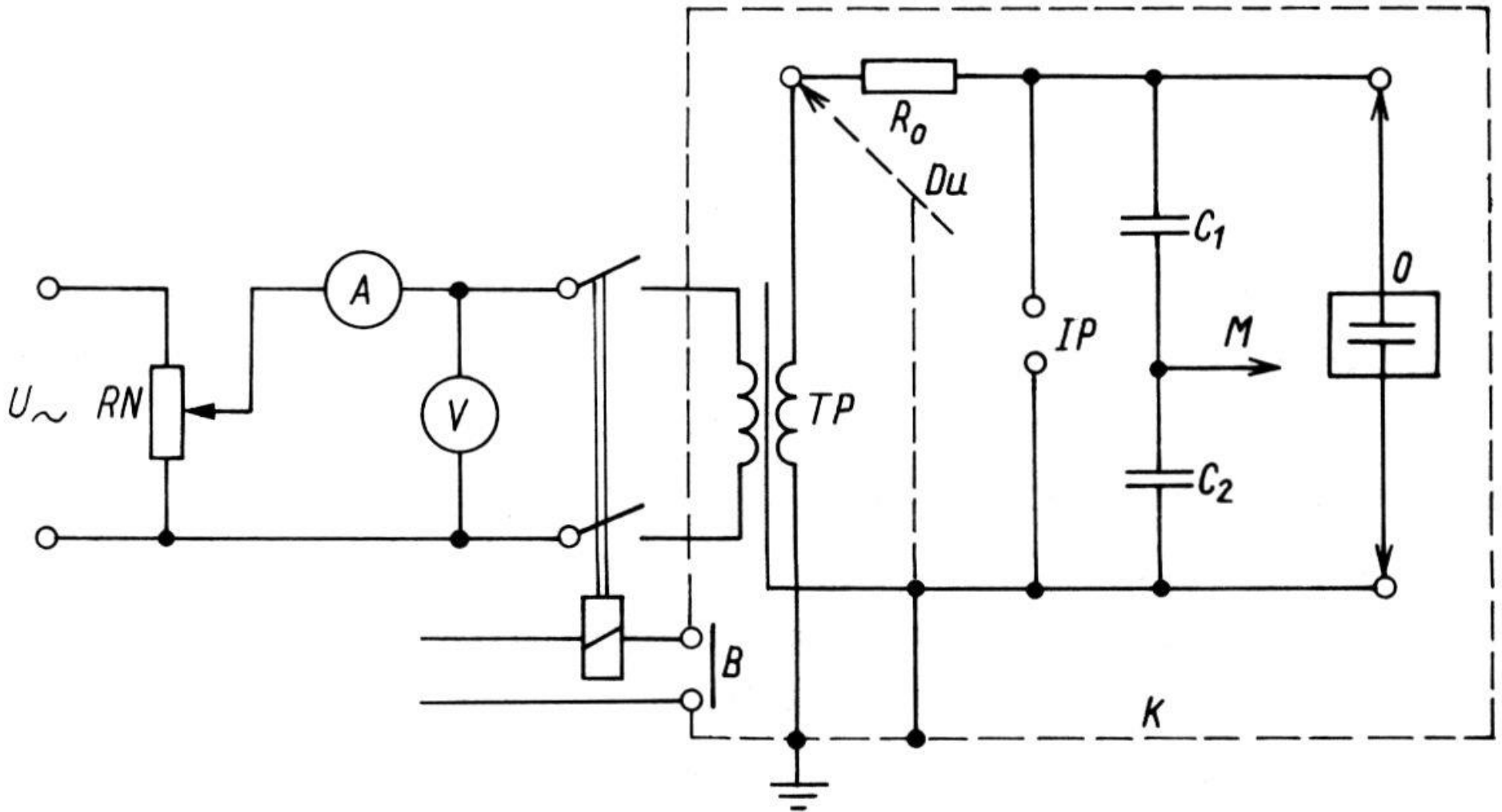
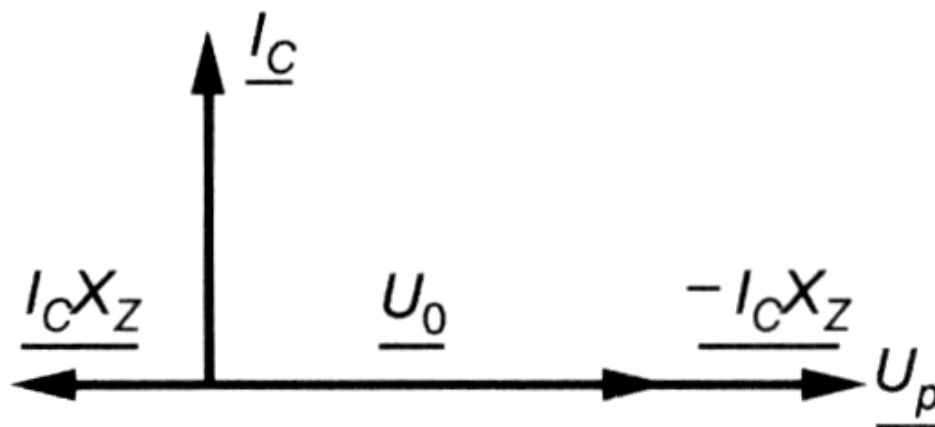
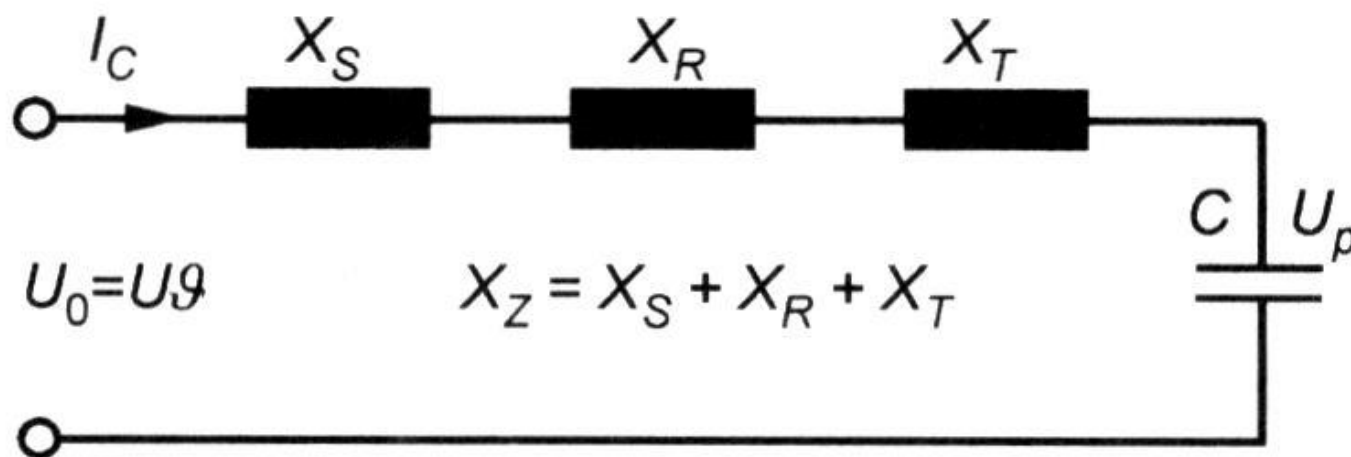
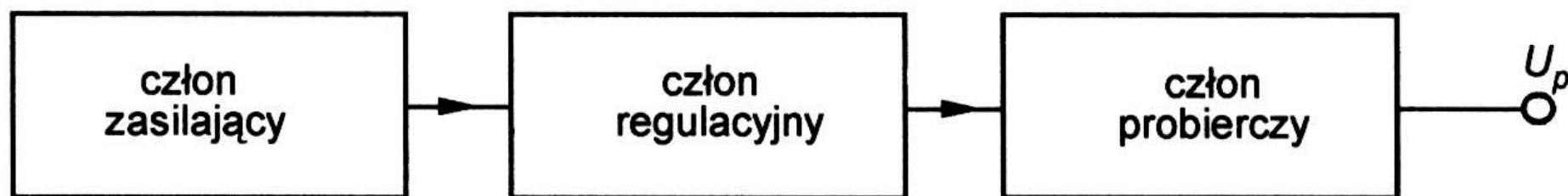


# Próby urządzeń elektrycznych napięciem przemiennym

## Zespół probierczy napięcia przemiennego



Schemat zespołu probierczego napięcia przemiennego;  $RN$  - regulator napięcia,  $TP$  - transformator probierczy,  $B$  - blokada,  $R_0$  - 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).



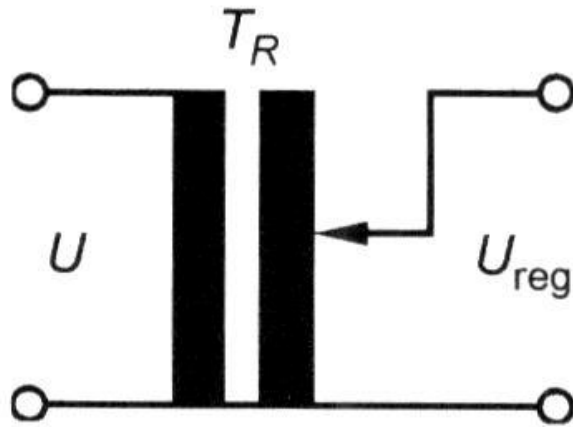
Schemat blokowy i zastępczy zespołu probierczego oraz wykres wskazowy;  $X_S$ ,  $X_R$ ,  $X_T$  - reaktancje członów,  $U_0$  - napięcie zasilające,  $U_p$  - napięcie probiercze,  $g$  - przekładnia napięciowa zespołu.

**Człon zasilający:**

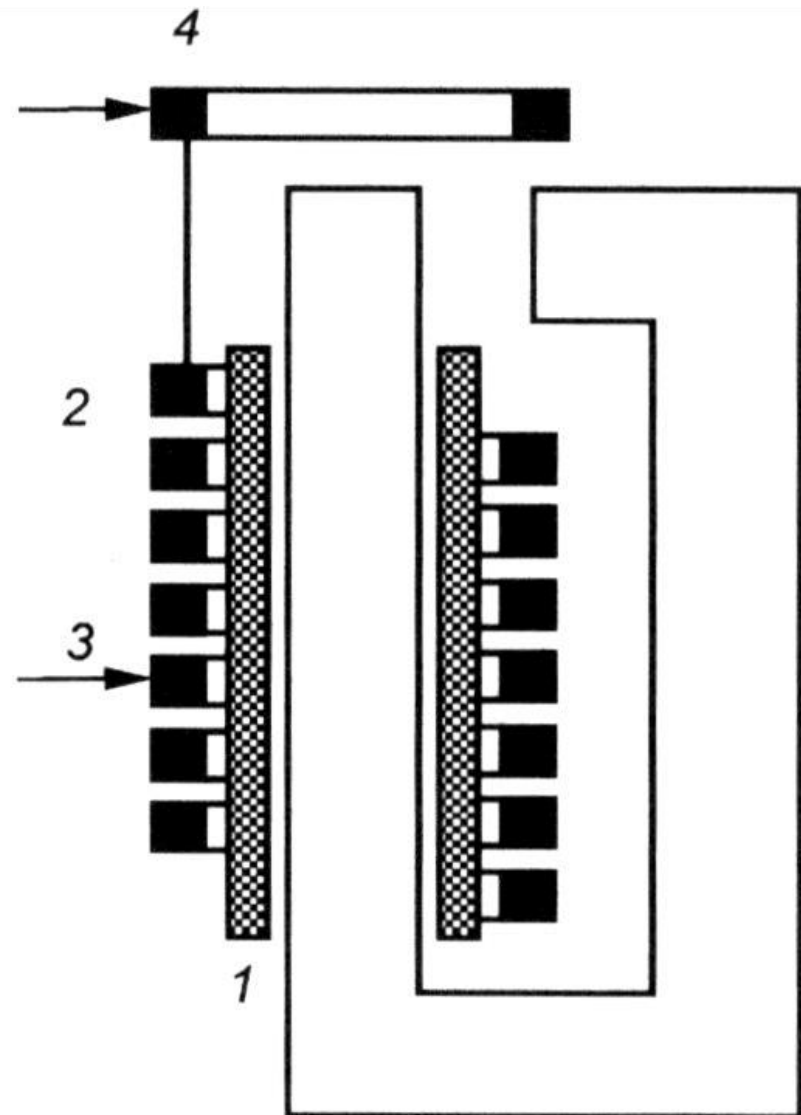
- sieć niskiego napięcia (przy małych mocach zespołu probierczego),
- specjalny transformator (przy dużych mocach zespołu probierczego).

**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.

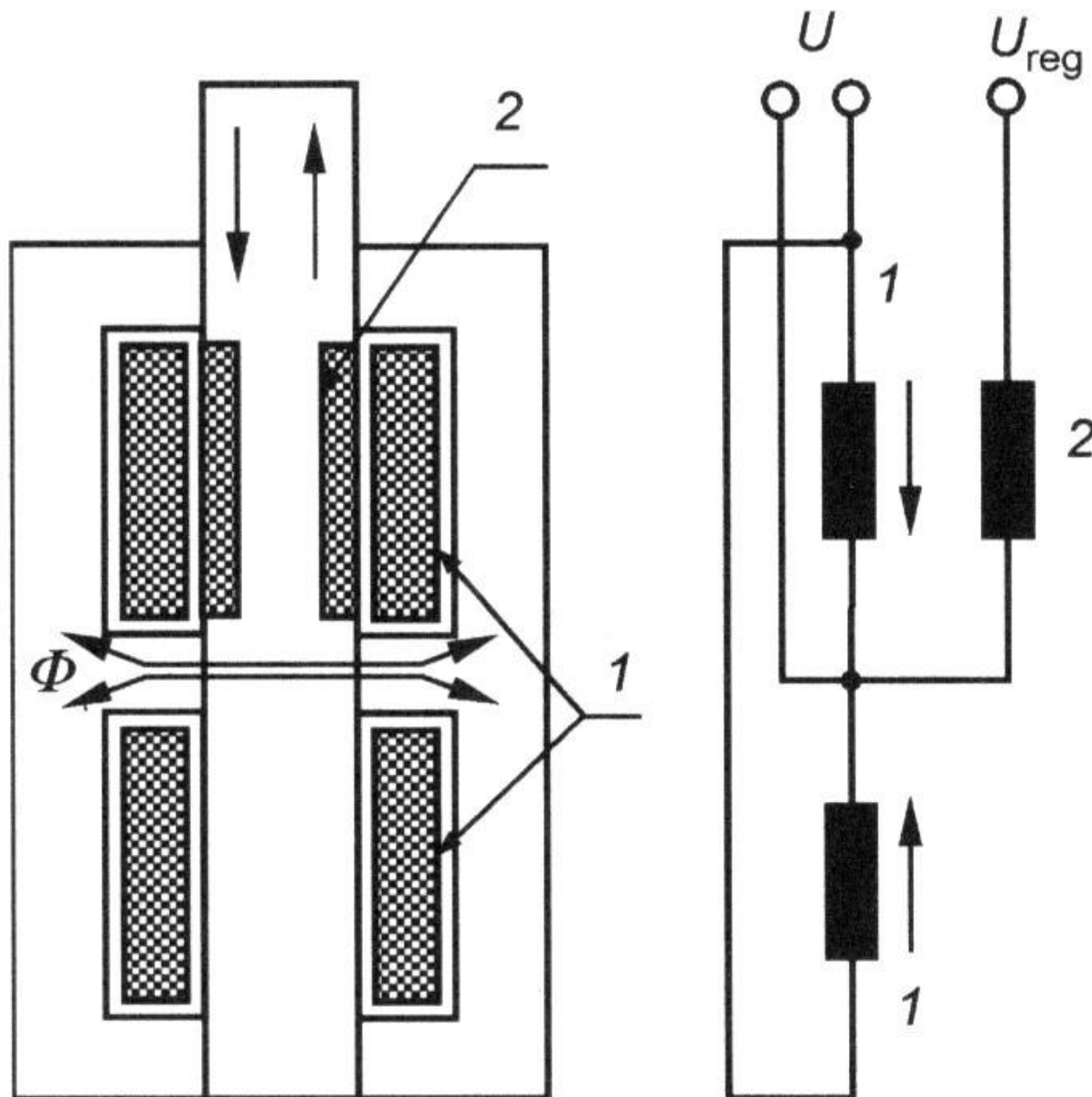


Schemat transformatora ze stykiem przemieszczającym się osiowo ze zwoju na zwój



Schemat transformatora Thoma:

- 1 - uzwojenie wzbudzające,
- 2 - uzwojenie regulacyjne obrotowe,
- 3 - styk ruchomy (osiowo bez przeskoku),
- 4 - styk nieruchomy i pierścień ślizgowy.



