

dr hab. inż. Stanisław Wyderka, prof. PRz,  
tel.: 178651773, e-mail: swyderka@prz.edu.pl,  
Katedra Energoelektroniki, Elektroenergetyki  
ul. W. Pola 2, budynek B, pokój B106

1. Wysokie napięcia w elektroenergetyce, układy izolacyjne
2. Wyładowania elektryczne w gazach – źródła elektronów, wyładowanie samodzielne, zupełne, niezupełne
3. Wytrzymałość elektryczna powietrza – statyczna, udarowa, wpływ warunków atmosferycznych; ulot
4. Wytrzymałość układów gazowo-ciśnieniowych
5. Wyładowania elektryczne w dielektrykach ciekłych i stałych – mechanizmy wyładowań, wytrzymałość dielektryków
6. Wytrzymałość układów izolacyjnych złożonych – bariery izolacyjne, układy izolacyjne wsporcze i przepustowe
7. Konstrukcje układów izolacyjnych – linii napowietrznych i kablowych, kondensatorów, maszyn wirujących i transformatorów
8. Przepięcia w sieciach elektroenergetycznych – atmosferyczne, wewnętrzne; rozchodzenie się przepięć
9. Ochrona odgromowa i przepięciowa – urządzenia piorunochronne, ograniczniki przepięć, koordynacja izolacji
10. Laboratoria wysokich napięć – układy probiercze napięć przemiennych i stałych, generatory napięć udarowych
11. Metody pomiaru wysokich napięć – aparatura pomiarowa i rejestracyjna

## Literatura

1. Flisowski Z.: Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 2015.
2. Kuffel E., Zaengl W.S., Kuffel J.: High-voltage engineering. Newnes, Oxford, Boston, Melbourne 2000.
3. Gacek Z.: Technika wysokich napięć. Skrypty Uczelniane Nr 1830, Politechnika Śląska, Gliwice 1994.
4. Küchler A.: High voltage engineering, Fundamentals - technology - applications. Springer Vieweg, Springer-Verlag GmbH Germany 2018.
5. Haddad A., Warne D.: Advances in high voltage engineering. Power and energy Series 66, The Institution of Engineering and Technology, UK London, 2007.
6. Pohl Z. (red.): Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. OWPWr, Wrocław 2003.
7. Arora R., Mosch W.: High voltage and electrical insulation engineering. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011.
8. Mościcka-Grzesiak H. i in.: Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce. WPP, Poznań, T I. 1996. T II. 1999.
9. Denno K.: High voltage engineering in power systems. CRC Press, Inc., Boca Raton, London, New York, 1992, Reissued by CRC Press in 2018.

## Informacje ogólne

Domeny, w których wysokie napięcie (WN) ma znaczenie:

- energetyka i energetyka jądrowa,
- elektromedycyna,
- ochrona środowiska,
- przemysł: chemiczny, tekstylny, papierniczy i konsumpcyjny.

Różnice między tymi domenami dotyczą jedynie sposobu wykorzystania lub eliminacji zjawisk WN, głównie:

- wyładowania elektryczne,
- przepięcia.

Przykłady wykorzystania wyładowań elektrycznych są następujące:

- odpylanie gazu (elektrofiltry),
- rozpylanie aerozolu (pokoje inhalatorów),
- rozpylanie katodowe (malowanie elektrostatyczne, metalizacja),
- produkcja ozonu (ozonizator),
- sortowanie ziarna.

Można wybrać trzy główne grupy problemów z WN:

- wyładowania elektryczne i wytrzymałość izolacji,
- przepięcia i zabezpieczenia przeciwprzepięciowe,
- technika testowa i pomiarowa.

W ramach wyładowań elektrycznych i wytrzymałości dielektrycznej uwzględnia się zjawiska występujące w polu elektrycznym.

Zjawiska te dotyczą między innymi:

- procesów jonizacji,
- ruch naładowanych cząstek w polu elektrycznym,
- wyładowań niezupełnych, przeskoku iskier w gazach, przebicia dielektryków ciekłych i stałych.

Warunki pojawienia się i rozwoju wyładowań, a także dobór optymalnych parametrów układów izolacyjnych są przedmiotem i celem tych rozważań.

Miarą wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego jest wartość natężenia pola elektrycznego lub odpowiadającego mu napięcia, przy którym następuje przebicie izolacji.

Napięcie przebicia jest utożsamiane z najwyższym napięciem wytrzymywanym, którego przekroczenie powoduje uszkodzenie układu izolacyjnego.

Na uszkodzenie izolacji silnie wpływa występująca w niej niejednorodność naprężeń elektrycznych. Niejednorodność pola elektrycznego zależy od:

- niejednorodności struktury materiału izolacyjnego,
- geometrii elektrod.

Niejednородne naprężenia elektryczne mogą w pewnym punkcie dielektryka osiągnąć swoją wartość krytyczną, przy której rozpoczyna się wyładowanie, a dielektryk traci lokalnie swoje własności izolacyjne.

Napięcie między elektrodami, przy którym rozpoczyna się wyładowanie nazywa się napięciem początkowym wyładowania.

Kiedy wartość krytyczna naprężeń elektrycznych przekracza ich średnią wartość, wówczas napięcie początkowe jest mniejsze niż napięcie przebicia.

Niebezpieczne naprężenia elektryczne mogą być spowodowane przez napięcia robocze, ale zwykle powodują je przepięcia.

Przepięcia pojawiają się z powodu wpływu wewnętrznych lub zewnętrznych zjawisk elektromagnetycznych, takich jak:

- procesy łączeniowe,
- wyładowania piorunowe.

Gdy przepięciom nie można zapobiec, należy je zredukować za pomocą środków ochronnych.

Technika probiercza i pomiarowa służy do badania skutków naprężeń i warunków wytrzymałościowych.

Sprzęt wykorzystywany do tego celu składa się przede wszystkim ze źródeł prądu i napięcia (transformatory probiercze, generatory impulsów, źródła prądu stałego) oraz specjalnych instrumentów pomiarowych i rejestracyjnych.

