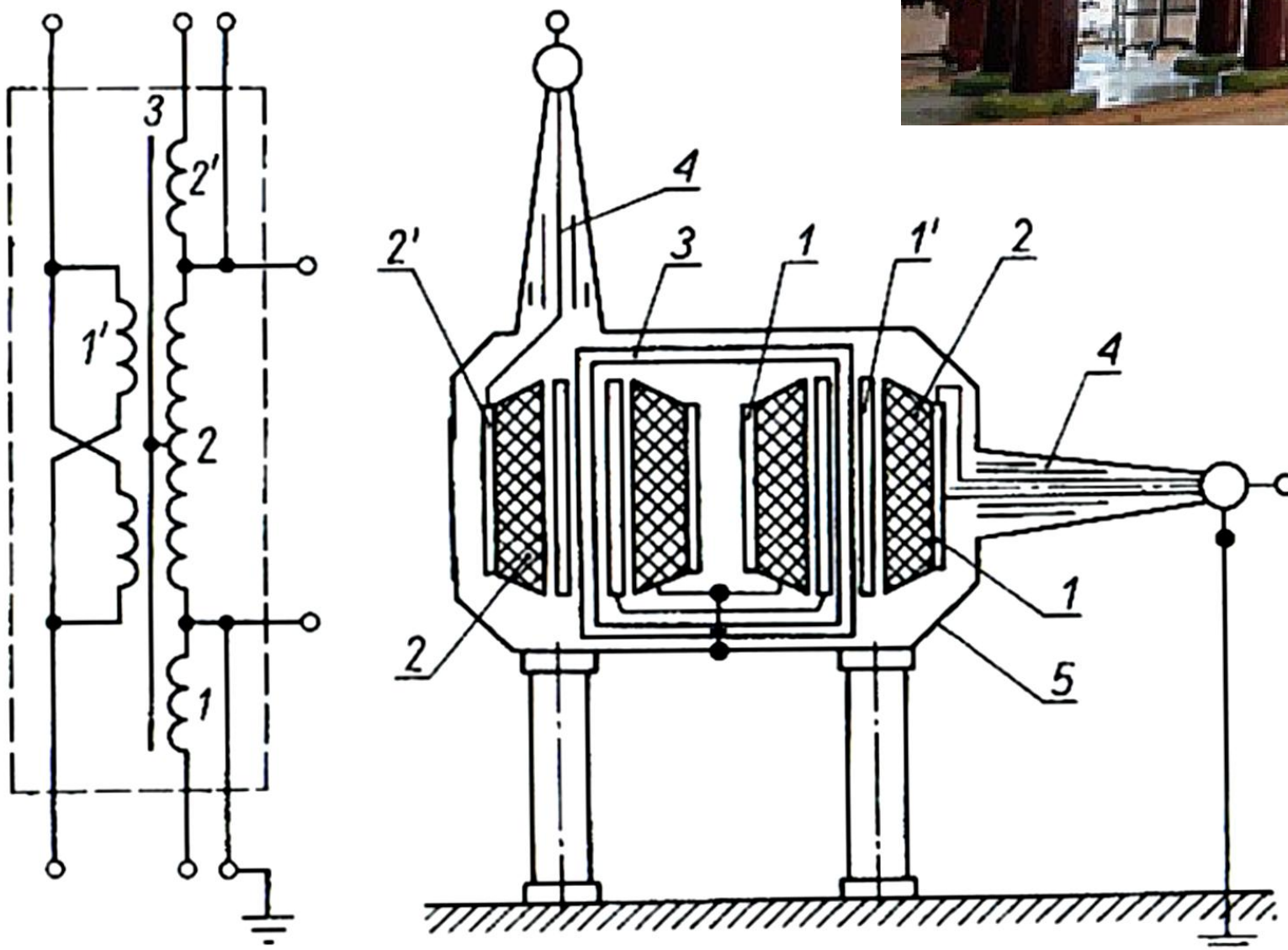
Pojedynczy transformator probierczy:

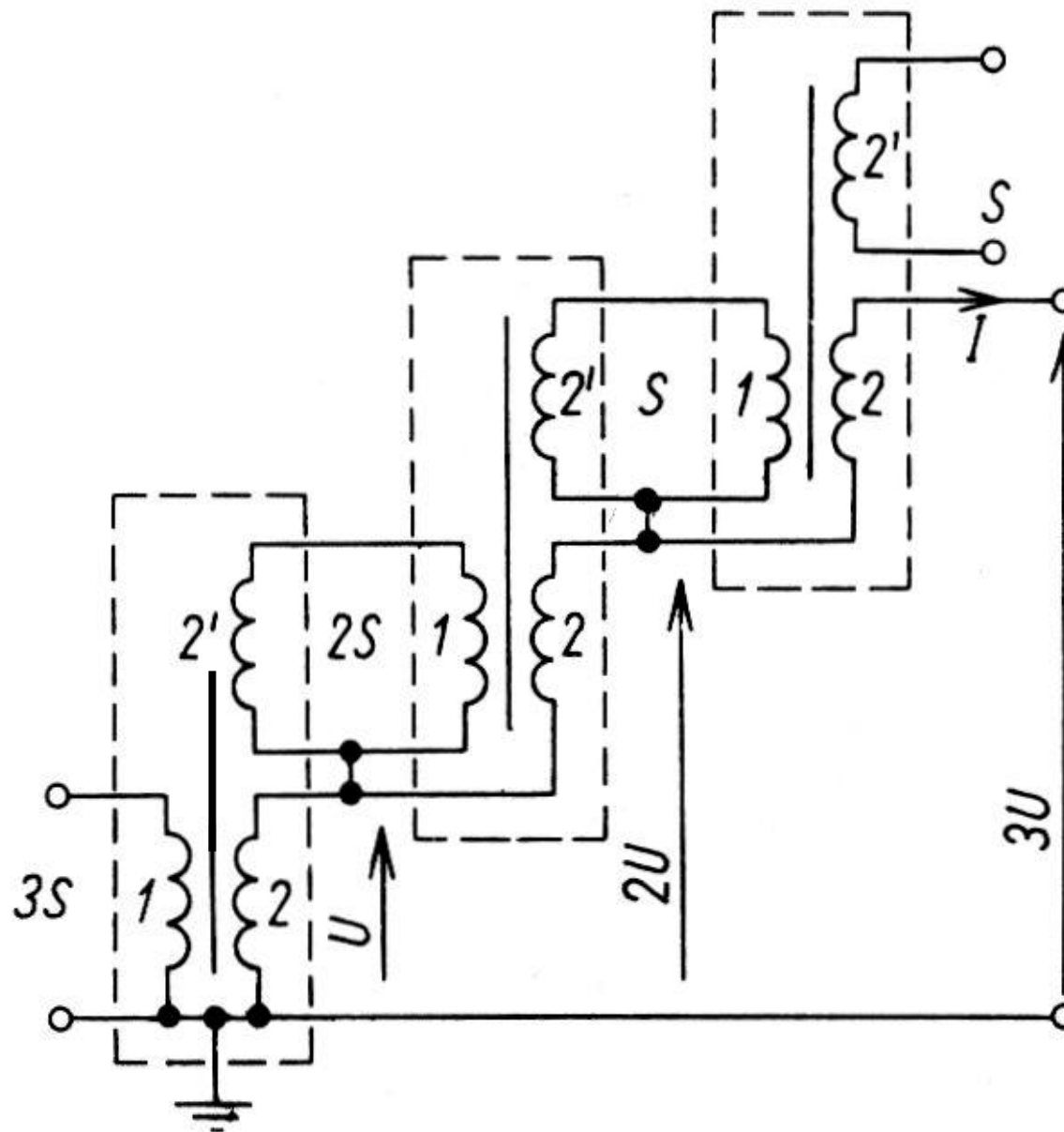
- 1 - rdzeń, 2 - uzwojenie dolnego napięcia,
 3 - uzwojenie górnego napięcia,
 4 - elektroda sterująca, 5 - podstawa,
 6 - izolator osłonowy,
 7 - obudowa izolacyjna cylindryczna,
 8 - elektroda wysokonapięciowa,
 9 - olej izolacyjny