Transformator regulacyjny z przesuwany rdzeniem:  
 1 - uzwojenia wzbudzenia, przeciwsobne,  
 2 - uzwojenie regulacyjne na rdzeniu przesuwany.

## Człon probierczy

Główne urządzenie zespołu probierczego:

- pojedynczy transformator jednofazowy:  
napięcie probiercze do 500 kV,  
przekładnia zwojowa 100...500,
- kaskada transformatorów jednofazowych:  
napięcie probiercze powyżej 500 kV.

Moc znamionowa transformatora probierczego:

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

$\omega$  - 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:

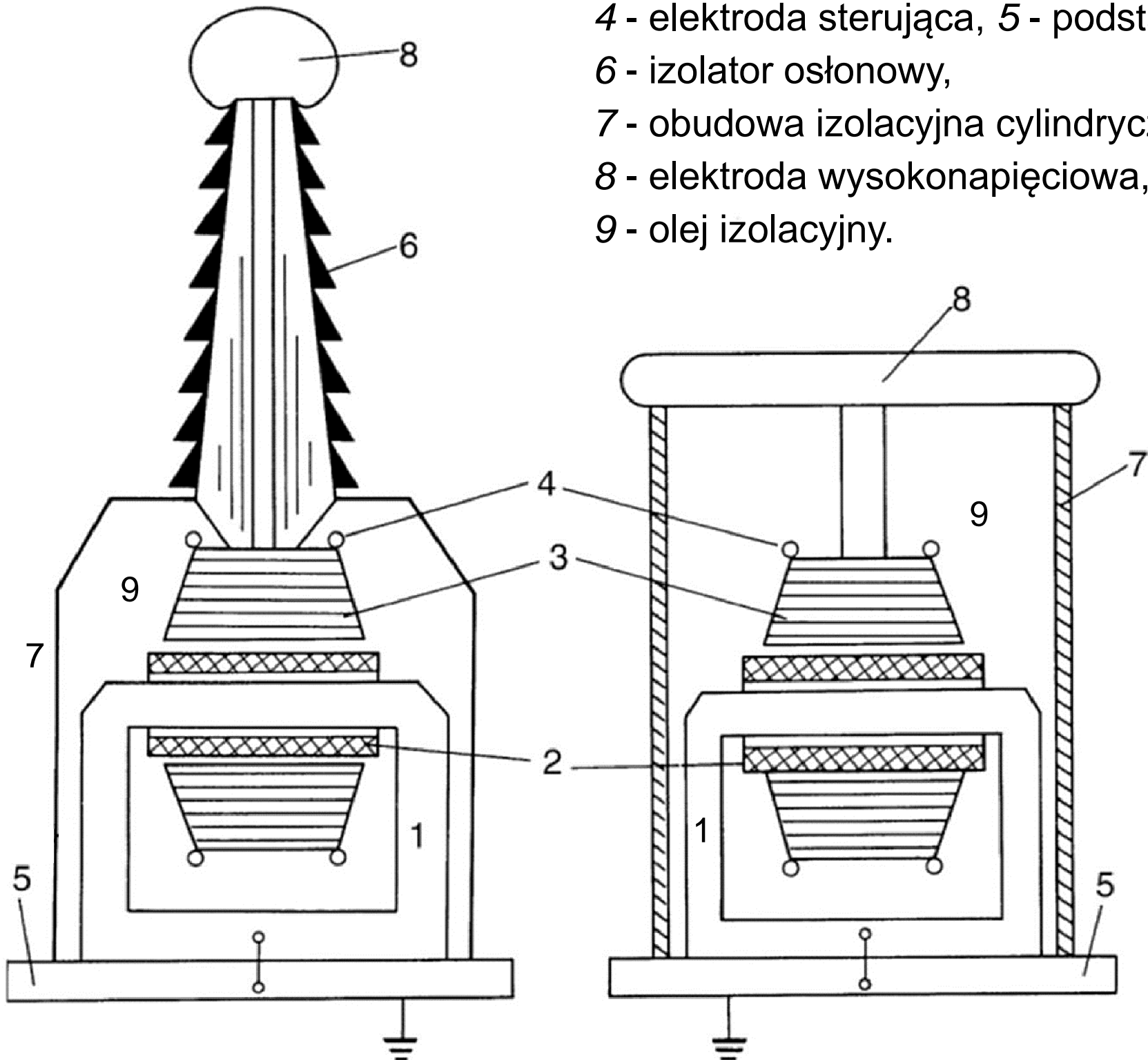
$$S_z = I_z U_{pr} = \frac{U_{pr}^2}{X_z}$$

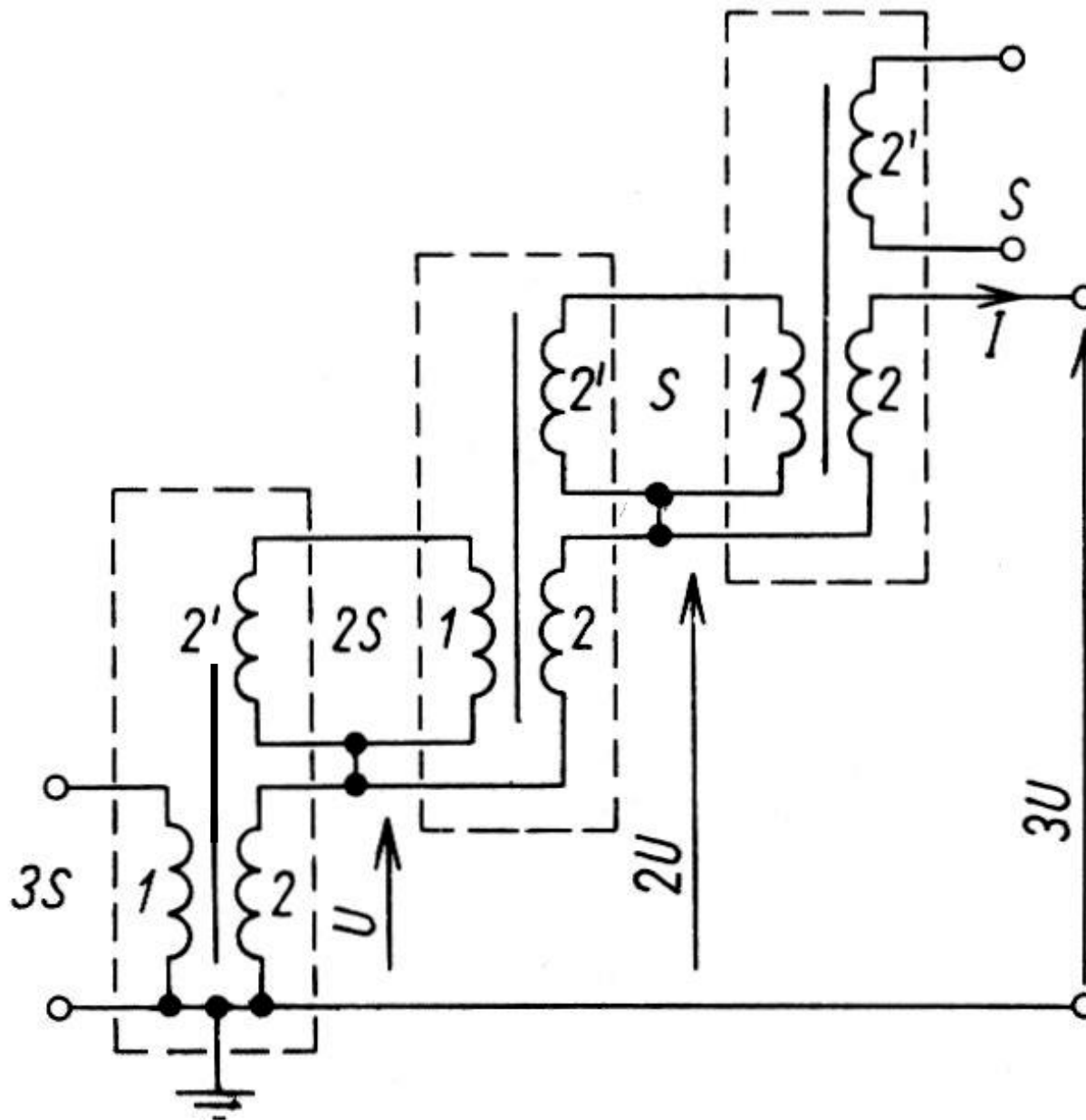
$X_z$  - reaktancja zwarciova całego zespołu probierczego,

$I_z$  - 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.

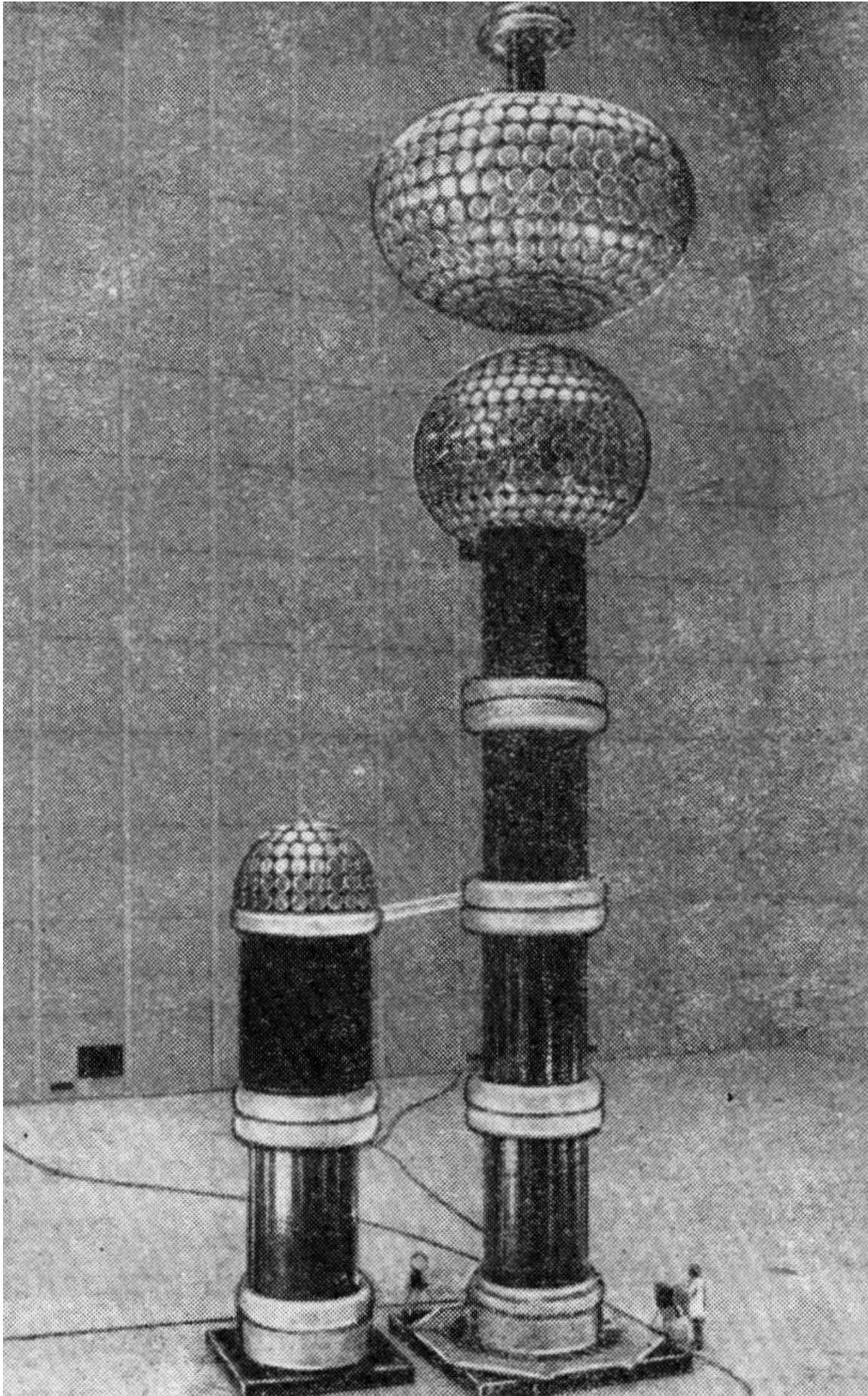




Transformator probierczy kaskadowy trójstopniowy:

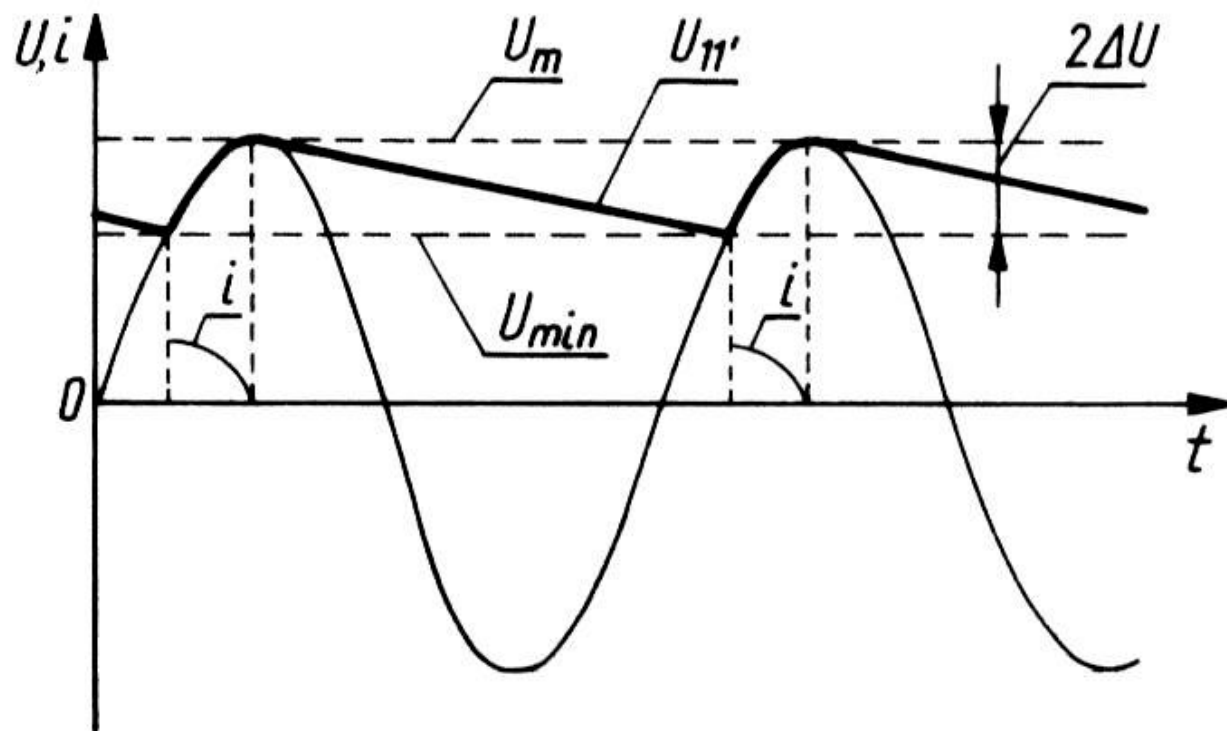
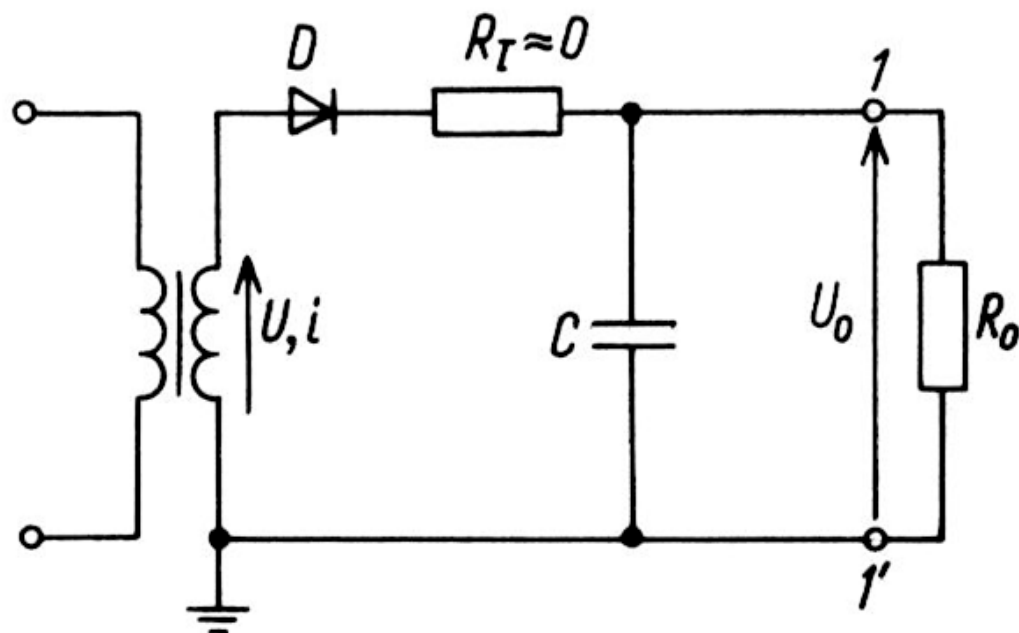
- 1 - uzwojenie dolnego napięcia,
- 2 - uzwojenie górnego napięcia
- 2' - uzwojenie sprzęgające,
- S - moc pozorna.

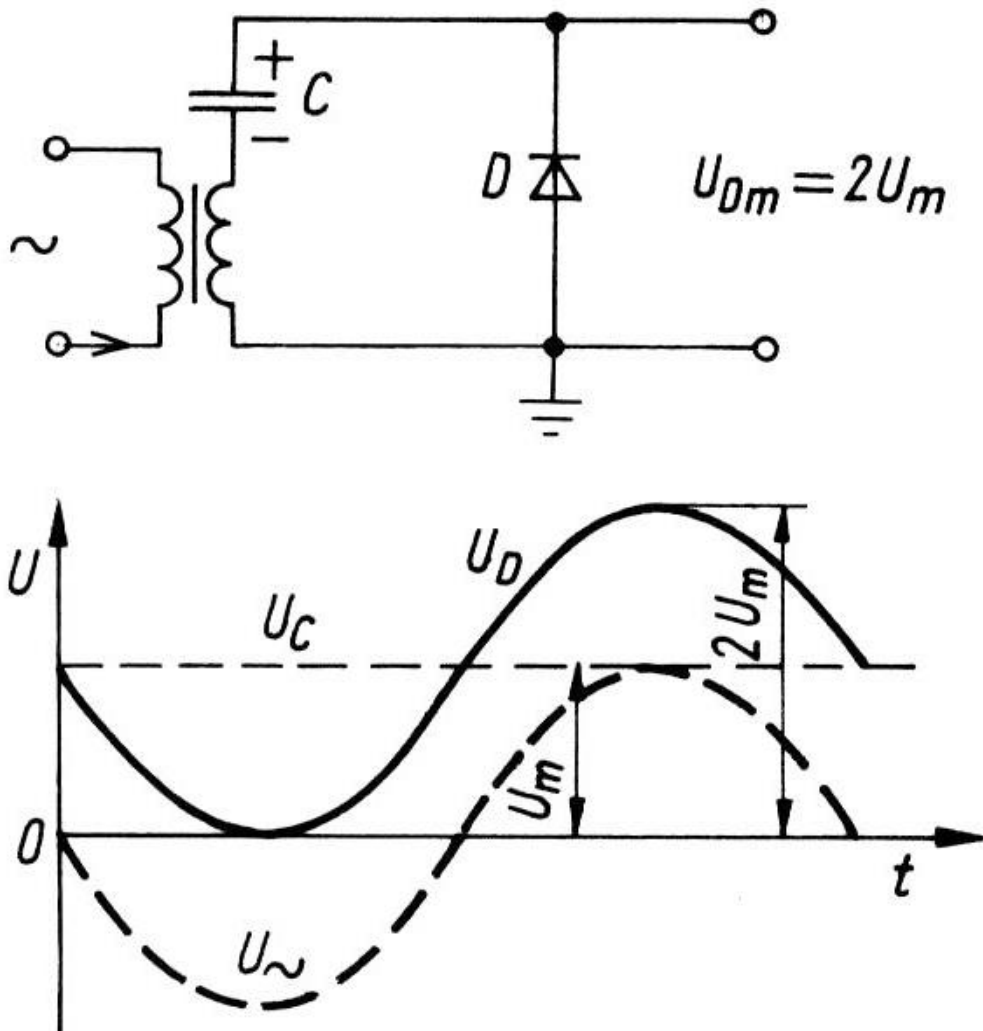




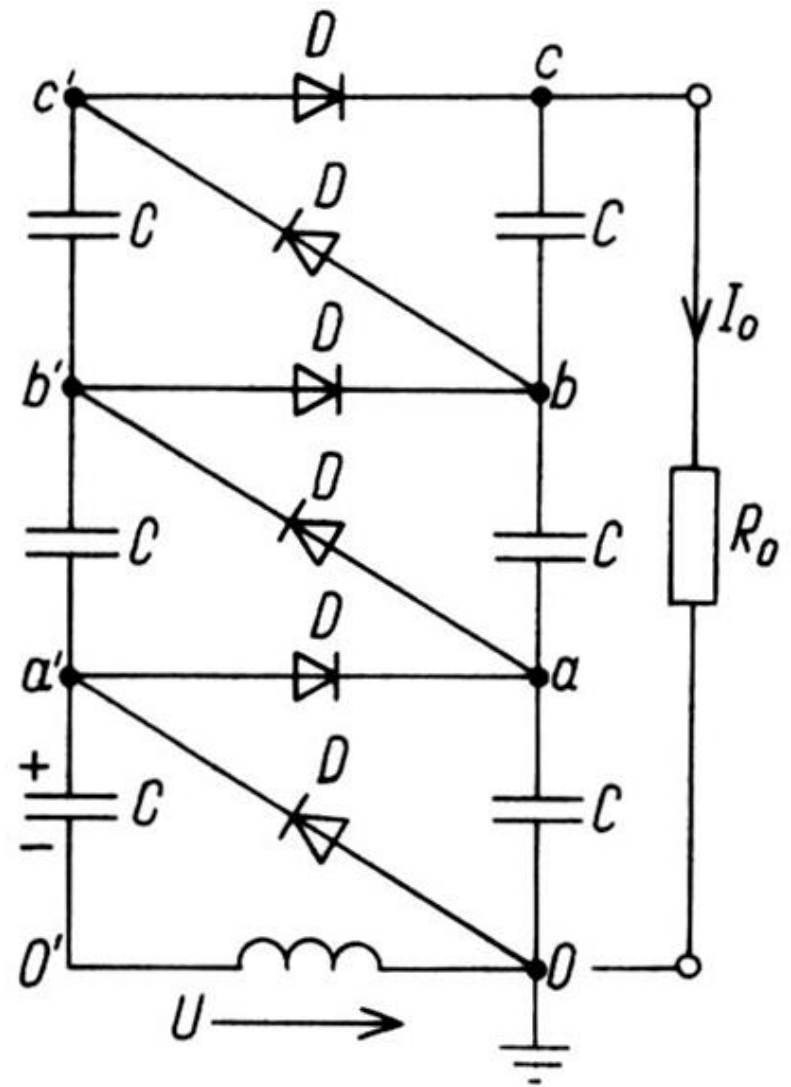
Kaskada 4-stopniowa  
złożona z sześciu  
transformatorów  
probierczych po 550 kV  
w laboratorium IREQ  
w Kanadzie.