## Wysokie napięcia w elektroenergetyce

Energia elektryczna jest przy wysokich napięciach:

- wytwarzana
- przesyłana
- rozdzielana
- użytkowana

### Ograniczenie mocy przesyłowej linii

Czynnik ograniczający: impedancja falowa linii ( $Z_c$ )

Zależność mocy przesyłowej  $P$  linii od jej napięcia znamionowego  $U$  i impedancji falowej  $Z_c$ :

$$P \cong S = \sqrt{3} UI, \quad \text{przy } \cos \varphi \cong 1$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{3} Z_c}, \quad Z_c = \frac{U}{\sqrt{3} I}$$

$$P \cong \frac{U^2}{Z_c}, \quad U \cong \sqrt{P \cdot Z_c}$$

Przykład:

$$P = 100 \text{ MW}, Z_c = 250 \Omega$$

$$U = \sqrt{100 \cdot 10^6 \cdot 250} = 158114 \text{ V} \cong 158 \text{ kV}$$

Zależność mocy przesyłowej  $P$  linii o  $Z_c = 250 \Omega$  od napięcia znamionowego  $U$ :

$U$	kV	220	400	750
$P$	MW	193	640	2250

### Koszty przesyłu energii elektrycznej:

- koszty inwestycyjne i eksploatacyjne,
- koszty strat na ciepło Joule'a:

$$\Delta P = 3I^2 R = 3 \left( \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} \right)^2 R = \frac{P^2}{U^2} \frac{R}{\cos^2 \varphi}$$

Minimum sumy wszystkich kosztów → optymalne napięcie przesyłu

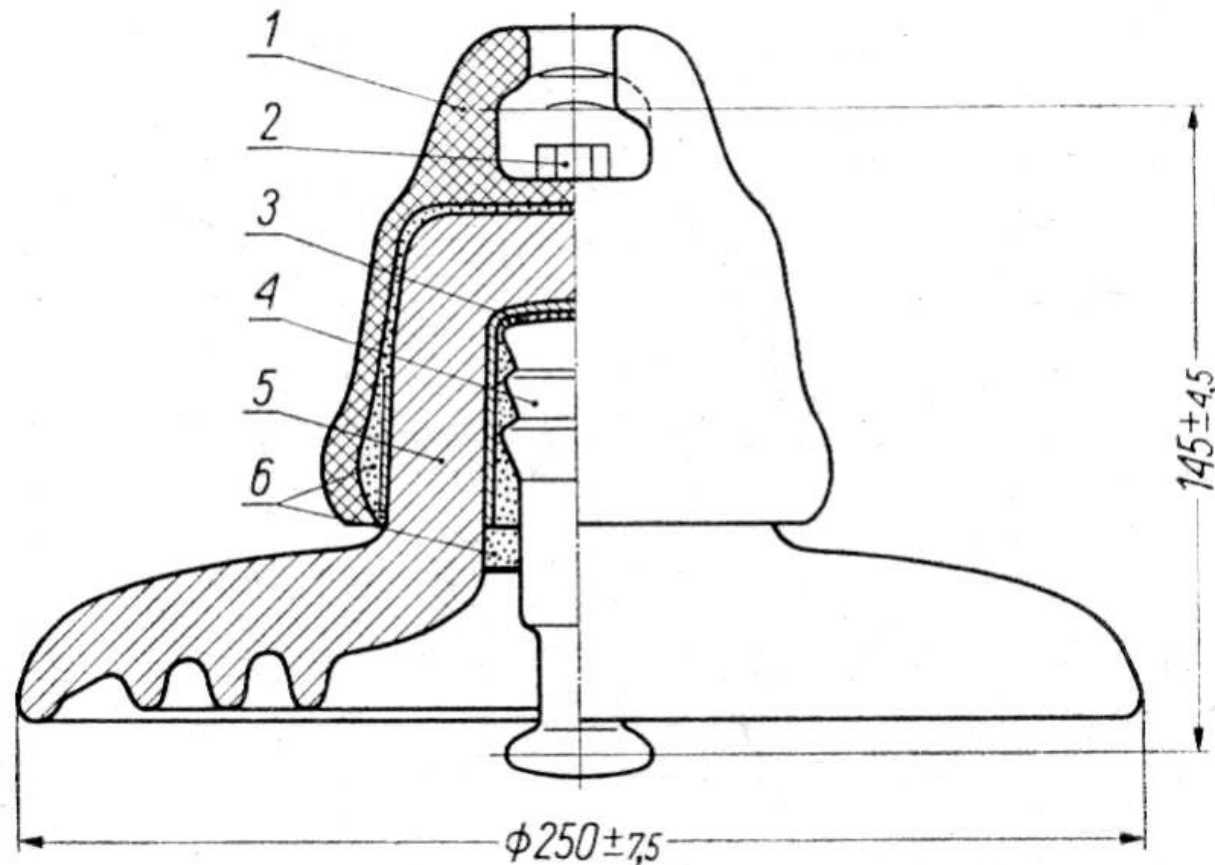


## **Układ izolacyjny** – przedmiot zainteresowań TWN

Parametry opisujące układ izolacyjny:

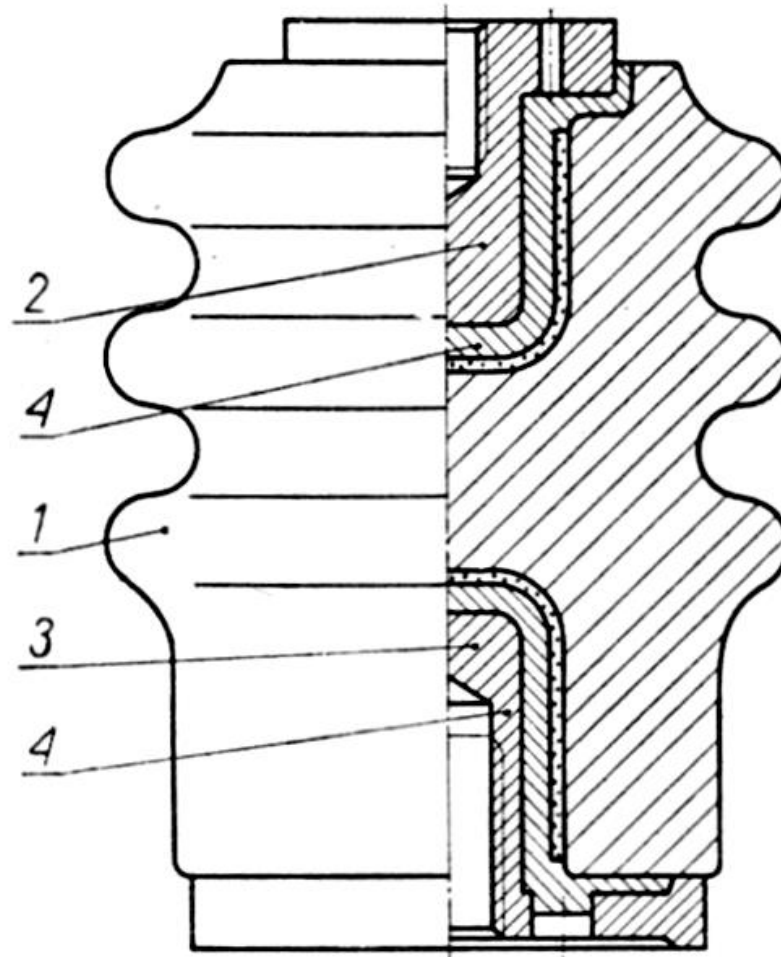
- materiał izolacyjny:
  - własności,
  - ukształtowanie,
- elektrody:
  - kształt,
  - rozmieszczenie (odstęp).