Schemat transformatora probierczego z uzwojeniem WN połączonym w środku z obudową i rdzeniem:

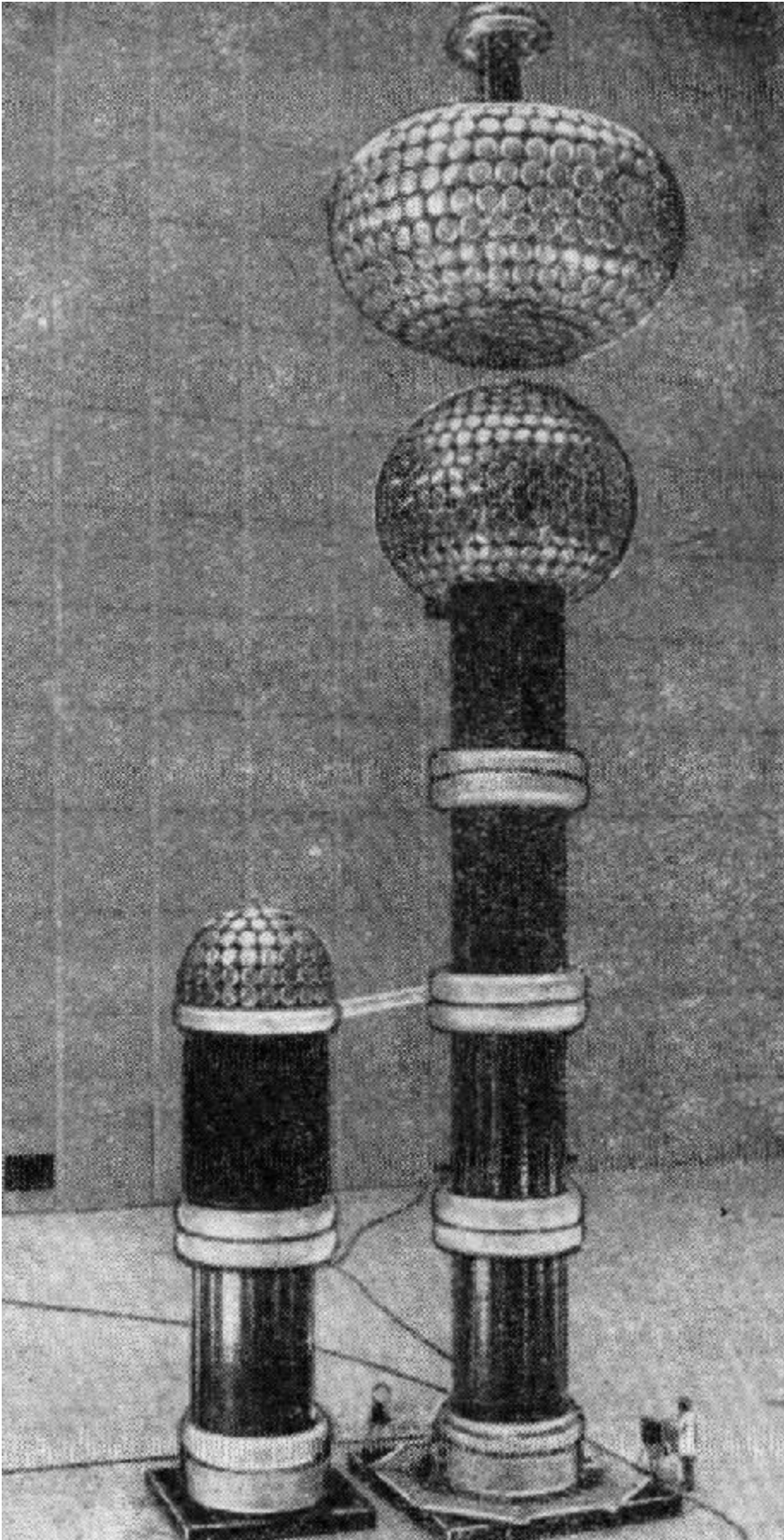
- 1 - uzwojenie dolnego napięcia,
- 1' - uzwojenie kompensacyjne,
- 2 - uzwojenie górnego napięcia,
- 2' - uzwojenie sprzęgające,
- 3 - rdzeń,
- 4 - izolator przepustowy,
- 5 - obudowa.





Uproszczony schemat transformatora probierczego kaskadowego trójstopniowego:

- 1 - uzwojenie dolnego napięcia,
- 2 - uzwojenie górnego napięcia,
- 2' - uzwojenie sprzęgające.