## Zespół probierczy napięcia stałego

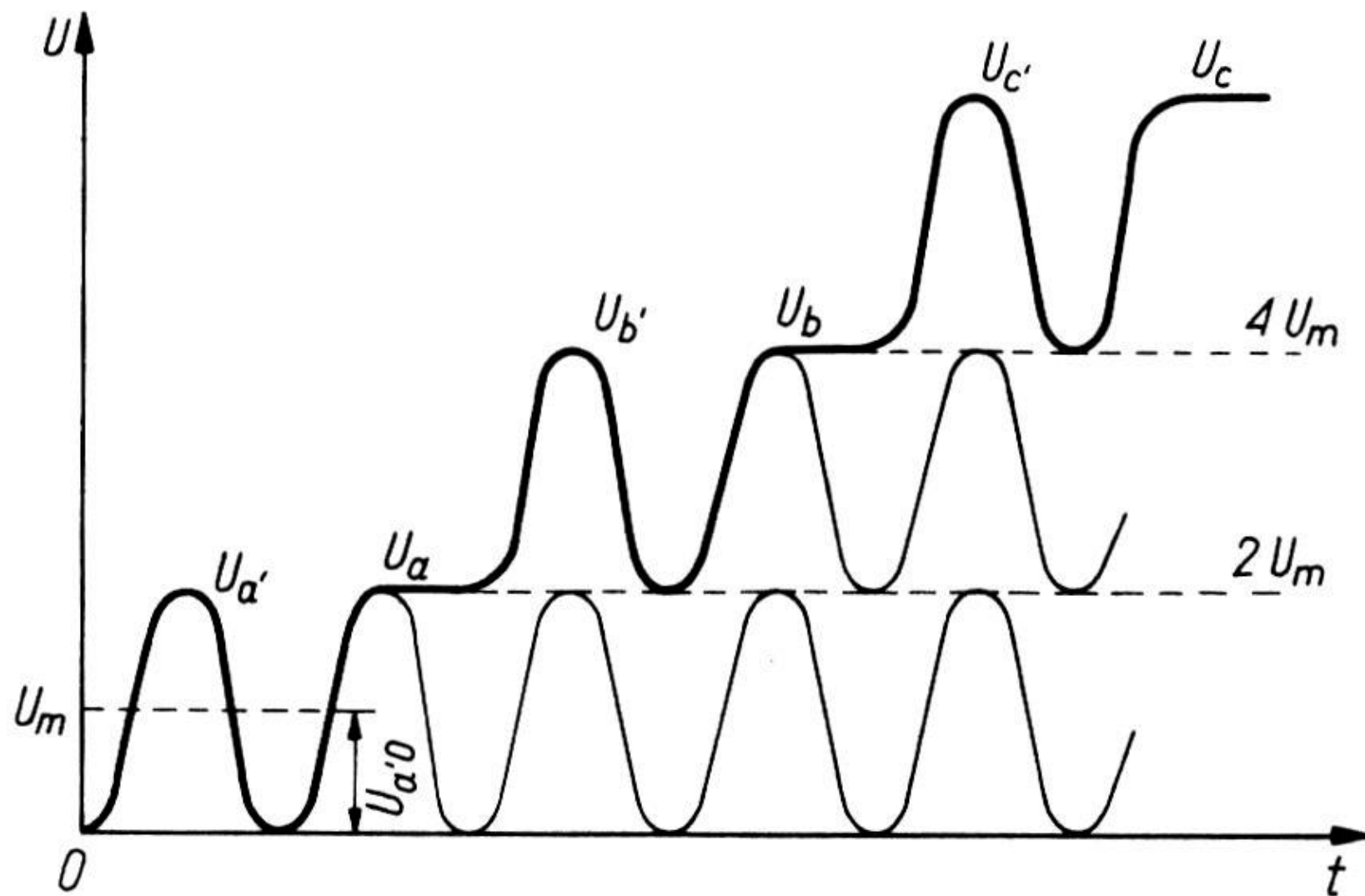




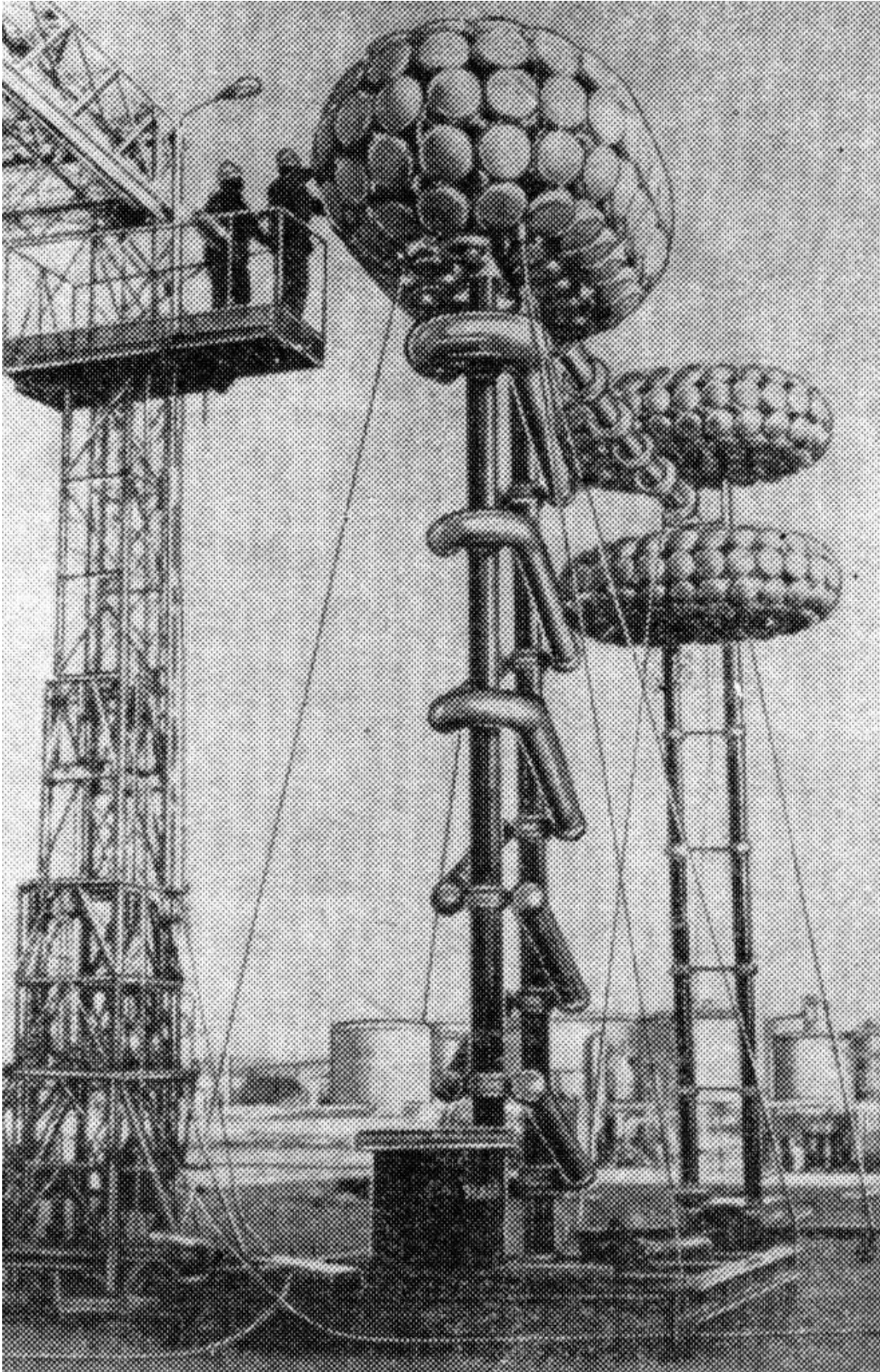
Układ podwyższający napięcie;  
schemat i przebiegi.



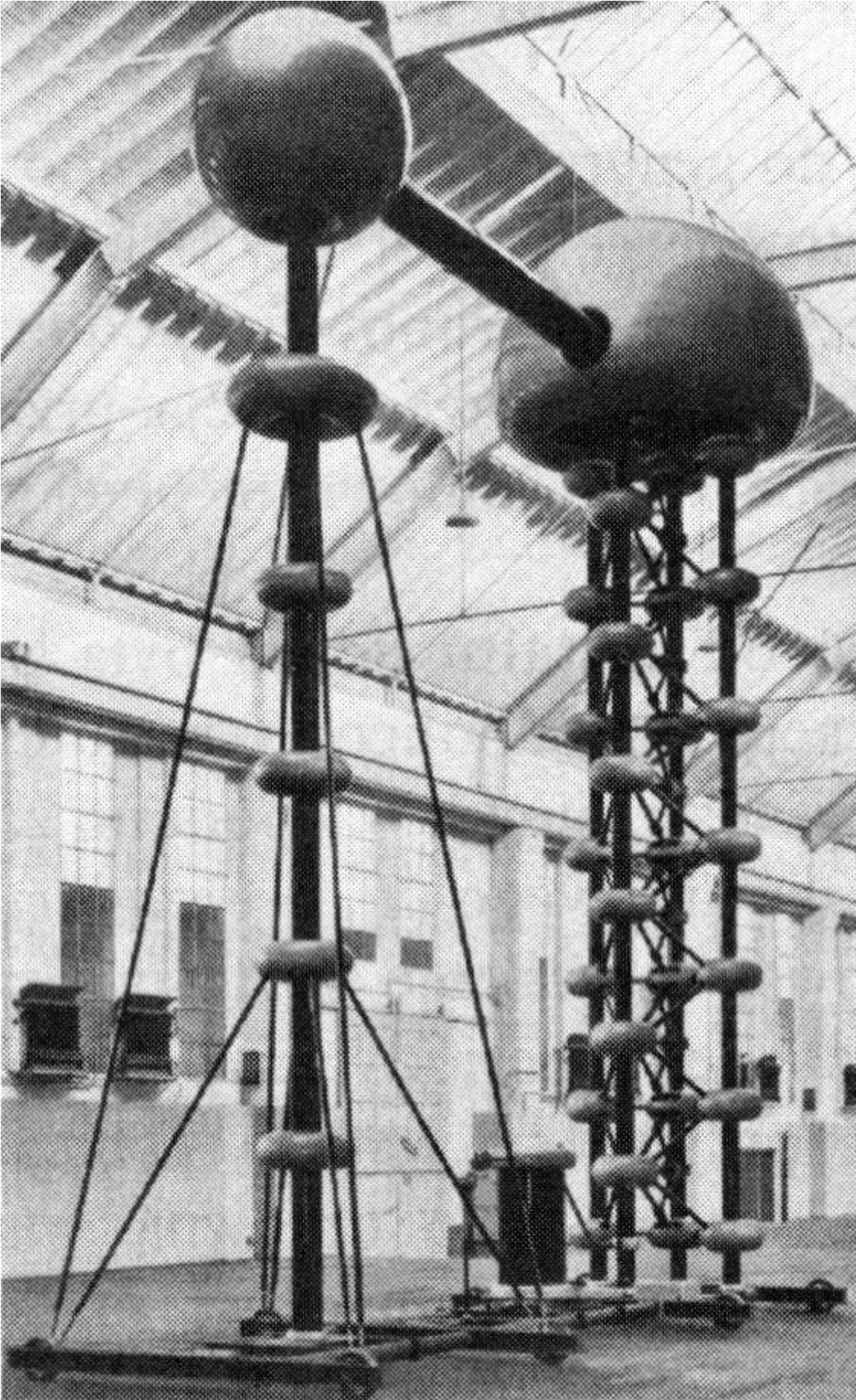
Schemat układu kaskadowego  
napięcia stałego.



Przebiegi napięcia w układzie kaskadowym napięcia stałego.



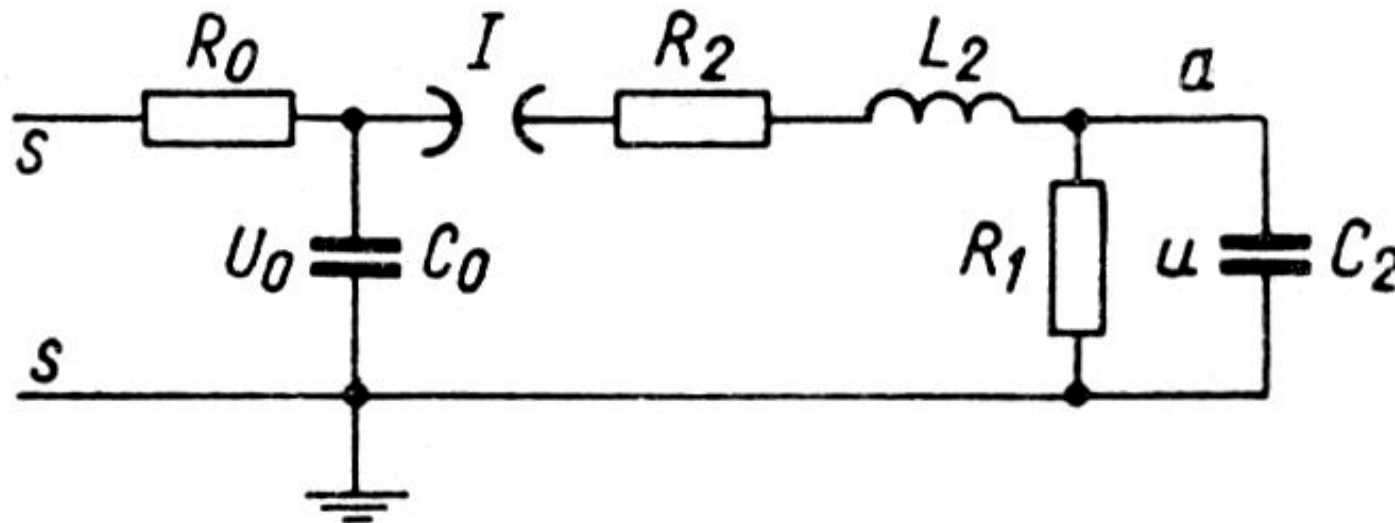
Generator kaskadowy  
 napięcia stałego  
 2000 kV, 250 mA  
 połączony z dzielnikiem  
 napięcia stałego 2 MV,  
 firma Haefely.



Generator kaskadowy napięcia stałego 2000 kV, z dzielnikiem napięcia stałego, firma Haefely.

## Zespół probierczy napięcia udarowego

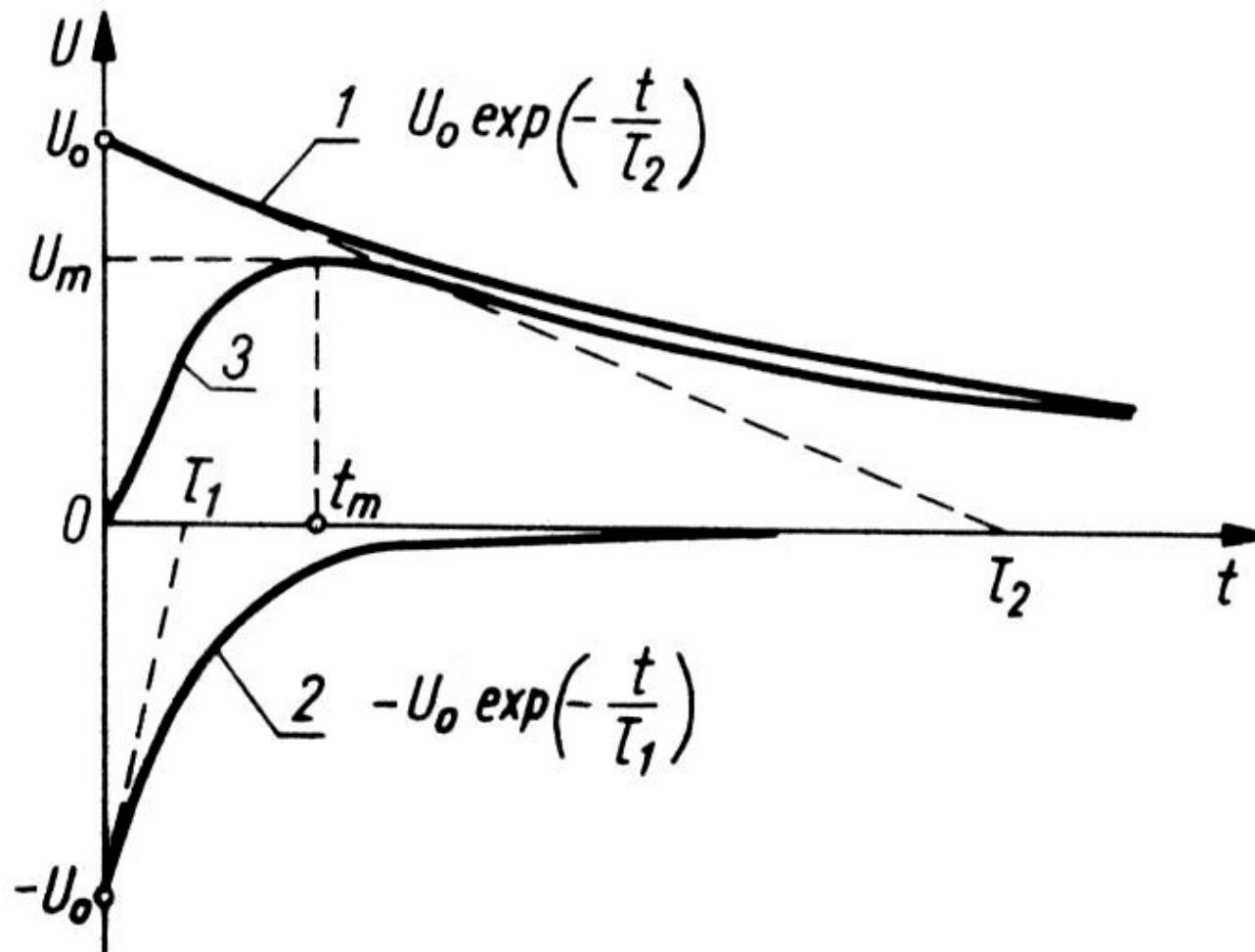
Generator udarów napięciowych piorunowych.



Układ uproszczony generatora udarów napięciowych.

Etapy pracy generatora:

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



Udar napięciowy:

- 1 - krzywa rozładowania  $C_0$ ,
- 2 - krzywa ładowania pojemności  $C_2$ ,
- 3 - krzywa wypadkowa - udar napięciowy.