## Przykładowe układy izolacyjne



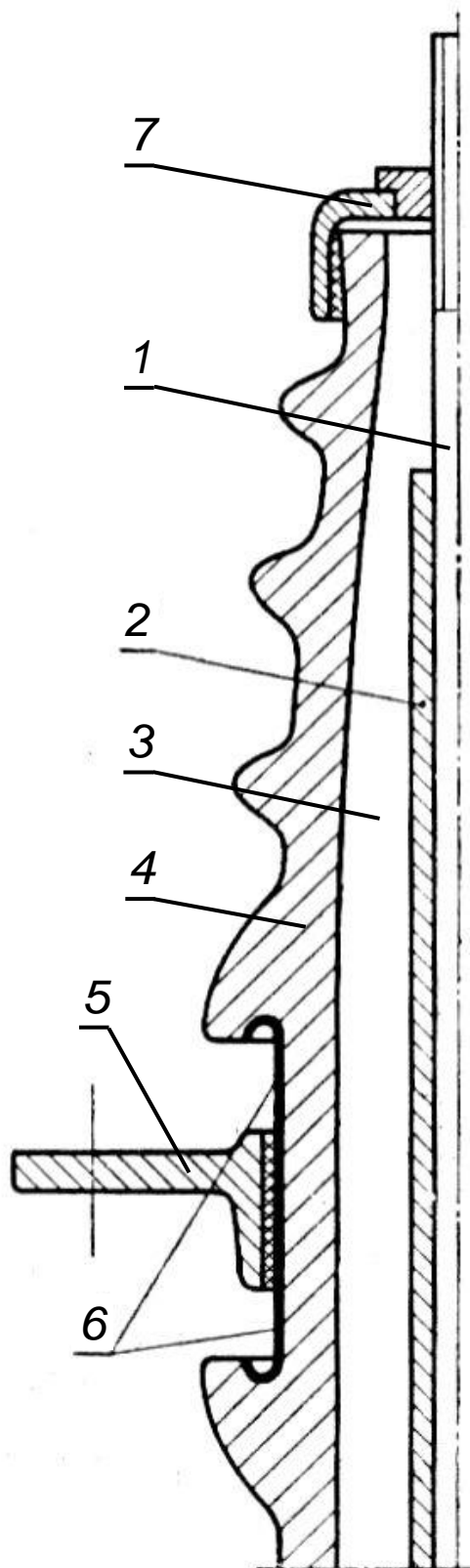
Izolator liniowy wiszący kołpakowy:

- 1 - kołpak (elektroda),
- 2 - zawlecзка,
- 3 - podkładka,
- 4 - trzonek (elektroda),
- 5 - porcelana (materiał izolacyjny),
- 6 - cement.



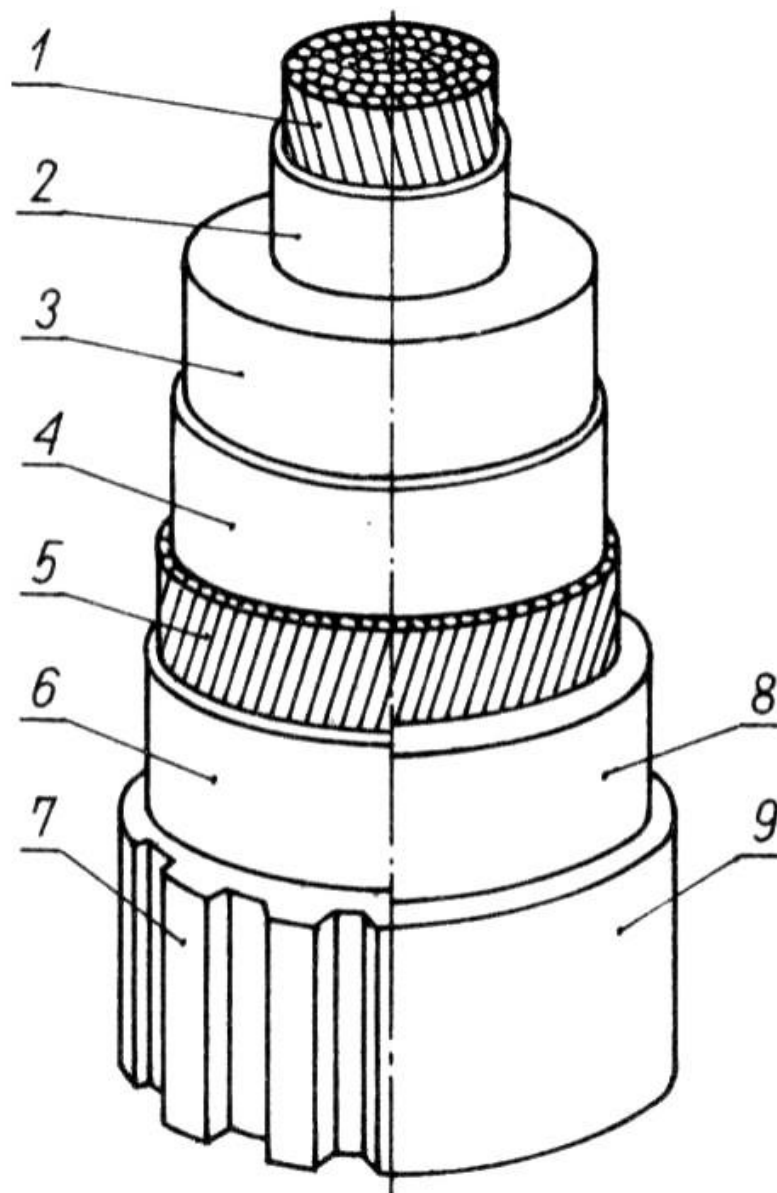
Izolator wsporczy (stacyjny) wewnętrzny:

- 1 - porcelana (materiał izolacyjny),
- 2 - okucie górne (elektroda),
- 3 - okucie dolne (elektroda),
- 4 - kit siarkowy.