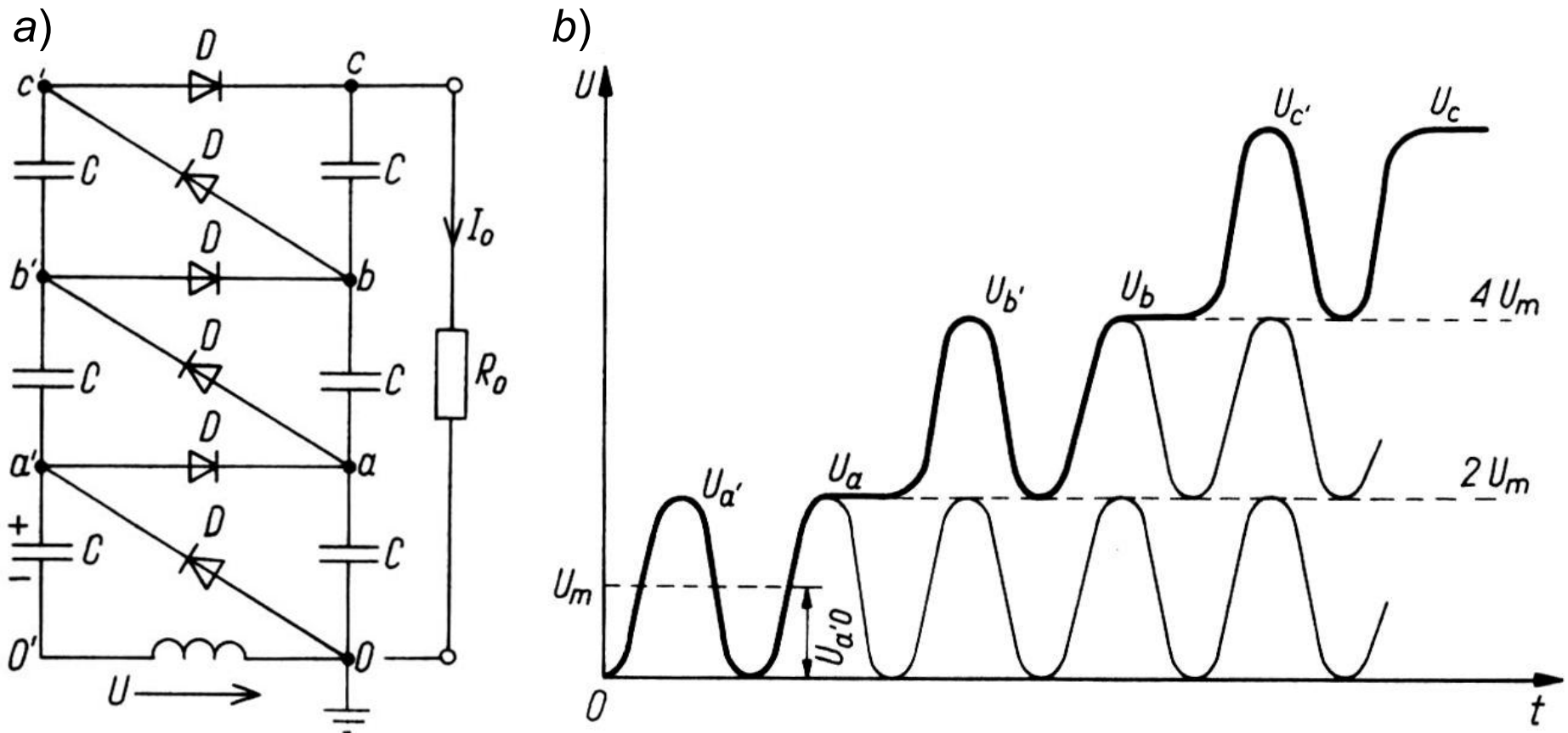


Kaskada 2 transformatorów
probierczych po 125 kV

Kaskada 4-stopniowa
złożona z sześciu
transformatorów
probierczych po 550 kV

Zespół probierczy napięcia stałego

Napięcie wyprostowane o wartości większej niż amplituda napięcia zasilania można uzyskać w układach podwajających i kaskadowych (wielostopniowych, powielających).



Przesunięte o stałą wartość U_m napięcie $U_{a'}$ jest wykorzystywane do ładowania kondensatora C do wartości $2U_m$, która pozostaje stała.

Dołączenie kolejnych członów dwuprostownikowych zwiększa kaskadowo wartość napięcia na każdym członie o $2U_m$.

W rzeczywistych układach, gdy występują straty i jest przyłączony odbiornik, napięcie probiercze jest mniejsze i pulsujące.



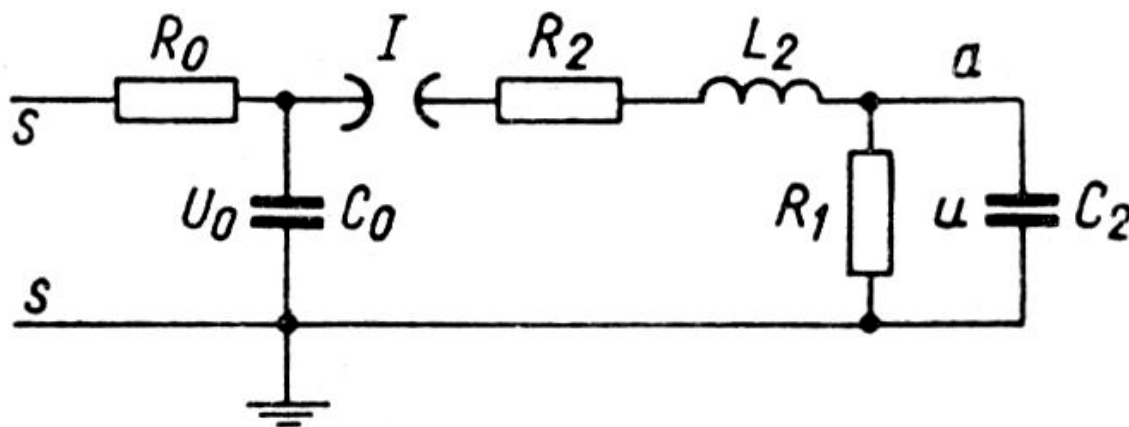
Generatory napięcia stałego 2 MV i 1,2 MV połączone z dzielnikami napięcia stałego

Zespół probierczy napięcia udarowego

Generator uderów napięciowych piorunowych - jednostopniowy

Źródłem napięcia stałego U może być zasilacz, z którego przez rezystancję R_0 jest ładowana pojemność C_0 do napięcia U_0 .

Gdy napięcie U_0 przekroczy wartość napięcia wytrzymywanego przez iskiernik I , następuje przeskok iskry inicjujący rozładowanie kondensatora C_0 i jednocześnie ładowanie kondensatora C_2 .

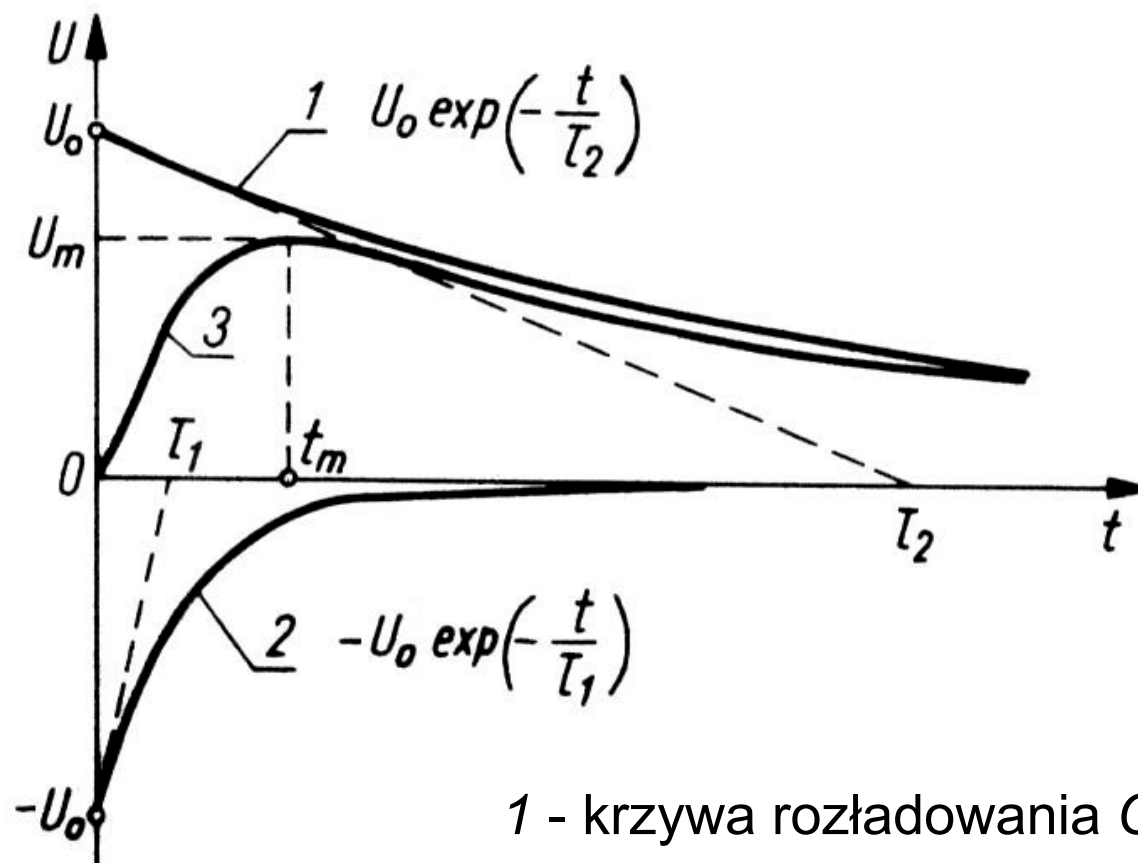


Schemat układu
jednostopniowego
generatora uderów
napięciowych

Etapy pracy generatora:

- ładowanie kondensatora C_0 przez R_0 ze źródła napięcia stałego,
- przeskok iskry w iskierniku I ,
- rozładowanie C_0 przez R_1 (R_2 i L_2 - pomijalnie małe),
- szybkie ładowanie C_2 przez R_2 (L_2 - pomijalnie małe).