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

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

### Dla uderów znormalizowanych:

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

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

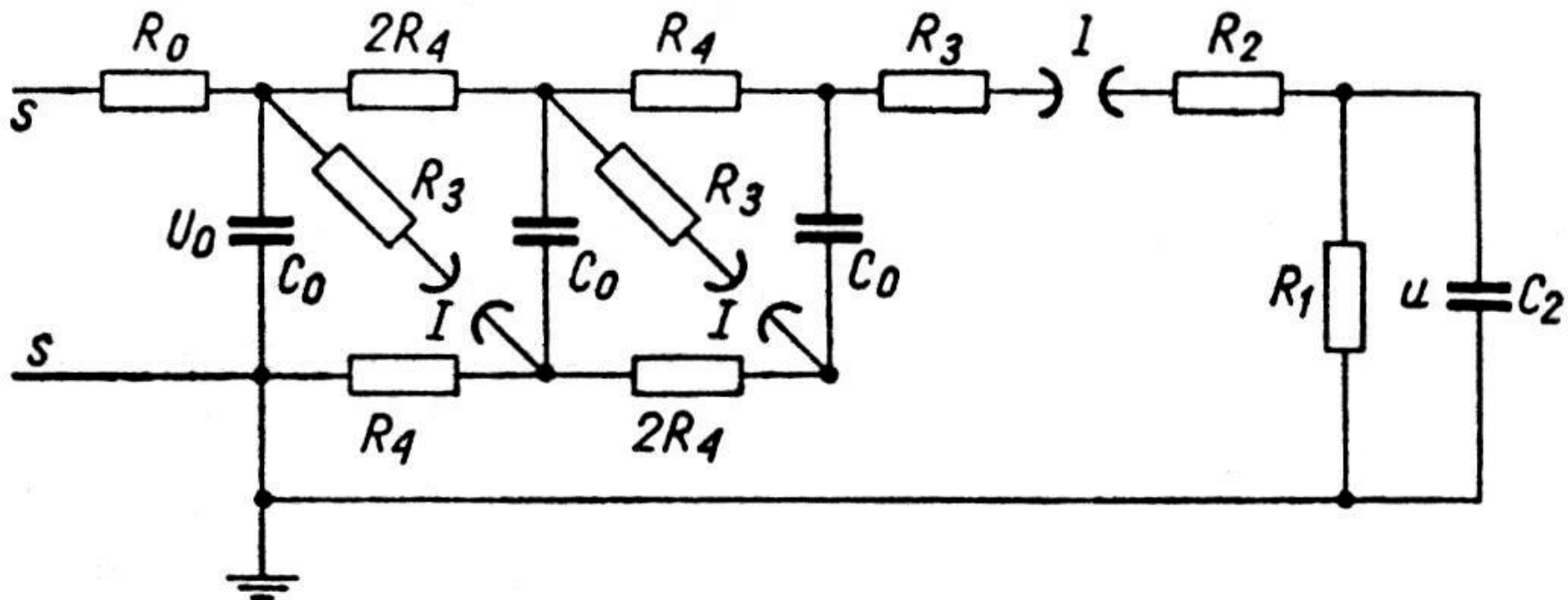
stąd:  $C_0 \gg C_2$ ,  $R_1 \gg R_2$

### Sprawność napięciowa generatora:

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

### Energia generatora:

$$W = \frac{C_0 U_0^2}{2}$$

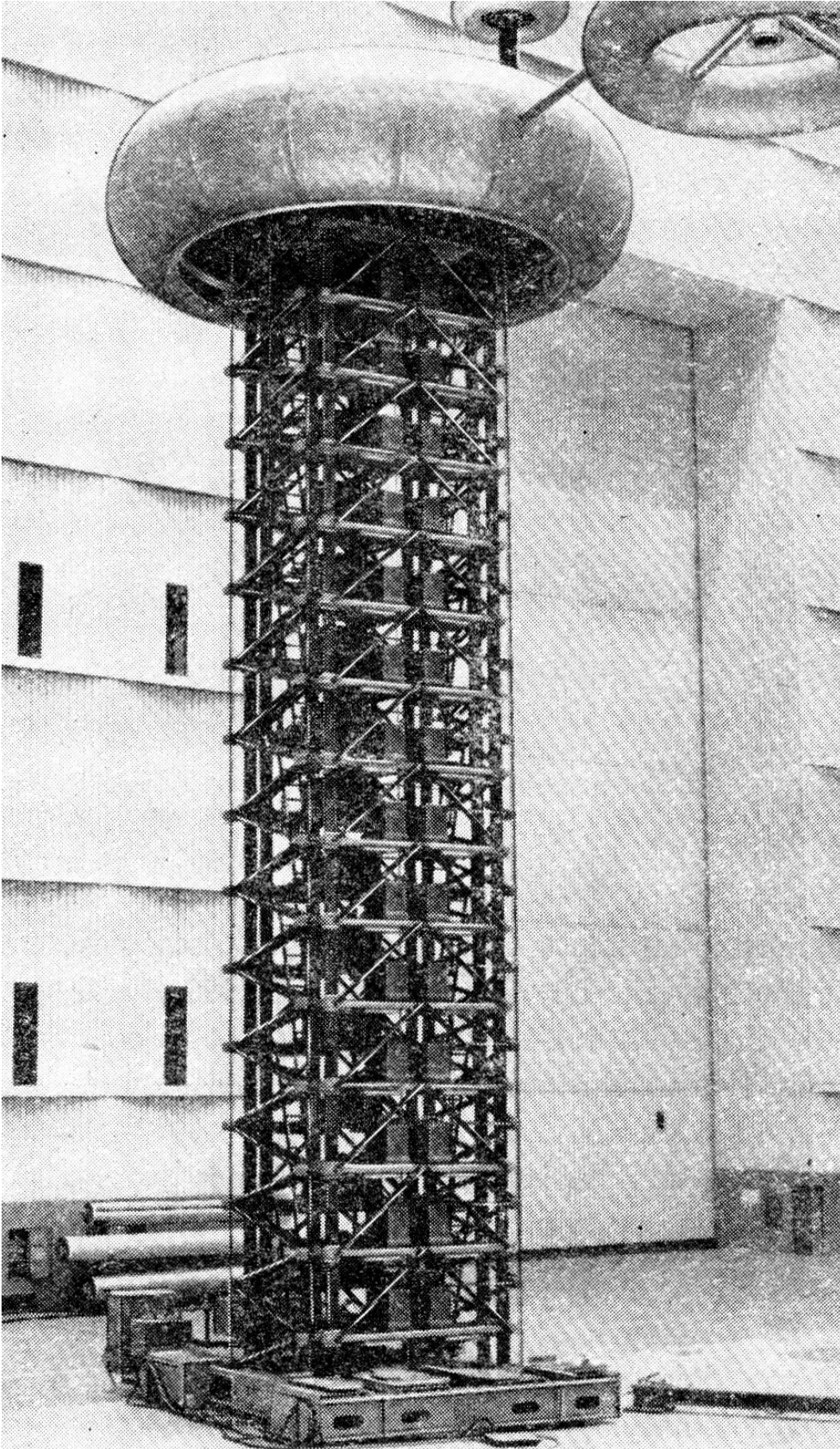


Uproszczony schemat wielostopniowego generatora udarów napięciowych.

Etapy pracy generatora:

- ładowanie  $C_0$  w układzie równoległym przez  $R_0$  i  $R_4$ ,
- wytworzenie udaru przez rozładowanie  $C_0$  połączonych szeregowo w czasie przeskoku w iskiernikach  $I$ ,

$$R_4 \gg R_3$$



30-stopniowy generator  
udarów 6 MV, 450 kJ,  
firma Ferranti,  
laboratorium EdF  
w Les Renardières,  
Francja.

## Pomiary wysokich napięć

### Iskierniki pomiarowe

Dwie jednakowe elektrody kuliste.

### Zasada pomiaru:

powtarzalna zależność między napięciem przeskoku  $U_p$  a średnicą  $D$  i odstępem kul  $a$ .

Możliwy pomiar wartości maksymalnej dowolnego przebiegu napięciowego (stałe, przemienne  $f < 20$  kHz, udarowe  $T_2 > 3 \mu\text{s}$ ).

Średnice  $D$  kul znormalizowane [mm]:

62,5    125,    250,    500,    750,    1000,    1500,    2000.

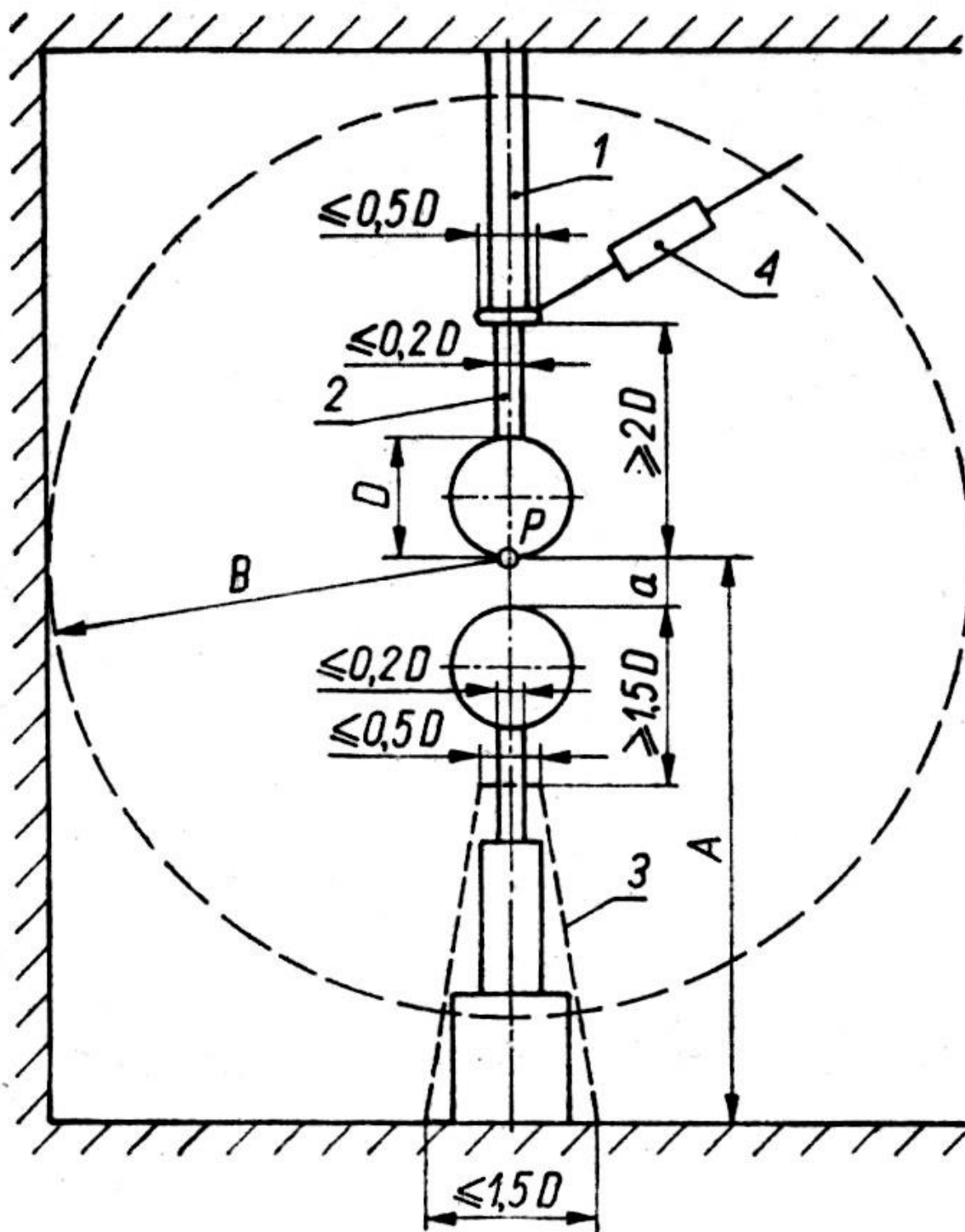
Konstrukcja pionowa, może być pozioma dla  $D \leq 250$  mm.

### Dokładność pomiaru:

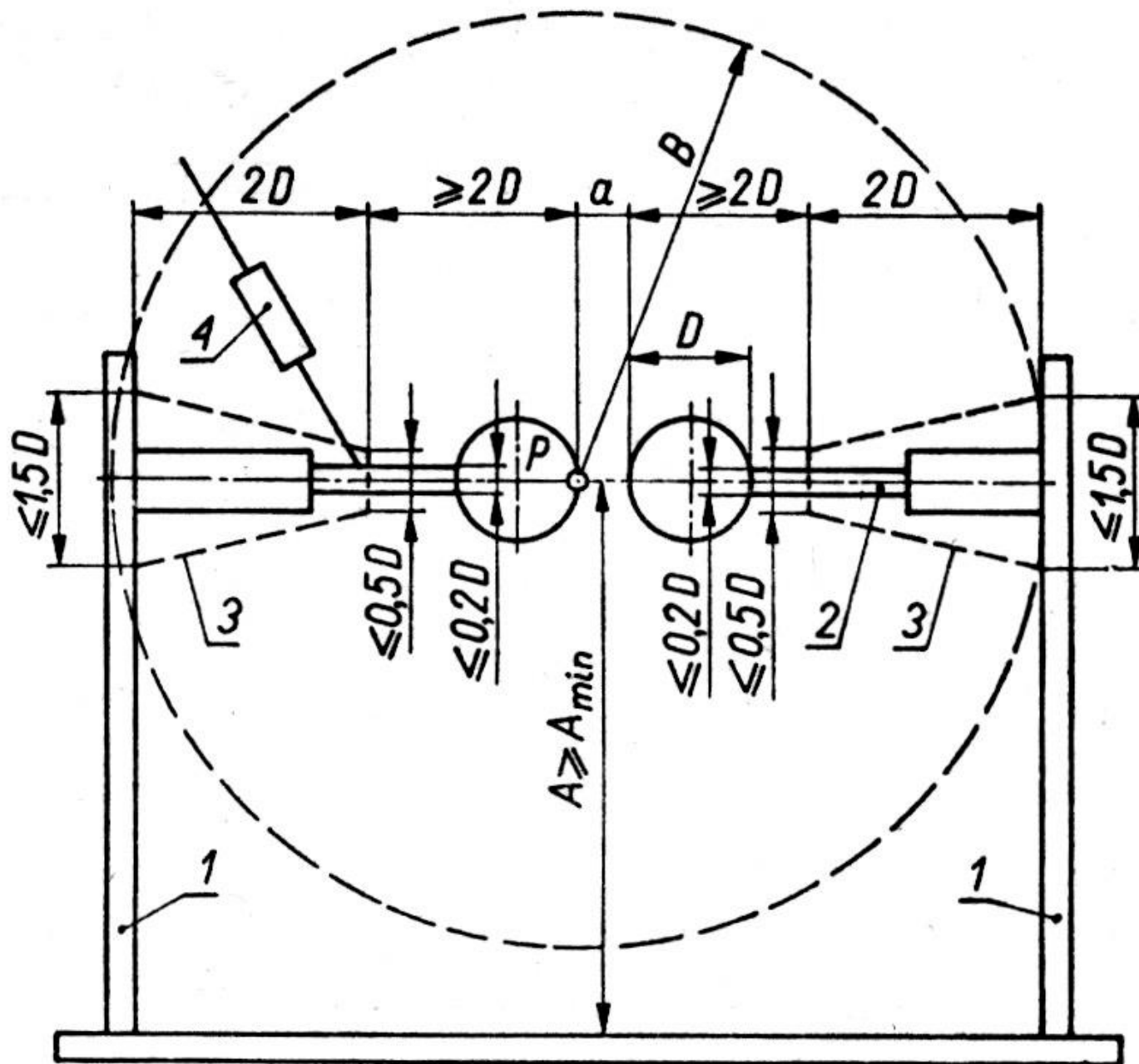
$\pm 3 \%$     warunek:  $a/D \leq 0,5$  (przemienne i udarowe  $T_2 \geq 50 \mu\text{s}$ ),