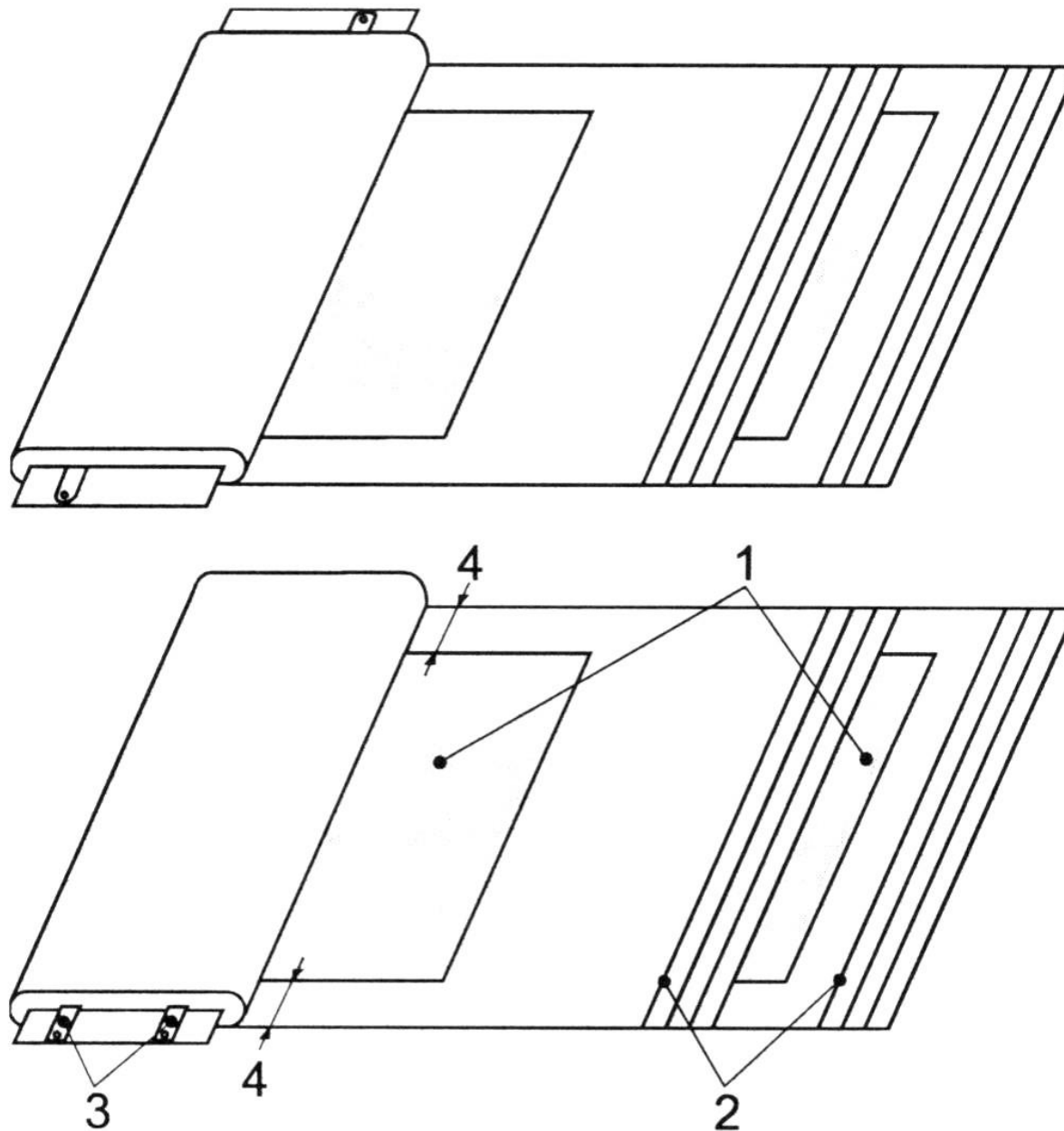
Izolator przepustowy stacyjny  
wnętrzowo-wnętrzowy (półprzekrój):

- 1 - sworzeń (elektroda wewnętrzna),
- 2 - warstwa papieru bakelizowanego na sworzniu (materiał izolacyjny),
- 3 - powietrze (materiał izolacyjny),
- 4 - porcelana (materiał izolacyjny),
- 5 - pierścień z kołnierzem (elektroda zewnętrzna),
- 6 - metalizacja połączona z pierścieniem, (część elektrody zewnętrznej),
- 7 - pierścień mocujący sworzeń (część elektrody wewnętrznej).



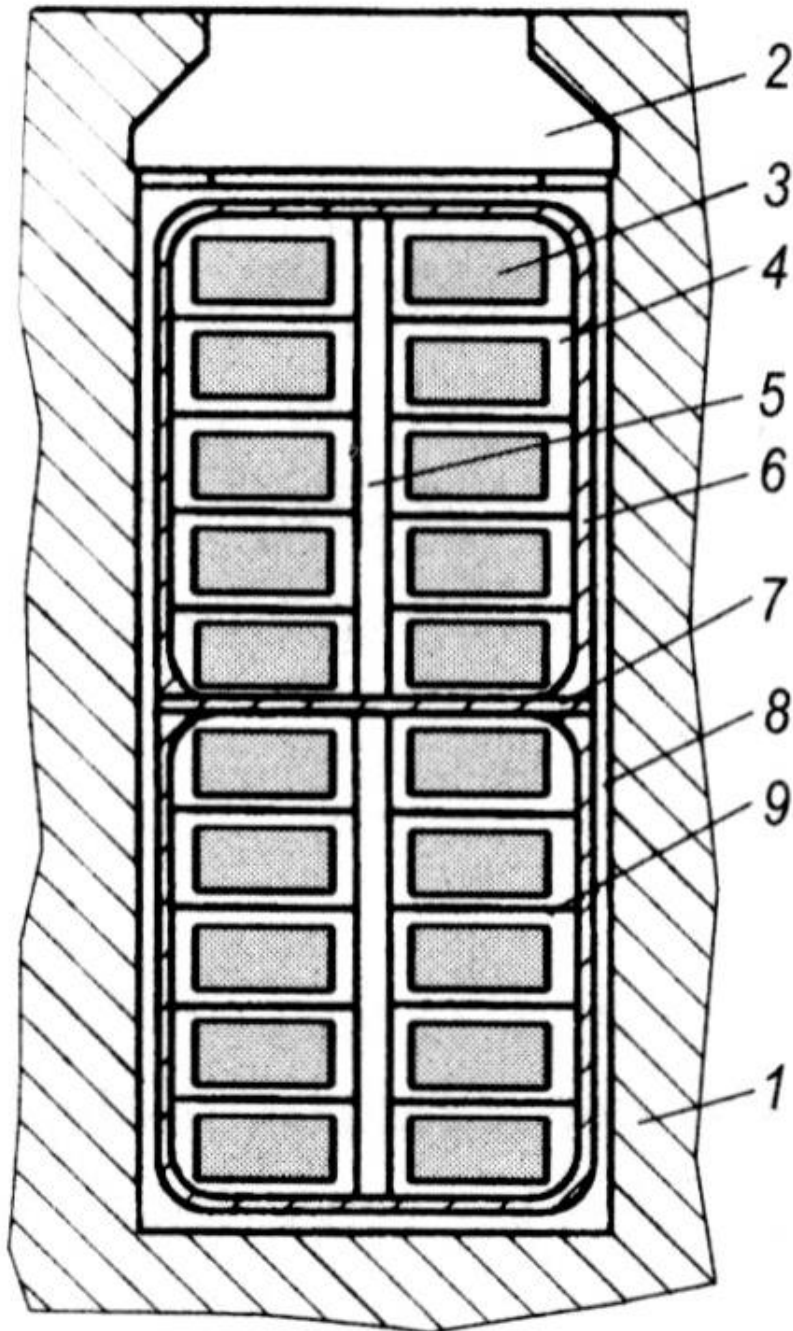
Kabel jednożyłowy z izolacją polietylenową:

- 1 - żyła miedziana (elektroda wewnętrzna),
- 2 - polietylen półprzewodzący (część elektrody wewnętrznej),
- 3 - polietylen (materiał izolacyjny),
- 4 - polietylen półprzewodzący (część elektrody zewnętrznej),
- 5 - warstwa drutów miedzianych (elektroda zewnętrzna),
- 6, 7, 8, 9 - zewnętrzne warstwy ochronne.