Przebiegi napięcia w czasie pracy generatora uderów



- 1 - krzywa rozładowania C_0 ,
- 2 - krzywa ładowania C_2 ,
- 3 - krzywa wypadkowa (udar napięciowy).

Stałe czasowe rozładowania pojemności C_0 i ładowania pojemności C_2 są równe w przybliżeniu:

$\tau_1 \sim R_2 C_2$ stała czasowa narastania czoła udaru,

$\tau_2 \sim R_1 C_0$ stała czasowa opadania grzbietu udaru.

Przez dobór wartości R_1 , R_2 , C_1 i C_2 można uzyskać odpowiedni kształt udaru.

Dla uderów znormalizowanych, piorunowych i łączeniowych:

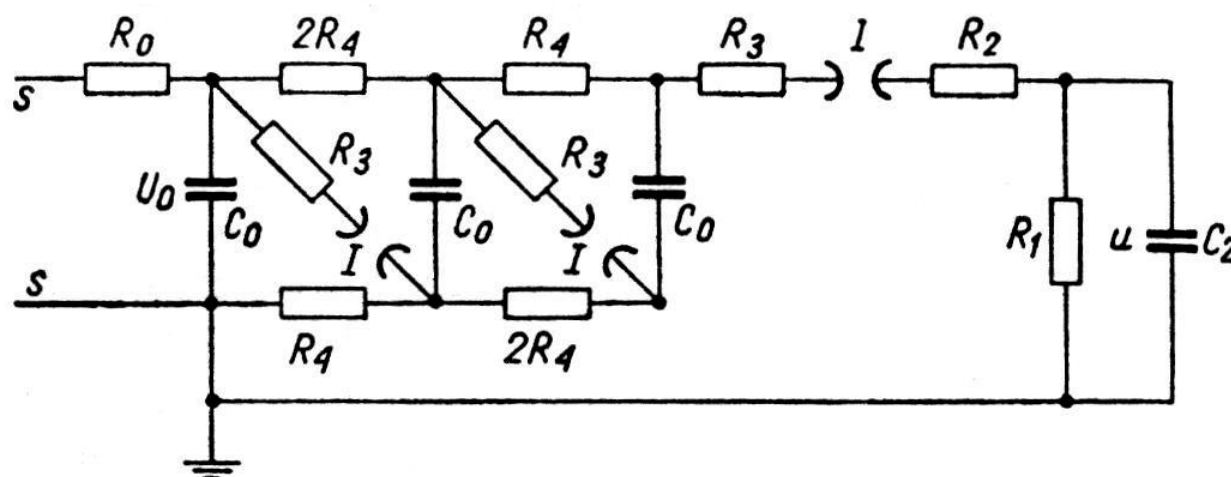
$$T_1/T_2 = 1,2/50 \quad \text{wymaga: } \tau_1 = 0,405 \mu\text{s}, \quad \tau_2 = 68,2 \mu\text{s}$$

$$T_1/T_2 = 250/2500 \quad \text{wymaga: } \tau_1 = 104 \mu\text{s}, \quad \tau_2 = 2880 \mu\text{s}$$

Sprawność napięciowa generatora i jego energia:

$$\eta = \frac{U_m}{U_0} \approx \frac{C_0}{C_0 + C_2} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad W = \frac{C_0 U_0^2}{2}$$

Generator uderów napięciowych piorunowych - wielostopniowy



Uproszczony schemat trzystopniowego generatora uderów napięciowych

Kondensatory o pojemności C_0 poszczególnych stopni są ładowane równolegle ze źródła przez rezystory R_0 i R_4 .

Po przekroczeniu napięcia wytrzymywanego iskierników następuje ich zapłon, zapoczątkowany zwykle przez iskiernik od strony źródła.

Układ zostaje przełączony z równoległego na szeregowy, $R_4 \gg R_3$. Występujące na kondensatorach C_0 napięcia sumują się.



Wielostopniowy generator
napięciowych uderów
piorunowych 3,4 MV
z dzielnikiem napięcia



Generatory wysokiego napięcia:

(a) przemiennego 1000 kV, Cottbus Technical University,

(b) stałego 1500 kV, HSP Cologne,

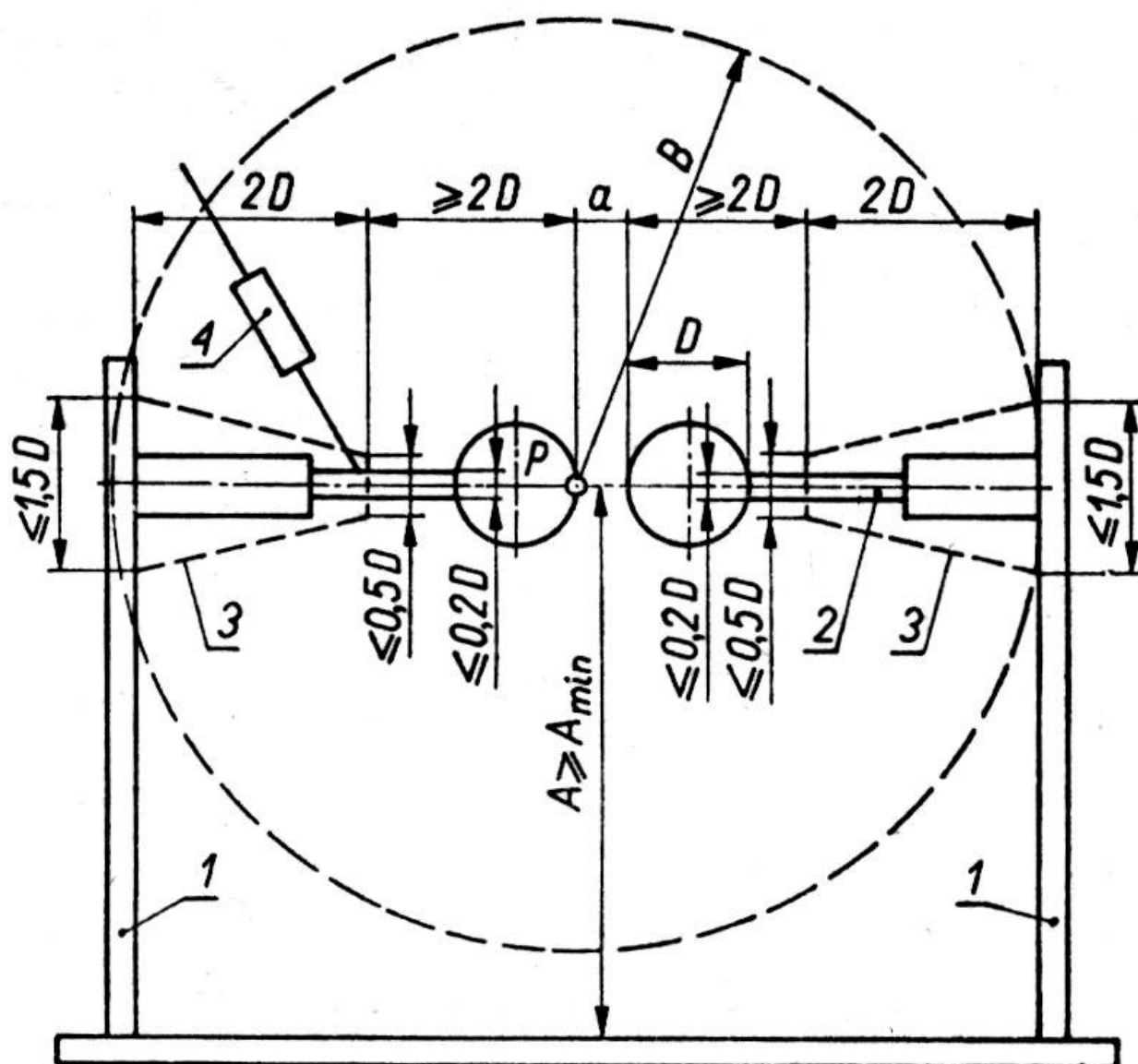
(c) udarowego piorunowego i łączeniowego 2400 kV, Dresden Technical University