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

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

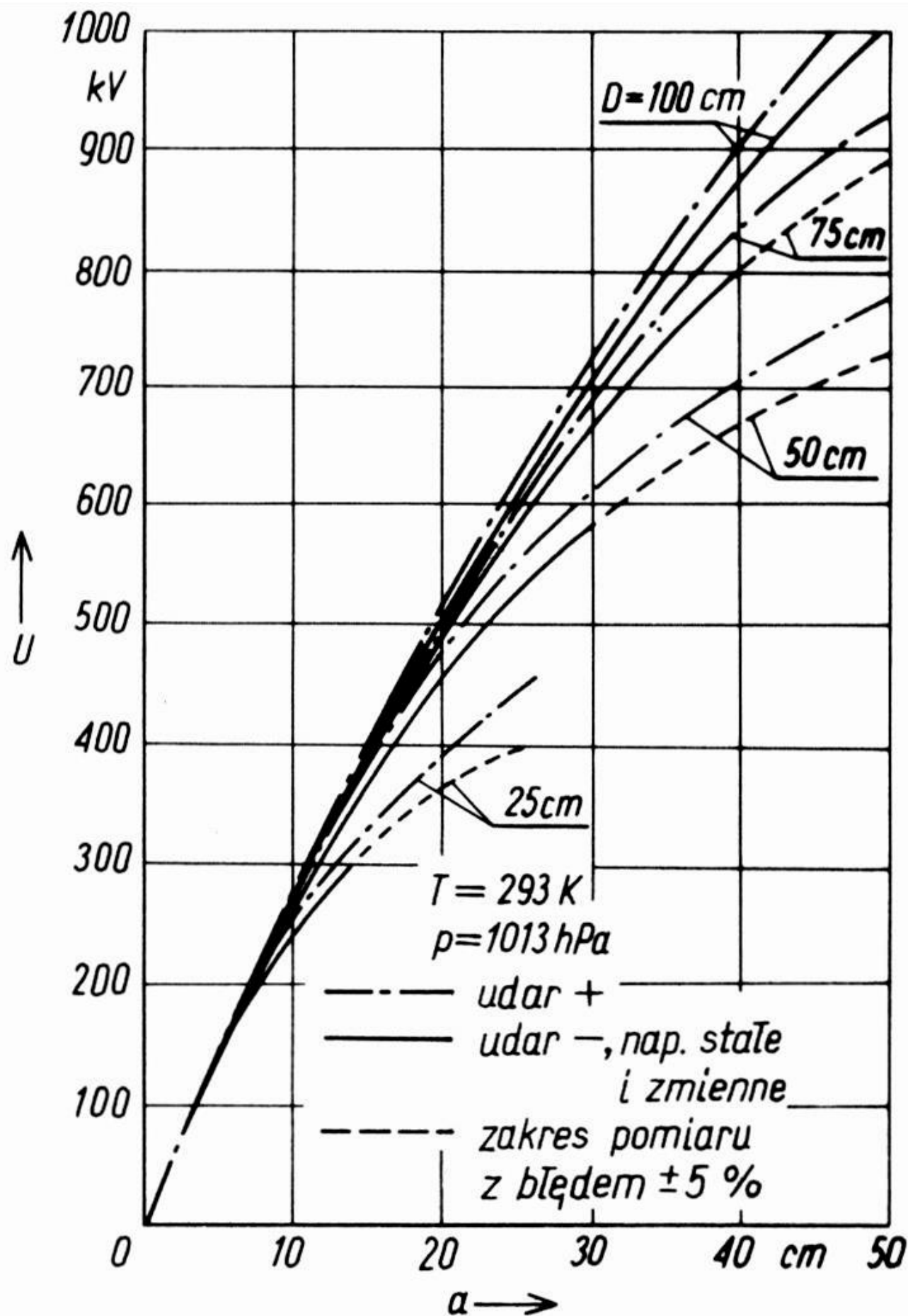


Iskiernik pomiarowy:  
 1 - wspornik izolacyjny,  
 2 - pręt,  
 3 - granica wymiarów  
 elementu mocującego,  
 4 - rezystor tłumiący.



Iskiernik pomiarowy:

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



Wykresy

$U = f(a)$

iskierników  
pomiarowych.

## Woltomierze elektrostatyczne

Zasada działania:

siła działająca na elektrodę układu płaskiego zależy od energii zgromadzonej w polu elektrycznym między elektrodami:

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

$F$  - siła działająca na elektrodę,

$W_e$  - energia elektryczna,

$x$  - przesunięcie elektrody zgodne z kierunkiem pola,

$\varepsilon$  - przenikalność elektryczna ośrodka między elektrodami,

$S$  - powierzchnia każdej elektrody,

$E$  - natężenie pola (jednorodnego) między elektrodami,

$U_0$  - napięcie między elektrodami,

$a$  - odstęp między elektrodami.

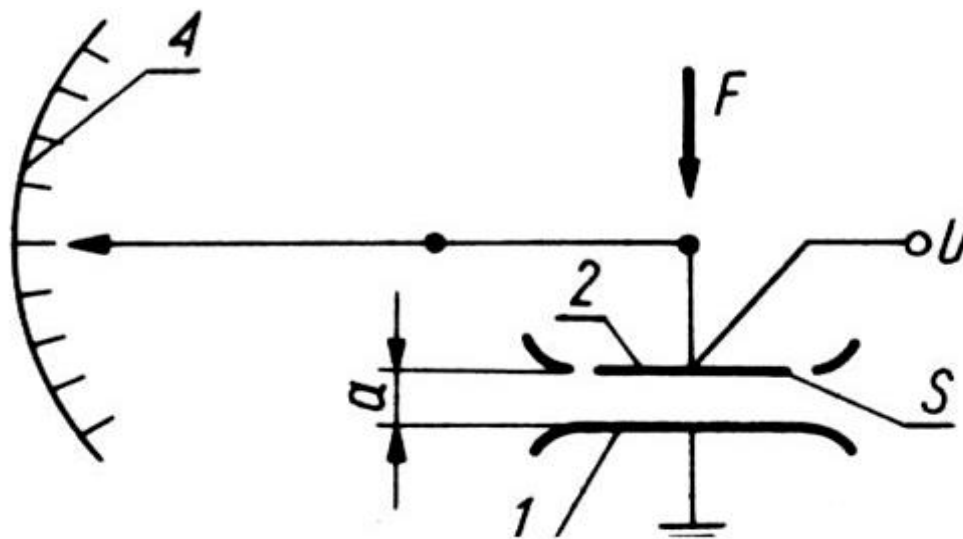


Dla napięć przemiennych należy uwzględnić wartość średnią siły:

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

$U$  - wartość skuteczna napięcia.

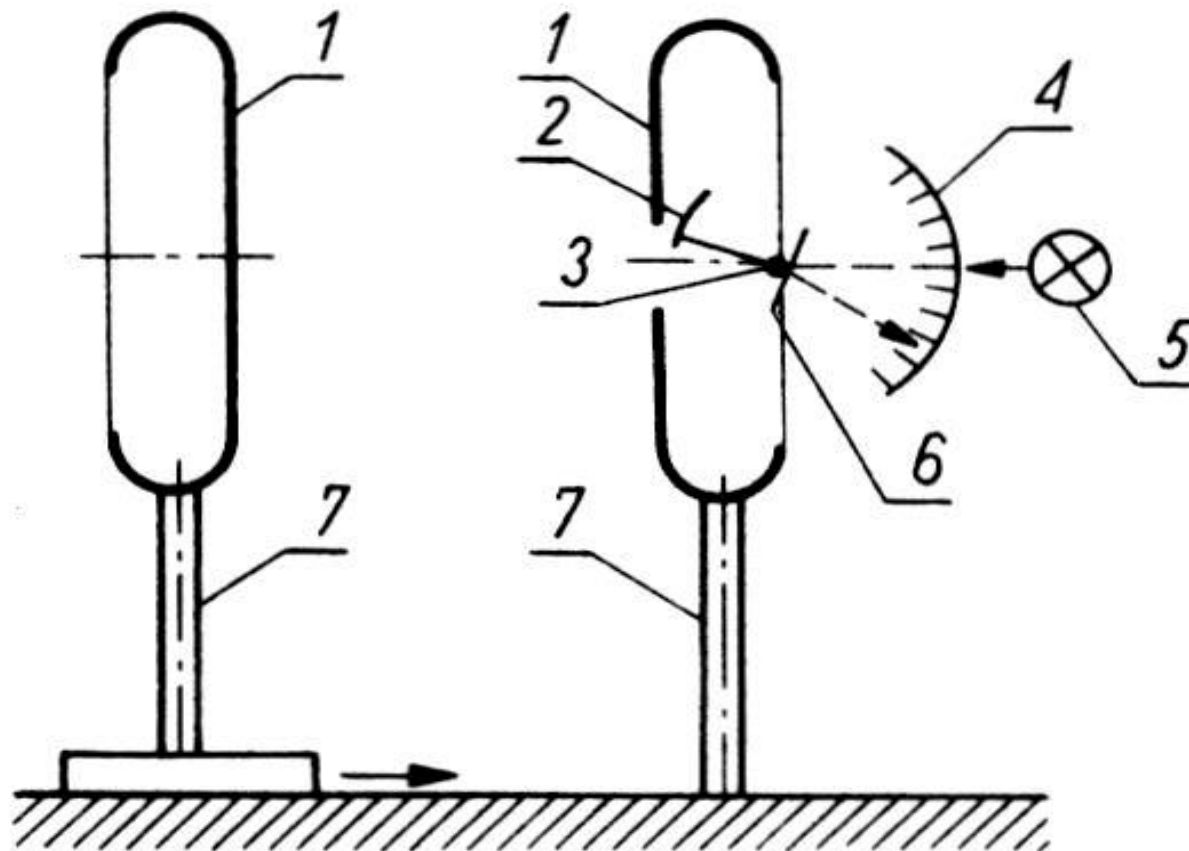
### Woltomierz elektrostatyczny absolutny



Woltomierz elektrostatyczny absolutny:

- 1 - elektroda stała,
- 2 - elektroda ruchoma,
- 4 - skala.

## Woltomierz elektrostatyczny techniczny



Woltomierz elektrostatyczny techniczny:

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  $\alpha$ .

W stanie równowagi obu momentów:

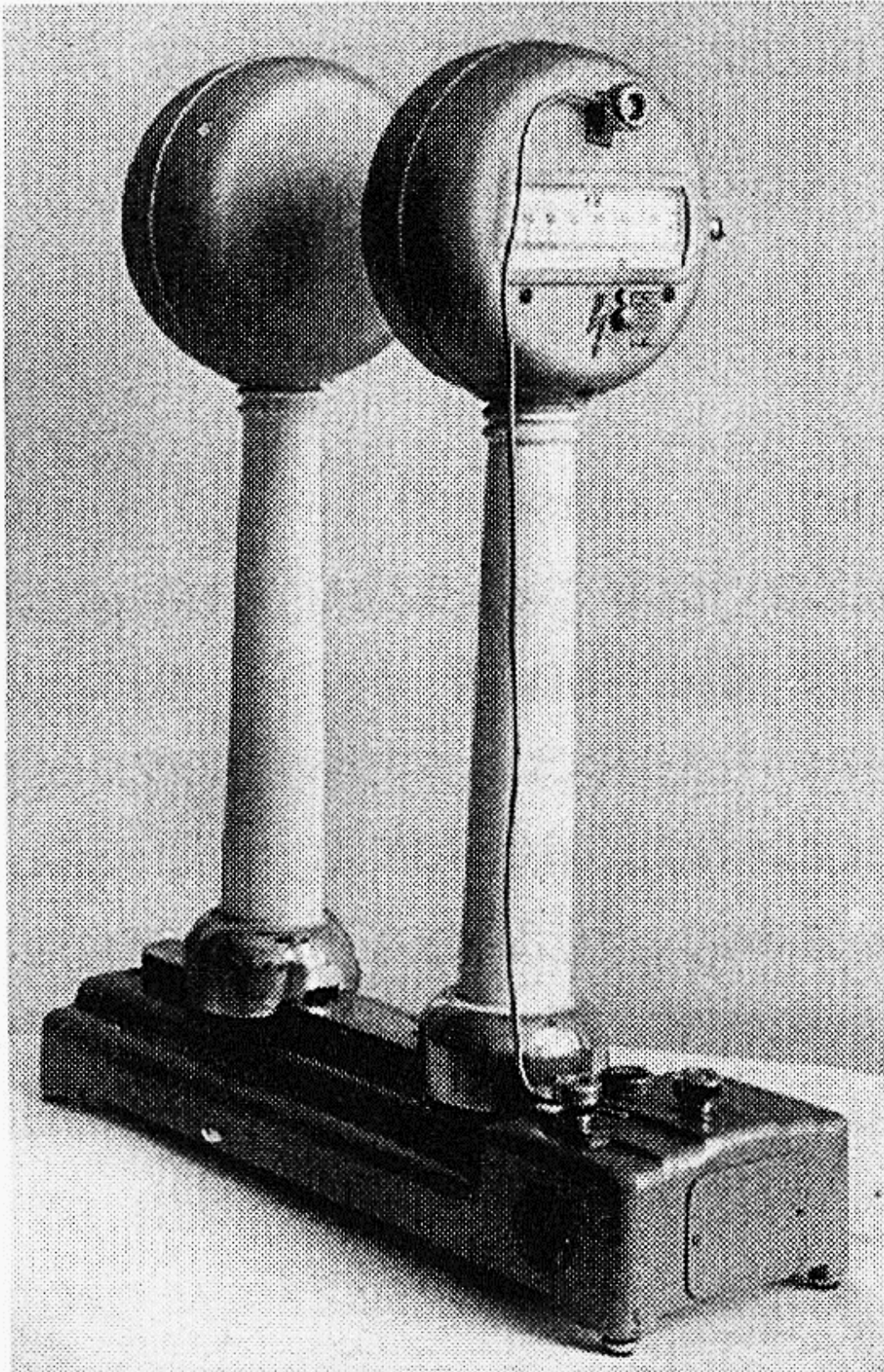
$$\alpha = K \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \frac{dC}{dx}$$

$K$  - stała.