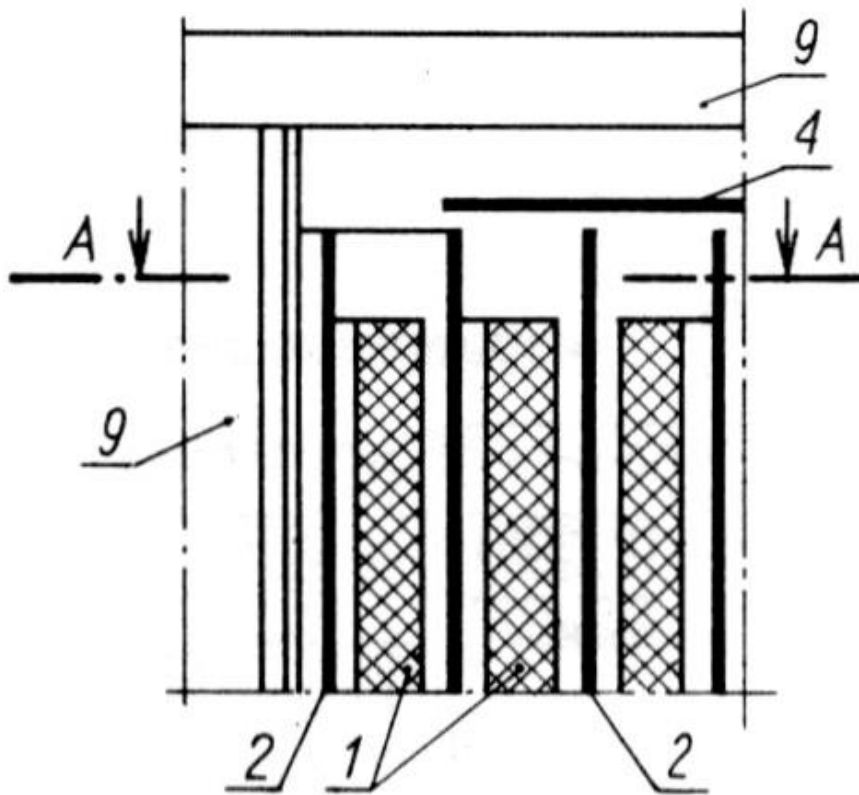
Konstrukcja zwijek kondensatorowych:

- 1 - folie aluminiowe (elektrody),
- 2 - warstwa papieru lub folii termoplastycznej (materiał izolacyjny),
- 3 - wyprowadzenia elektrod,
- 4 - różnica szerokości elektrod i izolacji,



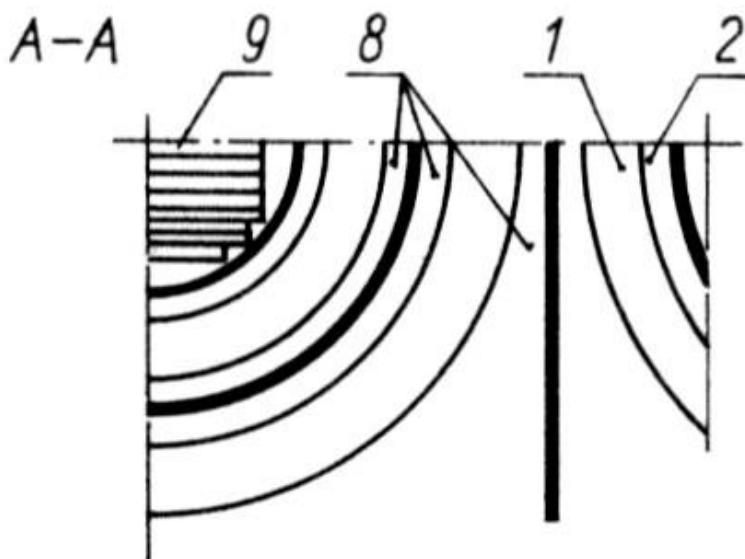
Przekrój poprzeczny uzwojenia stojana generatora:

- 1 - rdzeń stojana (elektroda),
- 2 - klin mocujący uzwojenie,
- 3 - element uzwojenia (elektroda),
- 4 - izolacja elementu uzwojenia,
- 5 - izolacja między grupami elementów uzwojenia,
- 6 - izolacja sekcji uzwojenia,
- 7 - izolacja między sekcjami uzwojenia,
- 8 - izolacja główna pomiędzy uzwojeniem a rdzeniem,
- 9 - izolacja między elementami uzwojenia.



Szkic układu izolacyjnego transformatora olejowego małej mocy z izolacją twardą:

- 1 - uzwojenia (elektrody),
- 2 - tuleja z preszpanu twardego (przegroda w oleju izolacyjnym),
- 4 - kołnierz z preszpanu (przegroda w oleju izolacyjnym),
- 8 - olej (materiał izolacyjny),
- 9 - rdzeń magnetyczny (elektroda).





## Rozkład pola elektrycznego w układach izolacyjnych

rozkład elektrostatyczny (zależny od  $\varepsilon$ )

rozkład upływnościowy (zależny od  $\gamma$ )

### Układ izolacyjny z jednym dielektrykiem jednorodnym

Pole stałe,  $E(t) = \text{const.}$ :

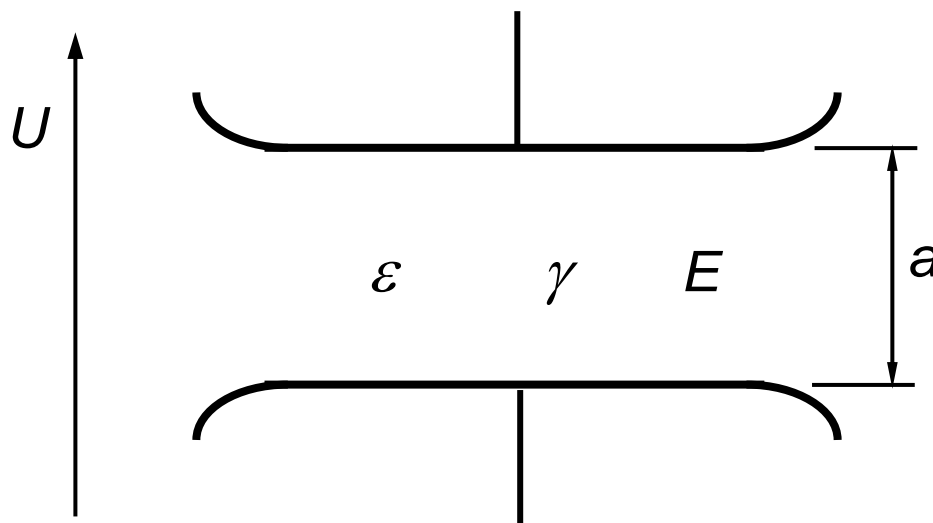
rozkład **niezależny od  $\varepsilon$  i  $\gamma$**

dla układu izolacyjnego płaskiego:  $E_- = \frac{U_-}{a}$

Pole zmienne,  $E(t) = \text{var.}$ :

rozkład **niezależny od  $\varepsilon$  i  $\gamma$**

dla układu izolacyjnego płaskiego:  $E_{\sim} = \frac{U_{\sim}}{a}$



Układ izolacyjny uwarstwiony

Pole stałe,  $E(t) = \text{const.}$ :