Pomiary wysokich napięć

Iskierniki pomiarowe (pomiary bezpośrednie napięcia)

Iskiernik powietrzny, utworzony przez dwie jednakowe elektrody kuliste o dużych średnicach D i niewielkim odstępie a .

Konstrukcja iskiernika może być pozioma (zwykle, gdy $D \leq 250$ mm) lub pionowa, gdy wymiary kul są większe.

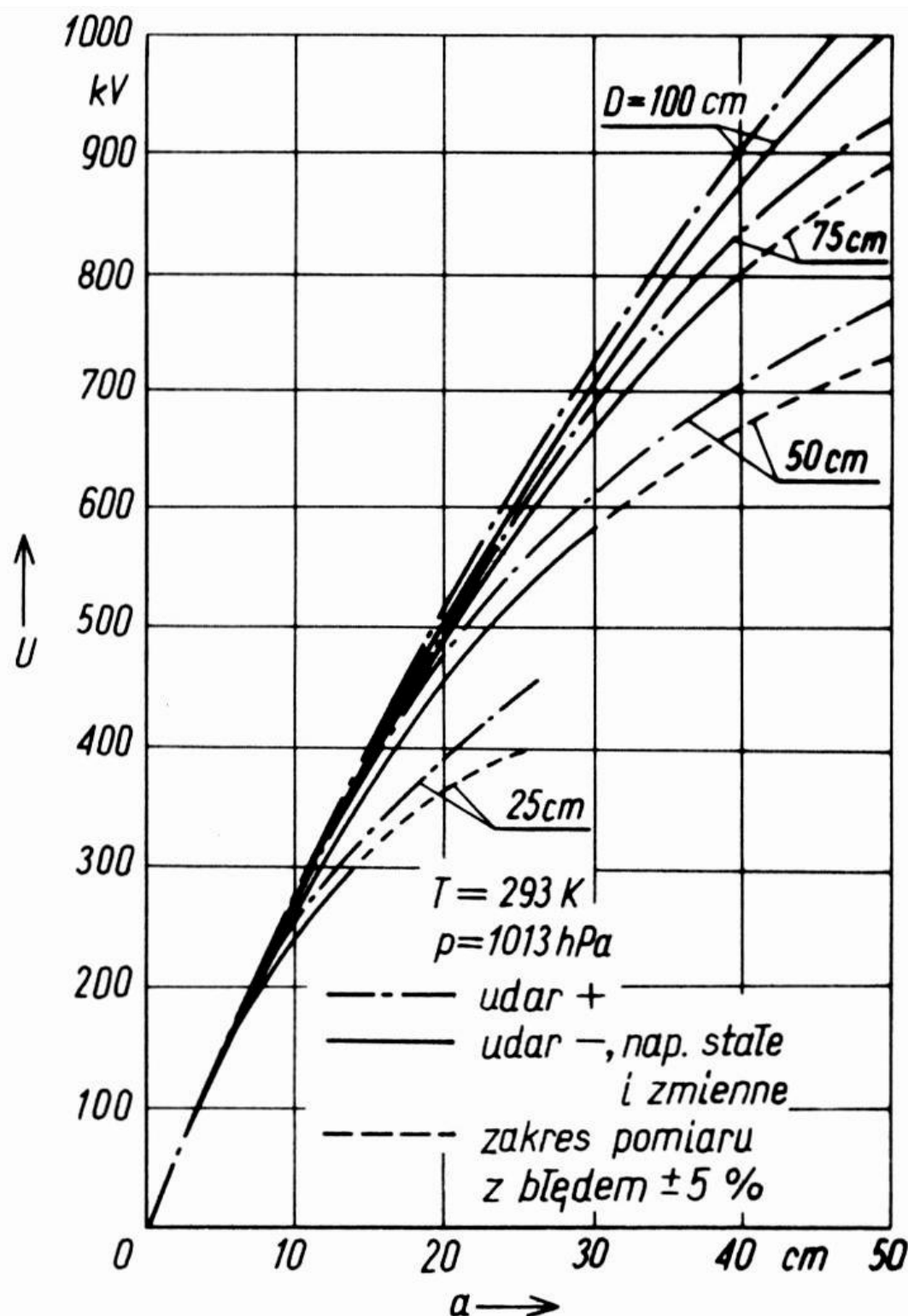


Szkic wymiarowy iskiernika pomiarowego poziomego:

- 1 - wspornik izolacyjny,
- 2 - pręt,
- 3 - granica wymiarów elementów mocujących,
- 4 - rezystor tłumiący.

W iskiernikach pomiarowych jest wykorzystywana zależność między napięciem przeskoku U a odstępem elektrod a i ich średnicą D .

Służą do pomiaru wartości maksymalnej dowolnego przebiegu napięcia.



Dokładność pomiaru:

$\pm 3 \%$ warunek: $a/D \leq 0,5$
(napięcie przemienne i udarowe $T_2 \geq 50 \mu\text{s}$),

$\pm 5 \%$ warunek: $a/D \leq 0,8$
(napięcie przemienne i udarowe $T_2 \geq 50 \mu\text{s}$),

$\pm 5 \%$ warunek: $a/D \leq 0,4$
(napięcie stałe).

Wykresy $U = f(a)$ iskierników pomiarowych kulowych (o podanych średnicach D), w normalnych warunkach atmosferycznych

Woltomierze elektrostatyczne (pomiar bezpośredni napięcia)

W konstrukcji woltomierzy elektrostatycznych jest wykorzystywane działanie sił w polu elektrycznym.

Natężenie pola E jest wytworzone przez napięcie U_0 między dwiema płaskimi elektrodami o powierzchni S i odstępem a .