Przy odpowiednim rozwiązaniu konstrukcyjnym:

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

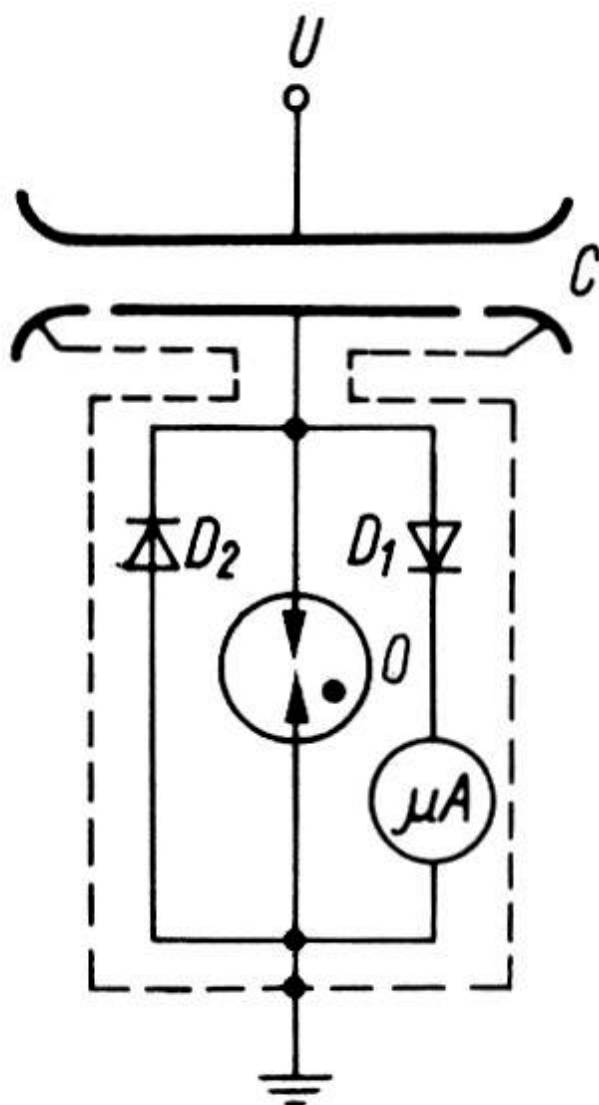
Kąt wychylenia miernika jest proporcjonalny do wartości skutecznej napięcia.



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

## Układy do pomiarów pośrednich

### Układ z kondensatorem szeregowym, diodami i mikroamperomierzem

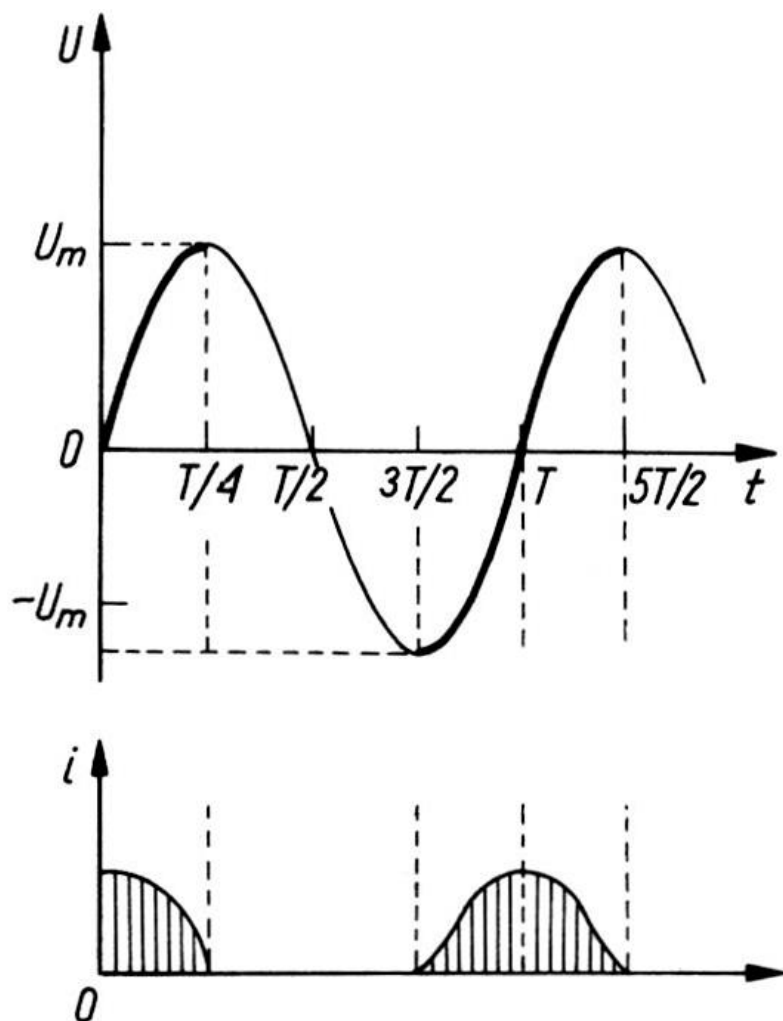


Pomiar wartości szczytowej napięcia przemiennego nieodkształconego:

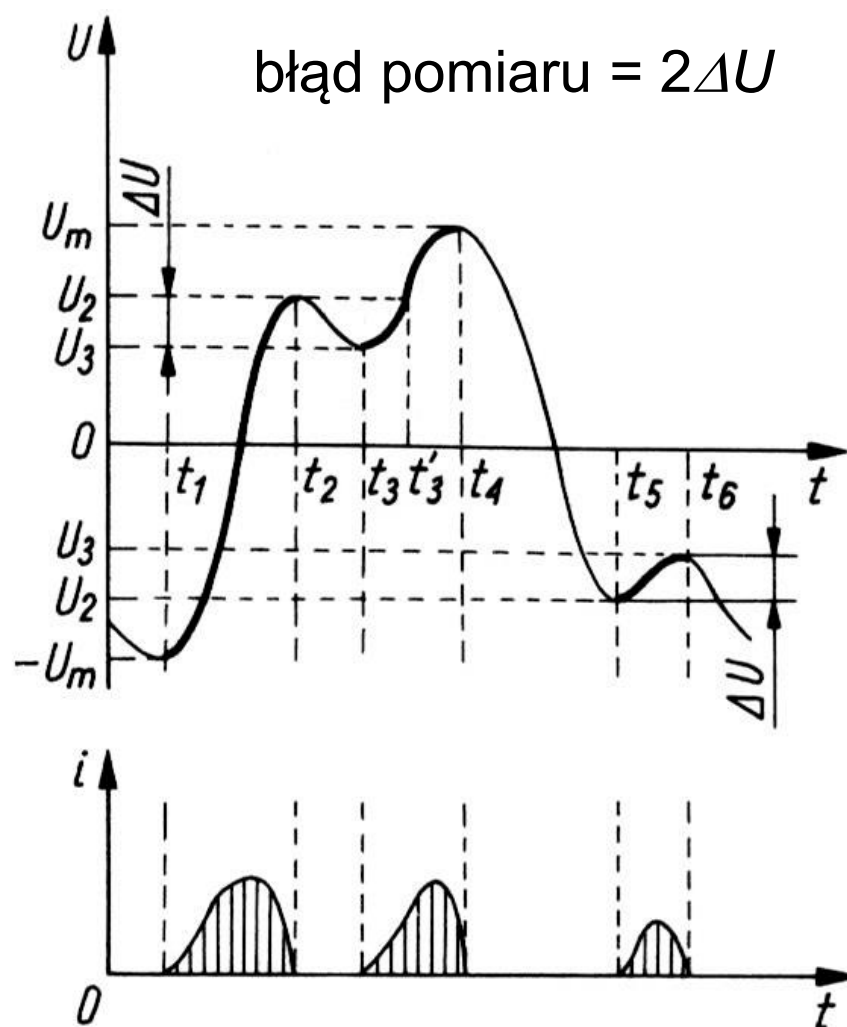
$$U_m = \frac{I_{av} T}{2C}$$

$C$  - kilkadziesiąt pikofaradów,  
 $T$  - okres napięcia przemiennego,  
 $I_{av}$  - wartość średnia prądu pojemnościowego płynącego przez mikroamperomierz:

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



Przebiegi napięcia nieodkształconego i prądu w układzie z kondensatorem szeregowym.



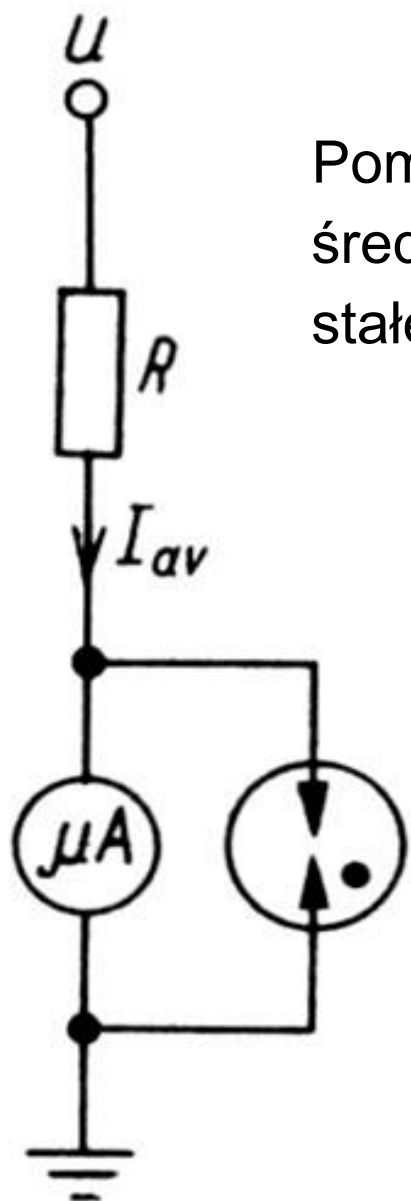
Przebiegi napięcia odkształconego i prądu w układzie z kondensatorem szeregowym (błędny pomiar).

## Układ z kondensatorem szeregowym i mikroamperomierzem

## Układ z rezystorem szeregowym i mikroamperomierzem

Pomiar wartości skutecznej napięcia przemiennego nieodkształconego:

$$U = \frac{I}{\omega C}$$



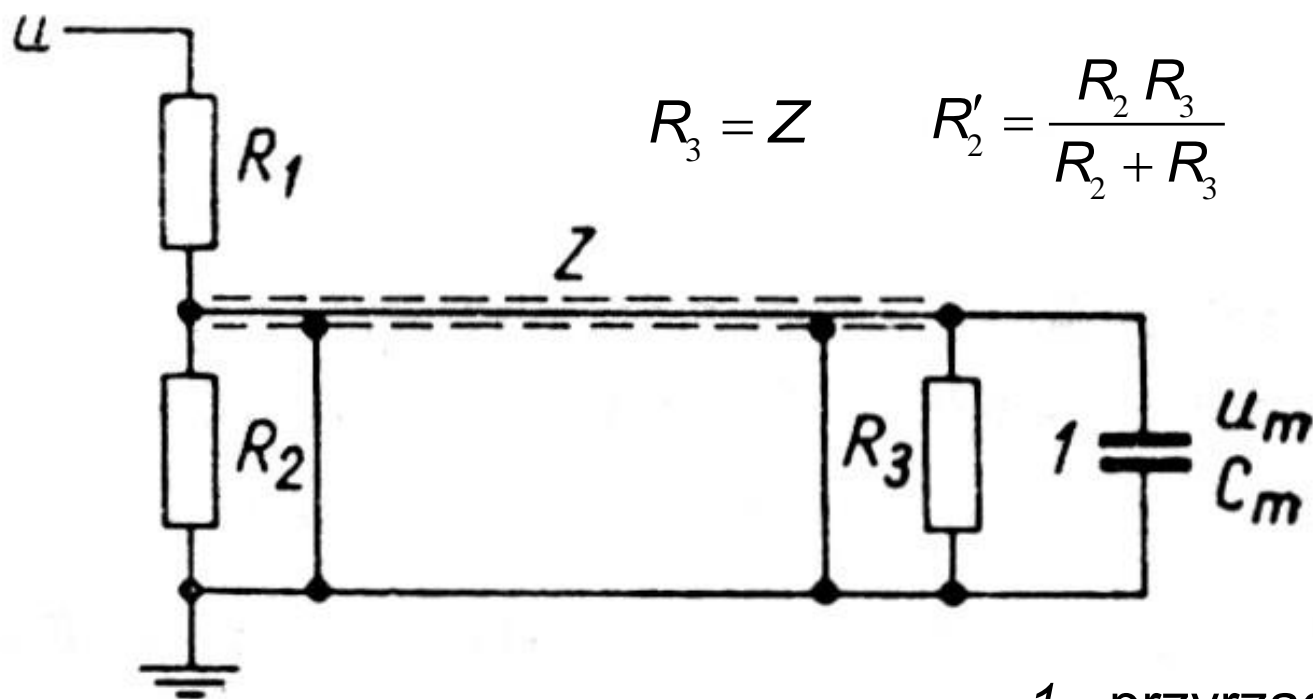
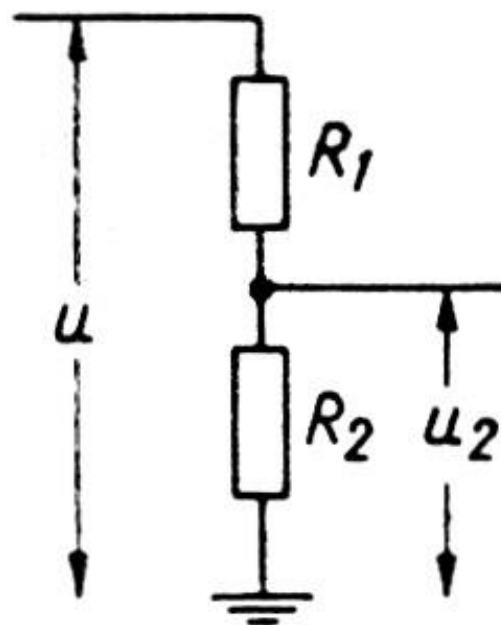
Pomiar wartości średniej napięcia stałego.