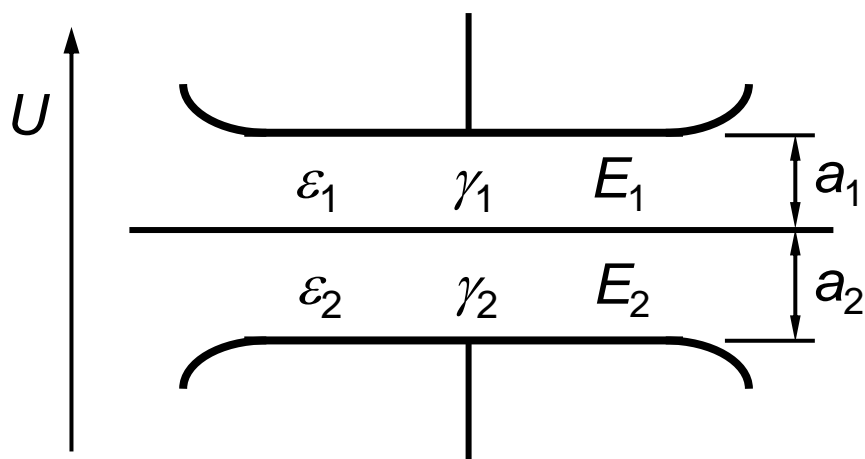
rozkład **upływnościowy**

dla układu dwuwarstwowego płaskiego:  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$

Pole zmienne,  $E(t) = \text{var.}$ :

rozkład **elektrostatyczny**

dla układu dwuwarstwowego płaskiego:  $\frac{E_1}{E_2} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$



$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{U_1}{a_1}}{\frac{U_2}{a_2}} = \frac{\frac{I \cdot R_1}{a_1}}{\frac{I \cdot R_2}{a_2}} = \frac{\frac{I \cdot a_1}{a_1 \gamma_1 S}}{\frac{I \cdot a_2}{a_2 \gamma_2 S}} = \frac{\gamma_2}{\gamma_1}$$

tylko prąd czynny  $E(t) = \text{const.}$

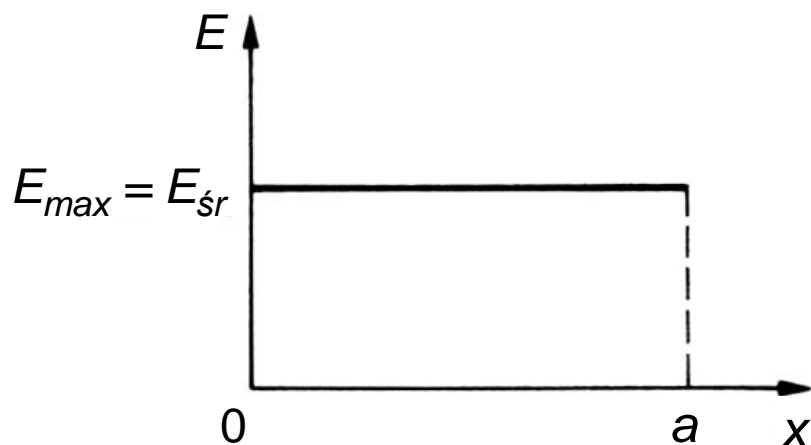
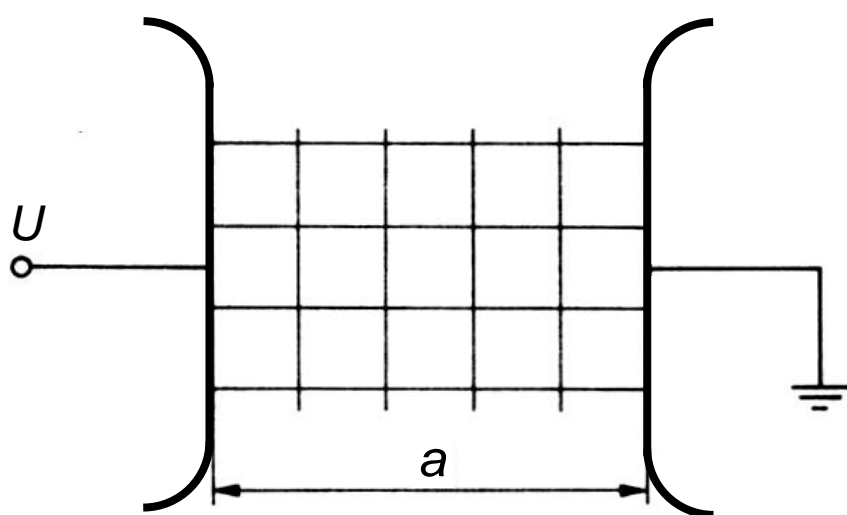
$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{U_1}{a_1}}{\frac{U_2}{a_2}} = \frac{I \cdot \frac{1}{\omega C_1} \cdot \frac{1}{a_1}}{I \cdot \frac{1}{\omega C_2} \cdot \frac{1}{a_2}} = \frac{C_2 a_2}{C_1 a_1} = \frac{\frac{\varepsilon_2 S}{a_2} a_2}{\frac{\varepsilon_1 S}{a_1} a_1} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

prąd pojemnościowy  $\gg$  od czynnego  $E(t) = \text{var.}$

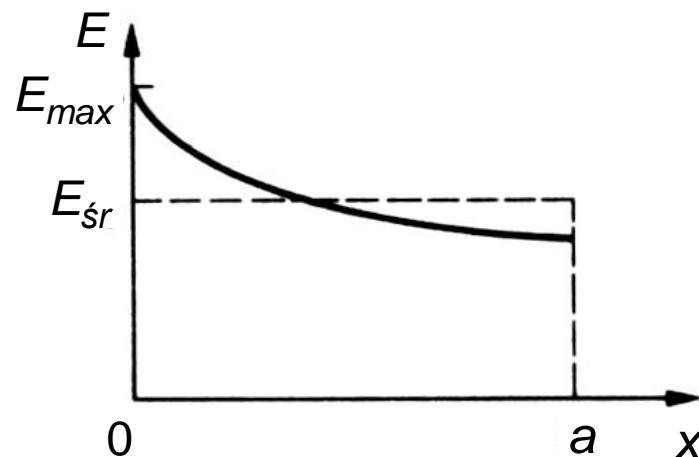
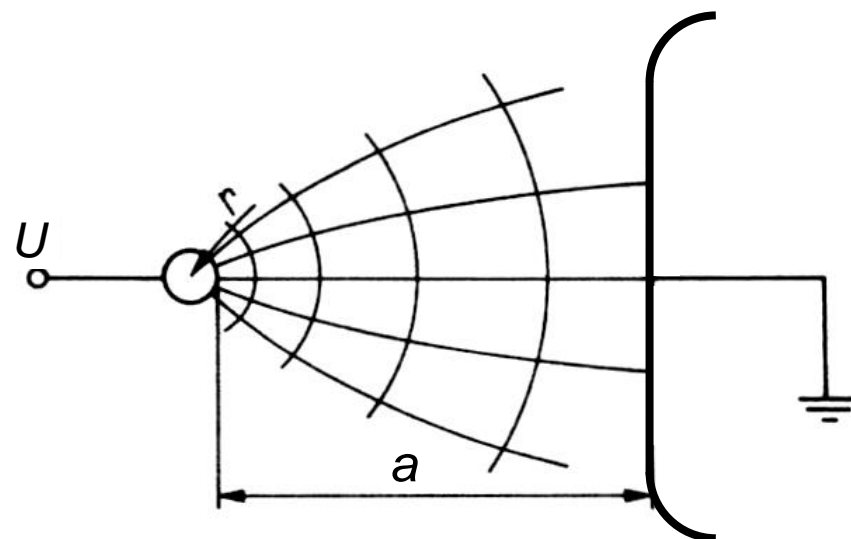
## Rozkład pola elektrycznego