Siła F działająca na elektrodę w kierunku pola jest związana z nagromadzoną w układzie energią elektryczną W_e zależnością:

$$|F| = \frac{dW_e}{dx} = \frac{\varepsilon S}{2} E^2 = \frac{\varepsilon S}{2} \cdot \frac{U_0^2}{a^2}$$

gdzie:

F - siła działająca na elektrodę,

W_e - energia elektryczna,

x - przesunięcie elektrody zgodne z kierunkiem pola,

ε - przenikalność elektryczna ośrodka między elektrodami,

S - powierzchnia każdej elektrody,

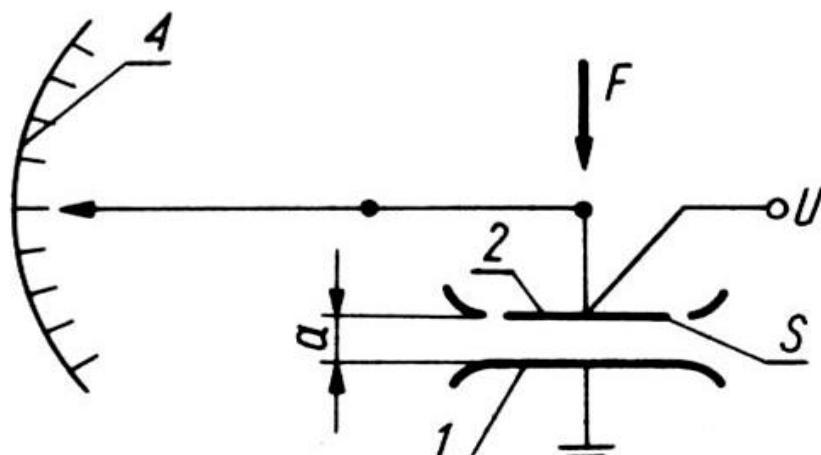
E - natężenie pola (jednorodnego) między elektrodami,

U_0 - napięcie między elektrodami,

a - odstęp między elektrodami.

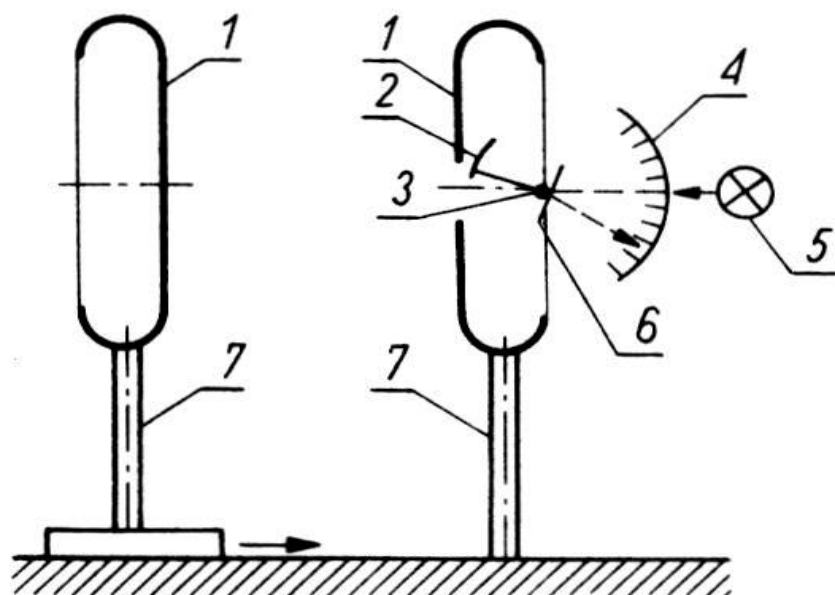
Dla napięć przemiennych o wartości skutecznej U należy uwzględnić wartość średnią siły:

$$F_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt = \frac{\varepsilon S}{2a^2} \frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt = \frac{\varepsilon S}{2a^2} U^2$$



Woltomierz elektrostatyczny absolutny:
 1 - elektroda stała,
 2 - elektroda ruchoma o powierzchni S ,
 4 - skala,
 a - odstęp między elektrodami,
 U - mierzone napięcie,
 F - siła działająca na elektrodę ruchomą

Woltomierz elektrostatyczny techniczny



Szkic woltomierza elektrostatycznego technicznego:
 1 - elektroda stała,
 2 - elektroda ruchoma,
 3 - wałek sprężysty,
 4 - skala,
 5 - źródło światła,
 6 - lustro,
 7 - izolator

Moment napędowy elektrody ruchomej jest proporcjonalny do siły:

$$F_{av} = \frac{dW_e}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{CU^2}{2} \right) = \frac{U^2}{a^2} \cdot \frac{dC}{dx}$$

Moment zwrotny wałka sprężystego jest proporcjonalny do kąta wychylenia α . W stanie równowagi obu momentów:

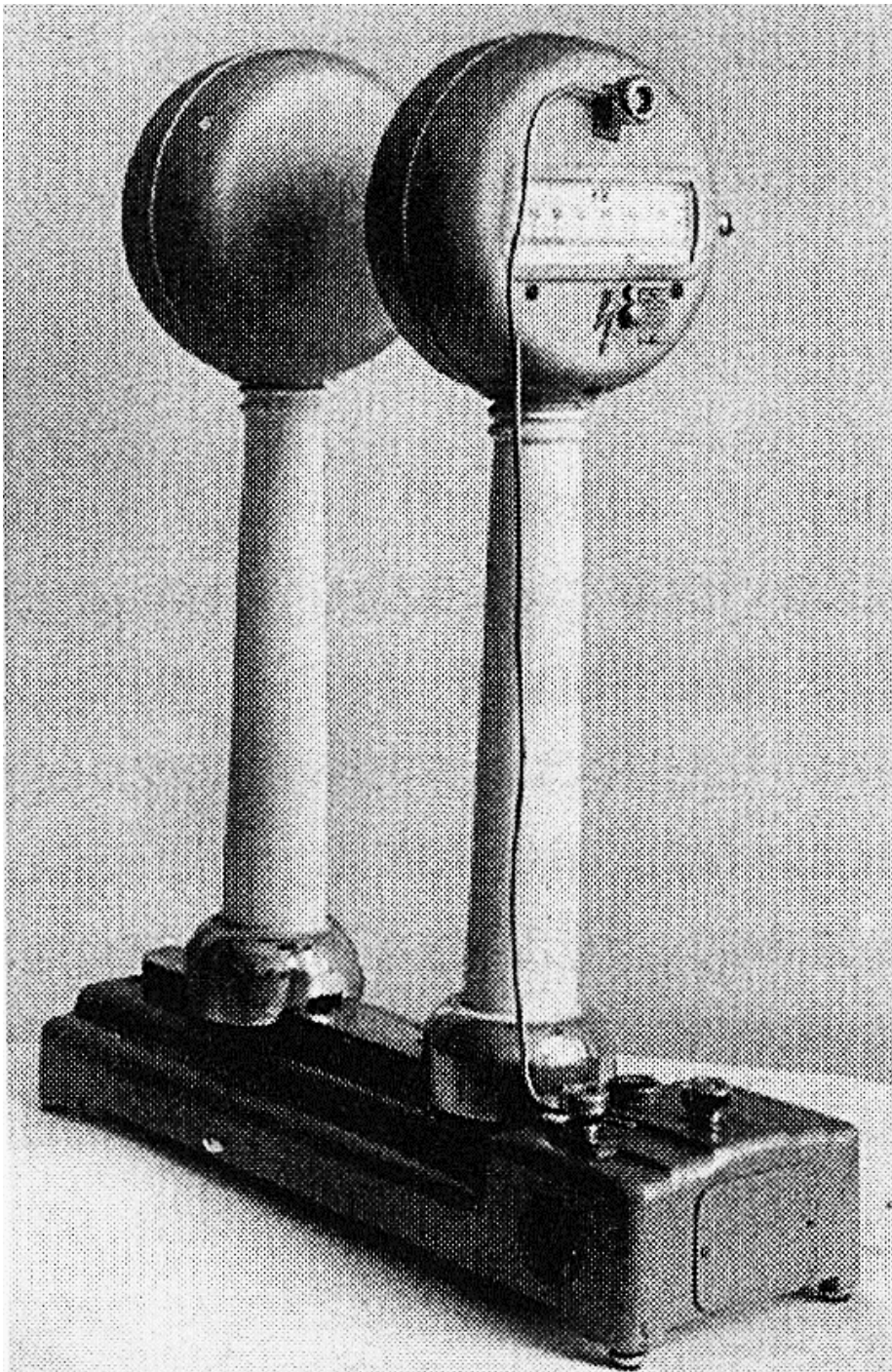
$$\alpha = K \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \frac{dC}{dx}$$