## Dzielniki napięcia

### Dzielnik rezystancyjny

Pomiar napięć udarowych i stałych:

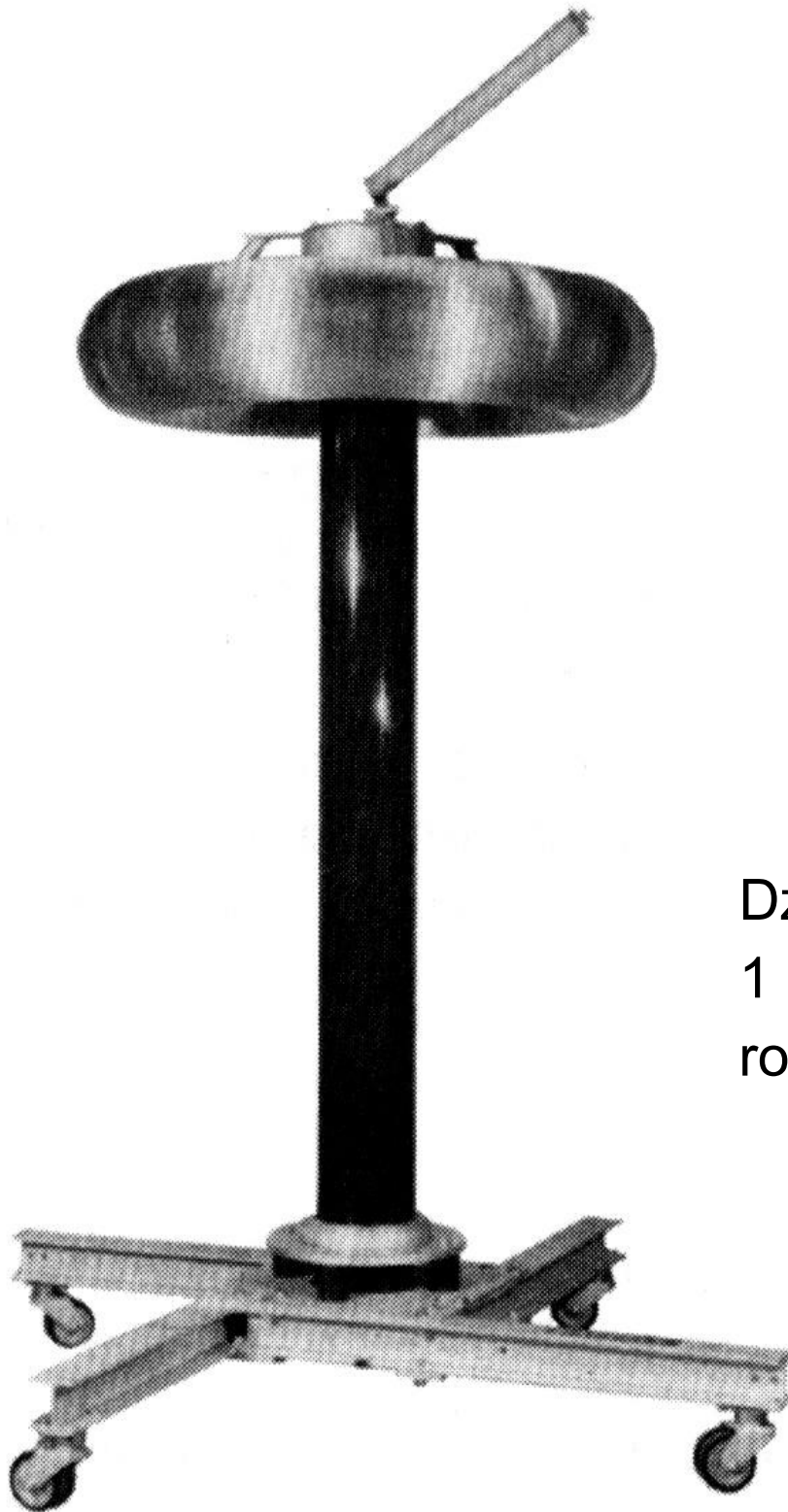
$$u_2 = u \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



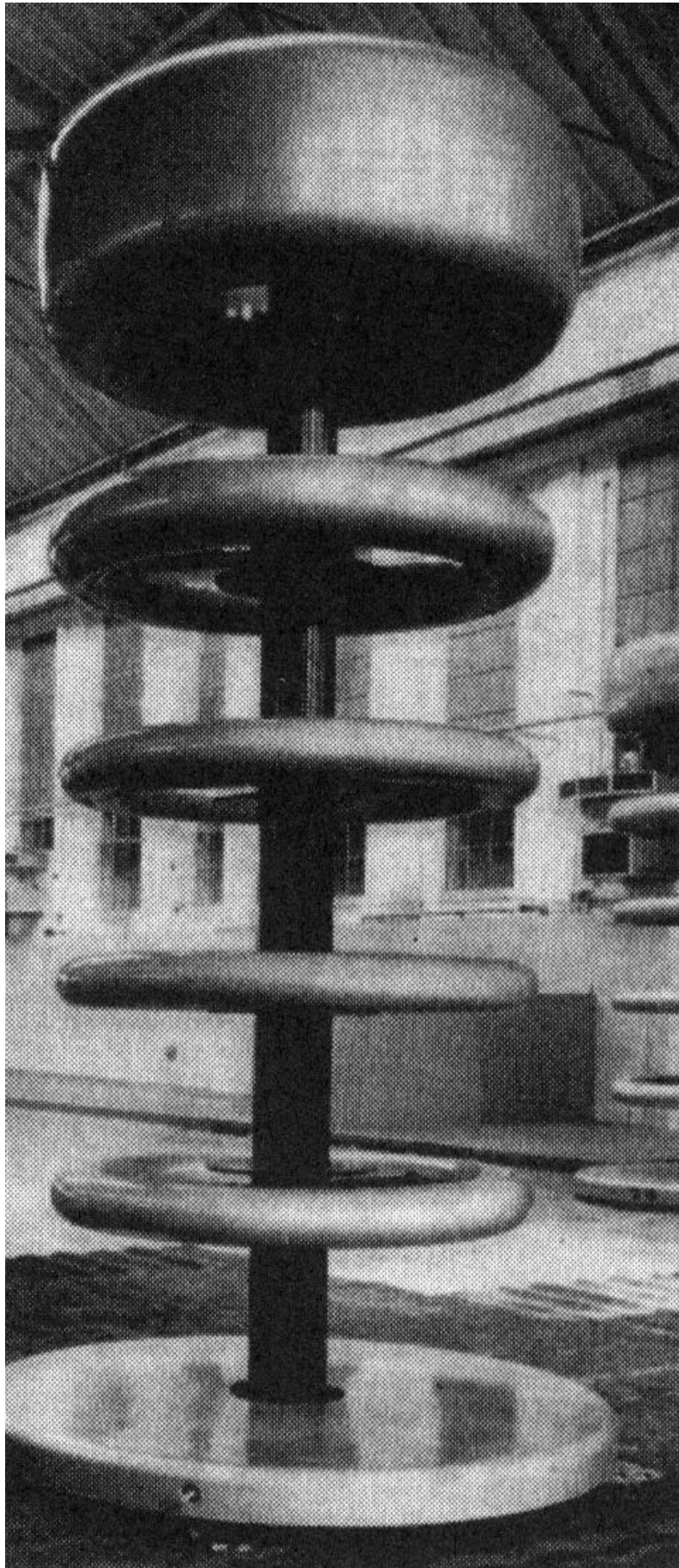
$$R_3 = Z \quad R'_2 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}$$

1 - przyrząd pomiarowy.





Dzielnik rezystancyjny na napięcie  
1 MV z ekranem (elektrodą sterującą  
rozkładem pola).

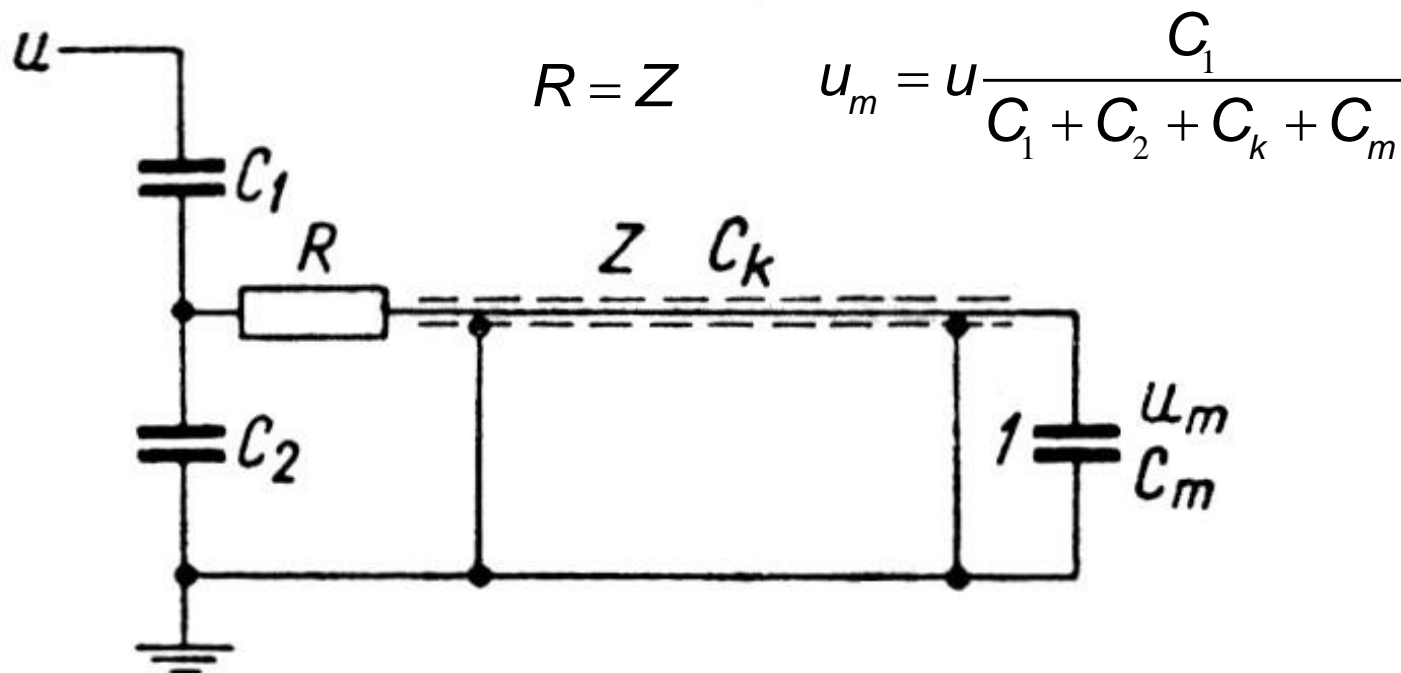
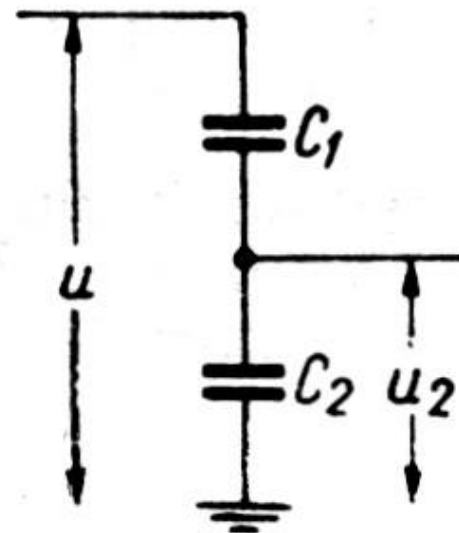


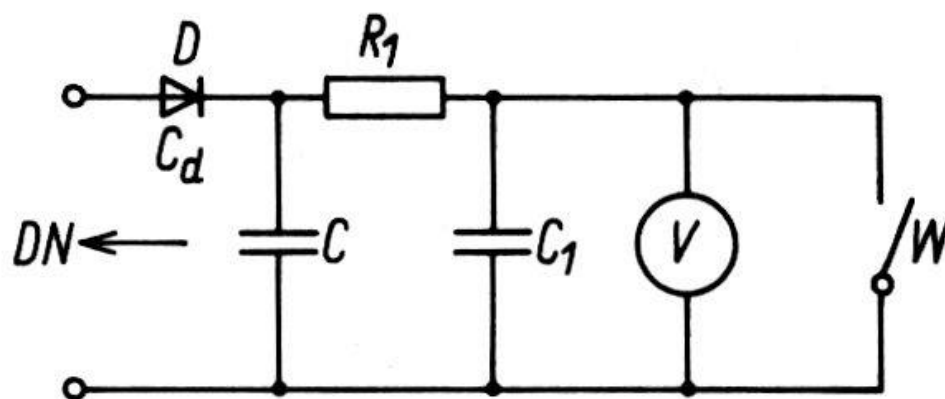
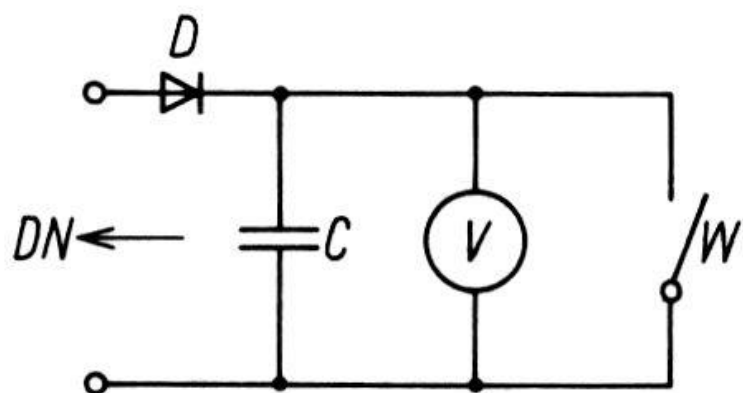
Dzielnik rezystancyjny  
na napięcie 2 MV,  
z pięcioma ekranami.

## Dzielnik pojemnościowy

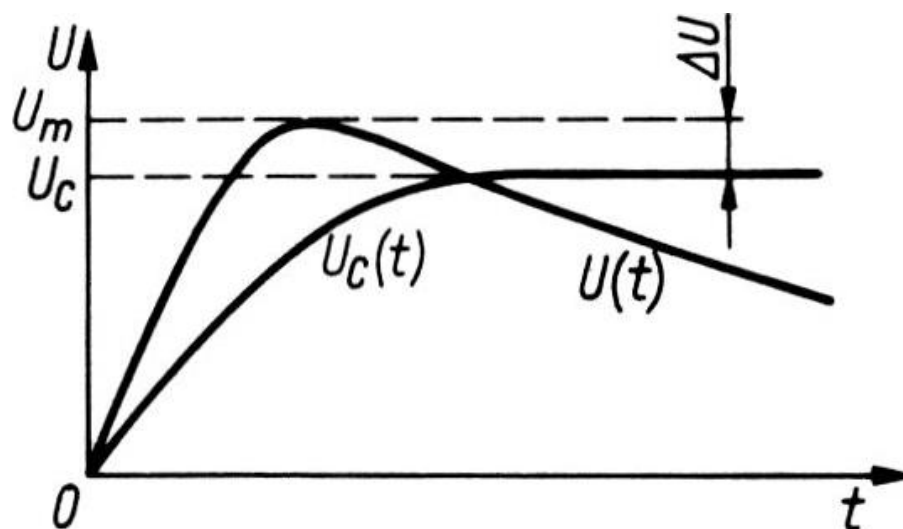
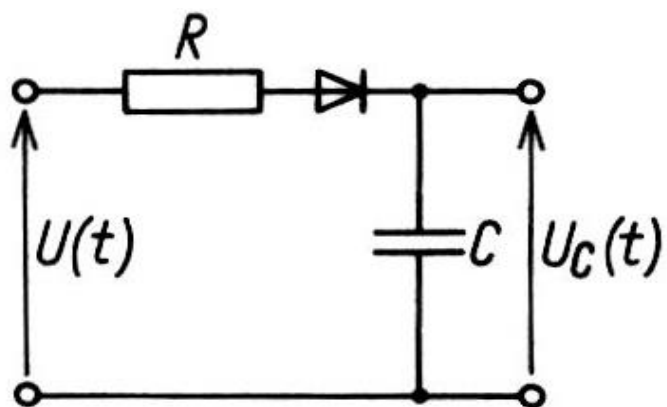
Pomiar napięć przemiennych:

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





Układy mierników wartości szczytowej napięcia



Przebiegi napięcia w miernikach wartości szczytowej.