Obraz graficzny:

układ ortogonalny linii sił pola elektrycznego i linii reprezentujących powierzchnie ekwipotencjalne



Pole elektryczne jednorodne



Pole elektryczne niejednorodne

## Rozkład pola elektrycznego

Pole jednorodne,  $E(x,y,z) = \text{const.}$

$$E_{\acute{s}r} = \frac{U}{a} \quad E_{\text{max}} = E_{\acute{s}r}$$

Pole niejednorodne,  $E(x,y,z) = \text{var.}$

$$E_{\text{max}} = \beta \cdot \frac{U}{a} = \beta \cdot E_{\acute{s}r}$$

**Przykładowe zależności na współczynnik  $\beta$**  (w nawiasach podano liczby porządkowe układów przedstawionych na następnych stronach, do których te zależności się odnoszą)

$$\beta = \frac{a}{r} + 1 \quad (2)$$

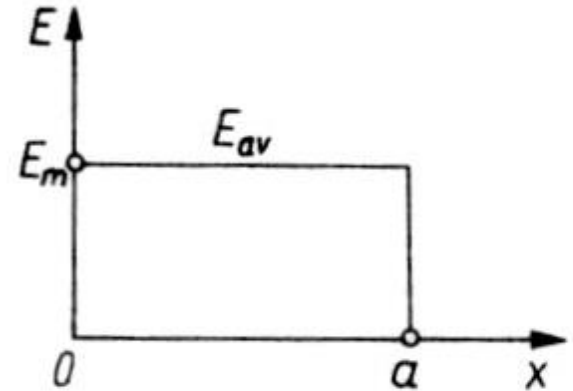
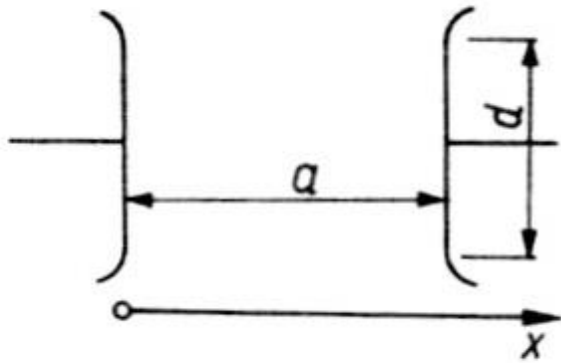
$$\beta = 0,5 \left( \frac{a}{r} + 1 \right) \quad \text{przy } \frac{a}{r} \geq 10 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{a}{r} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{a}{r} + 1\right)} \quad (7)$$

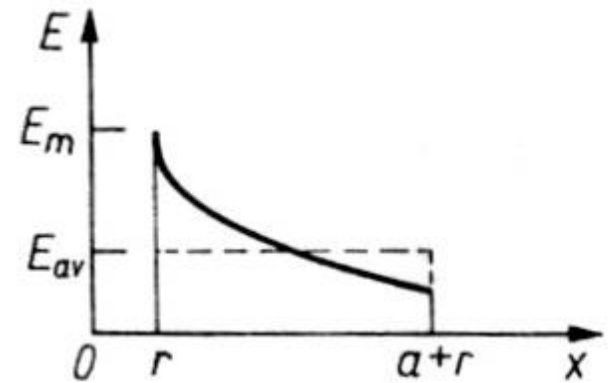
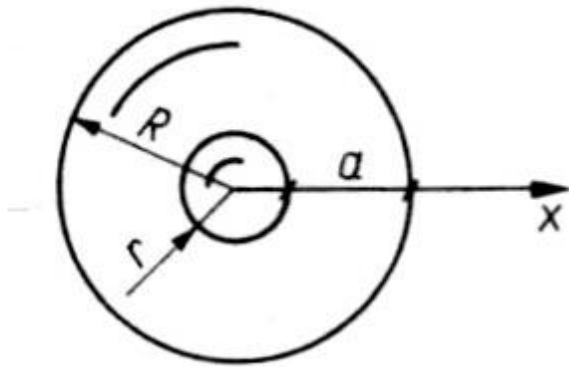
$$\beta = \frac{a}{r} \cdot \frac{1,15}{2\ln\left(\frac{a}{r} + 2\right)} \quad \text{przy } \frac{a}{r} \geq 10 \quad (10)$$

## Rozkład pola elektrycznego w układach izolacyjnych regularnych

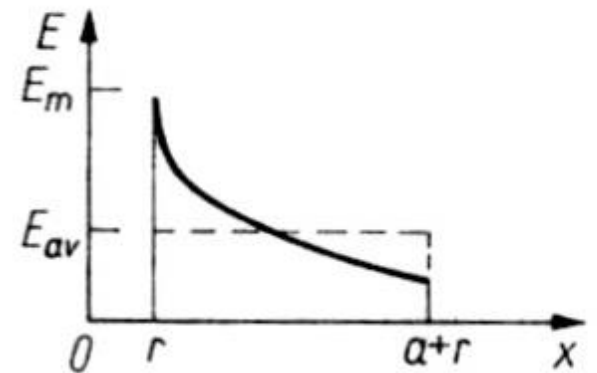
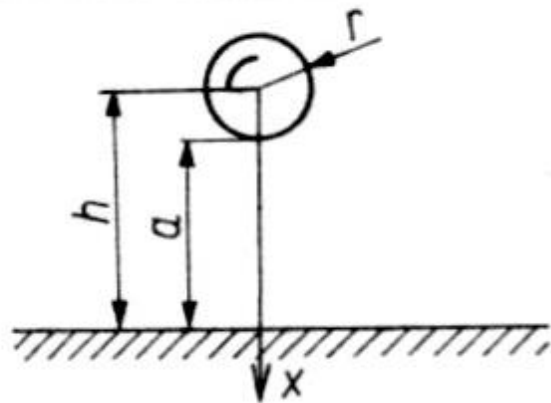
(1)



(2)



(3)