gdzie: K - stała.

Przy odpowiednim rozwiązaniu konstrukcyjnym:

$$\frac{dC}{dx} = \text{constant}$$

Kąt wychylenia miernika jest proporcjonalny do wartości skutecznej napięcia.



Fotografia woltomierza elektrostatycznego; zakresy pomiarowe: 25, 50 i 75 kV

Układy do pomiarów pośrednich

Układ z kondensatorem szeregowym, diodami i mikroamperomierzem

Układ służy do pomiaru nieodkształconych napięć przemiennych metodą prądu pojemnościowego wyprostowanego.

Mierzone napięcie U powoduje przepływ prądu pojemnościowego przez kondensator C i przez dwie gałęzie z prostownikami D_1 i D_2 .

Mikroamperomierz magnetoelektryczny μA mierzy średnią wartość prądu wyprostowanego, która jest proporcjonalna do wartości maksymalnej wysokiego napięcia:

$$U_m = \frac{I_{av} T}{2C}$$

gdzie:

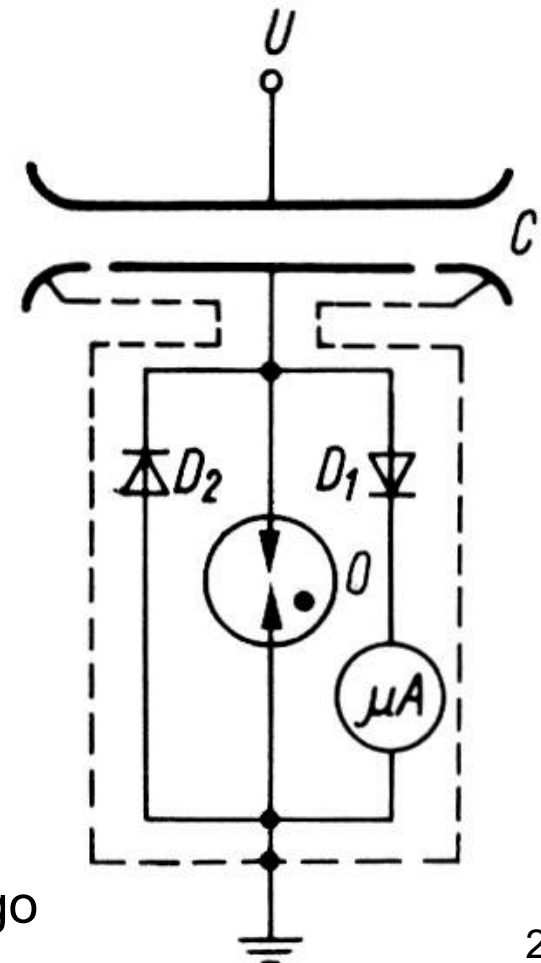
C - kondensator wysokiego napięcia,

T - okres napięcia przemiennego,

I_{av} - wartość średnia prądu pojemnościowego płynącego przez mikroamperomierz:

$$i_c = C \frac{du}{dt}$$

Szkic układu pomiarowego



Dzielnik rezystancyjny

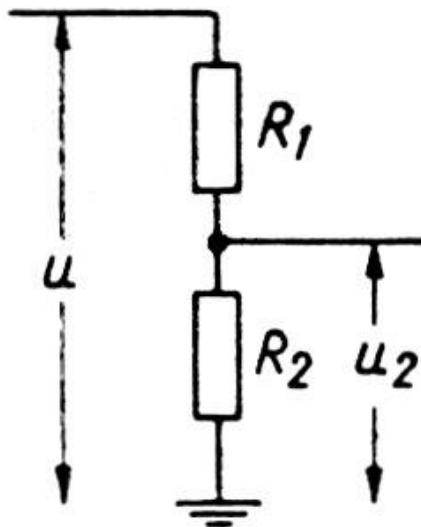
Do pomiaru wysokich napięć są stosowane dzielniki rezystancyjne, pojemnościowe i mieszane (rezystancyjno-pojemnościowe).

Dzielniki rezystancyjne nadają się do pomiaru wszystkich rodzajów napięć, ale są stosowane głównie do napięć stałych i udarowych.

Przekładnia samego dzielnika rezystancyjnego wynosi:

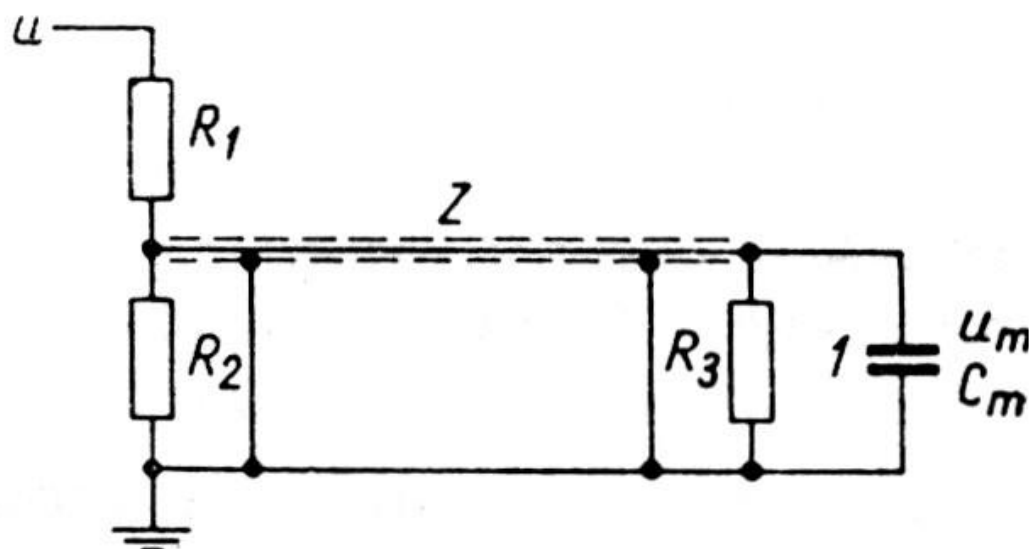
$$u_2 = u \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Użyte we wzorze symbole są zgodne z rysunkiem:



Dzielnik napięcia
rezystancyjny
DNR 250 kV

W przypadku kompletnego układu pomiarowego należy uwzględnić wpływ na wartość przekładni parametrów przewodu doprowadzającego oraz użytego miernika, zgodnie z poniższym rysunkiem.



Rezystancja R_3 powinna być równa impedancji falowej Z przewodu doprowadzającego.

Rezystancję R_2 we wzorze należy zastąpić rezystancją:

$$R'_2 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$



Dzielnik napięcia rezystancyjno-pojemnościowy DNRC 250 kV

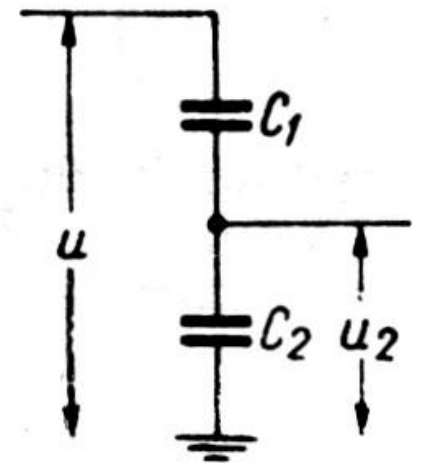
Dzielnik pojemnościowy

Dzielniki pojemnościowe są stosowane do pomiaru napięć uderowych i przemiennych.

Przekładnia samego dzielnika pojemnościowego wynosi:

$$u_2 = u \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

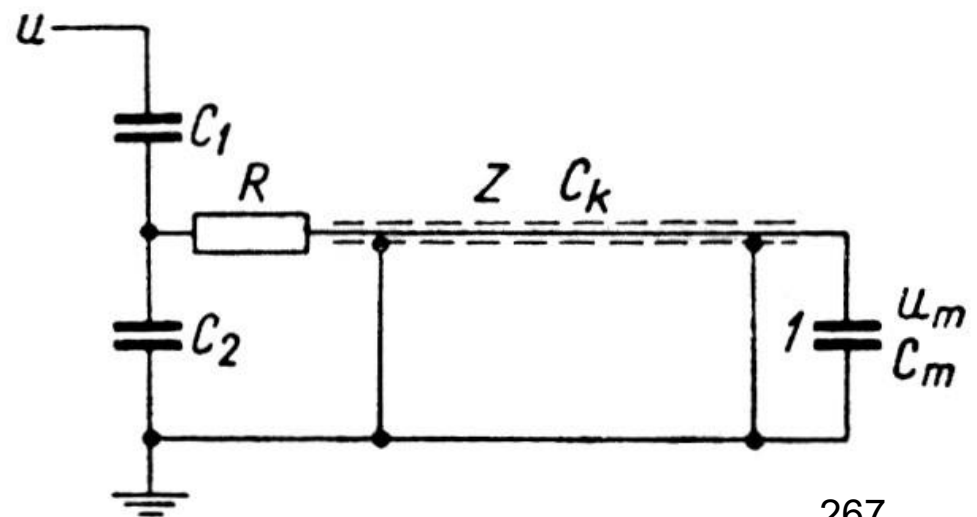
Użyte we wzorze symbole są zgodne z rysunkiem:

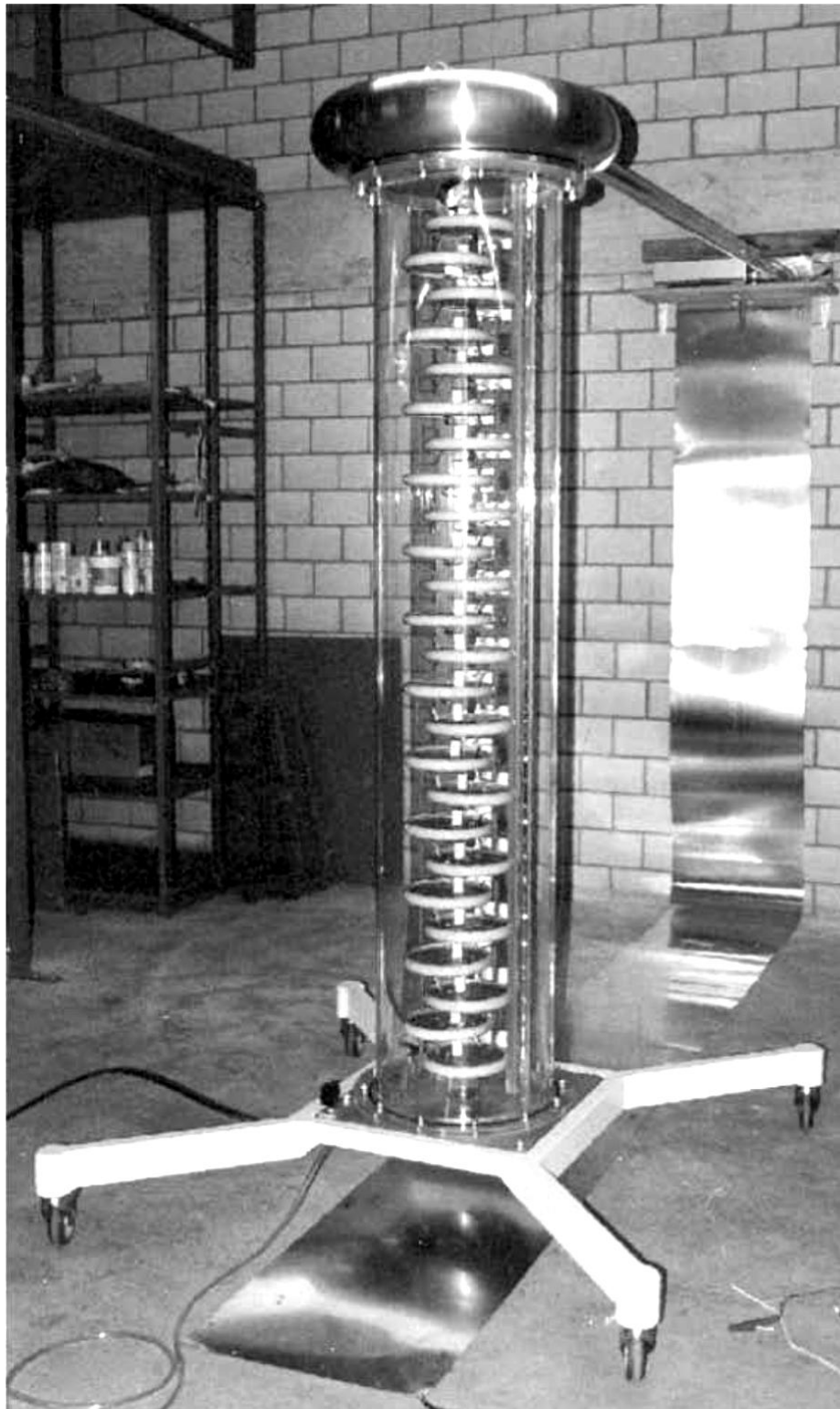


W przypadku kompletnego układu pomiarowego należy uwzględnić wpływ na wartość przekładni parametrów przewodu doprowadzającego oraz użytego miernika, zgodnie z poniższym rysunkiem.

Rezystancja R powinna być równa impedancji falowej Z przewodu doprowadzającego. Przekładnia kompletnego układu pomiarowego wyraża się wzorem:

$$u_m = u \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_k + C_m}$$





Uniwersalny dzielnik napięcia piorunowego i łączeniowego
500 kV, napięcia przemienne 200 kV (wartość skuteczna)
i napięcia stałego 250 kV