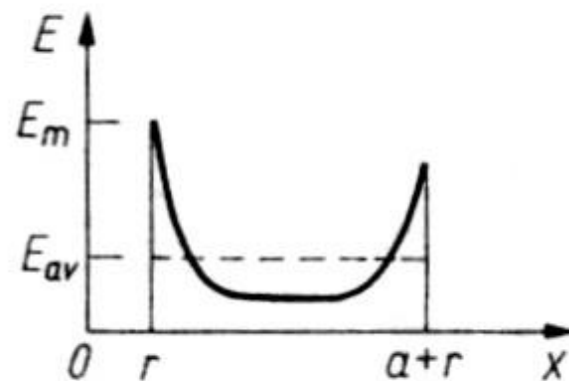
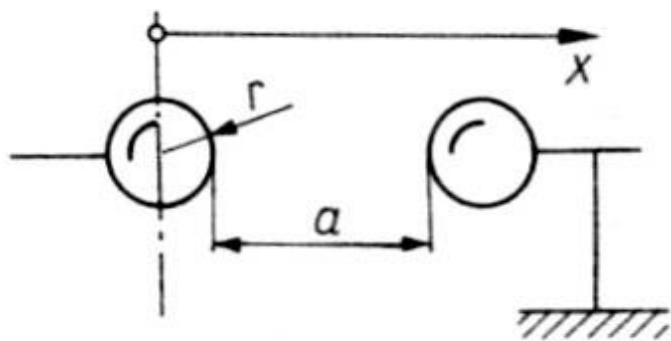


(1) - układ płaski

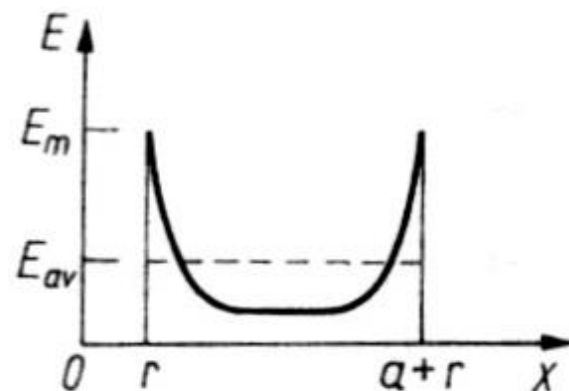
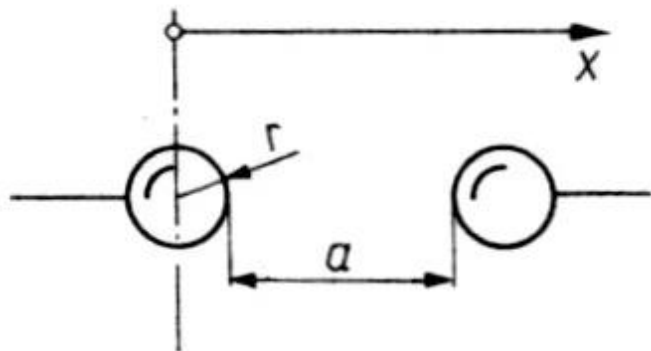
(2) - układ kul współśrodkowych

(3) - układ kula - płaszczyzna

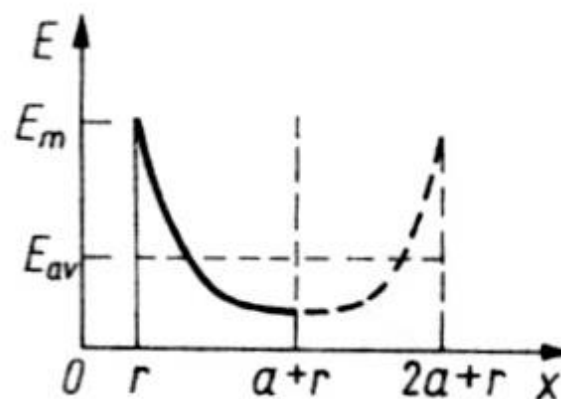
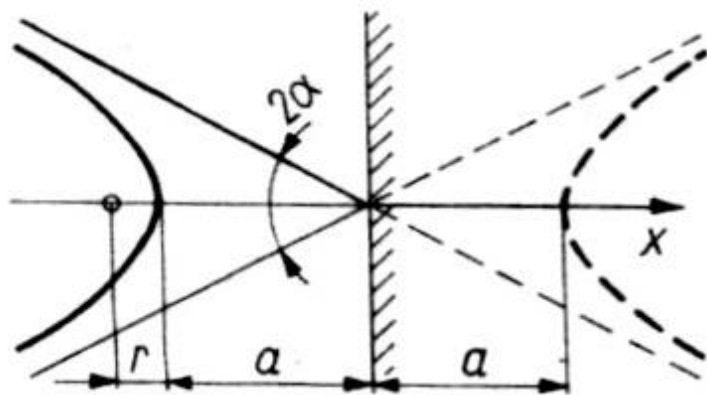
(4)



(5)



(6)

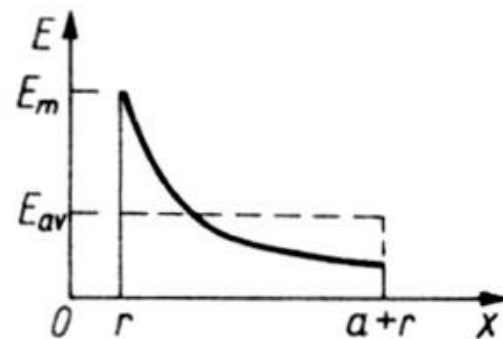
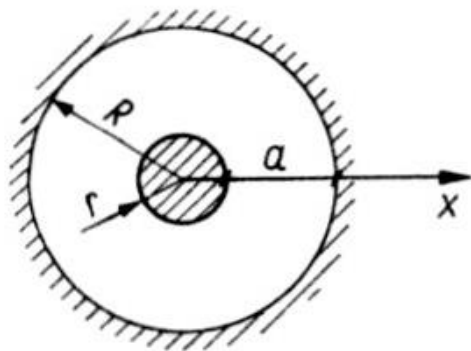


(4) - układ kulowy niesymetryczny napięciowo

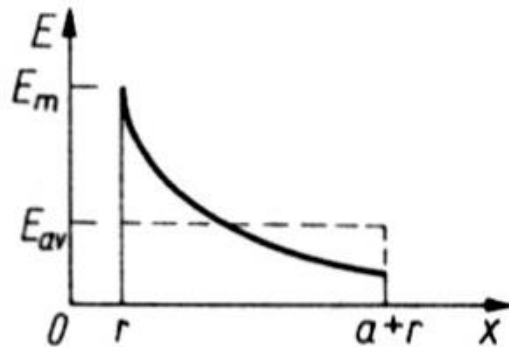
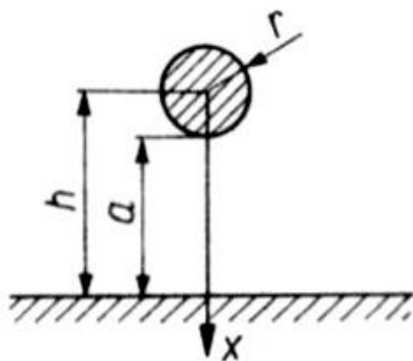
(5) - układ kulowy symetryczny napięciowo

(6) - układ ostrzowy niesymetryczny napięciowo

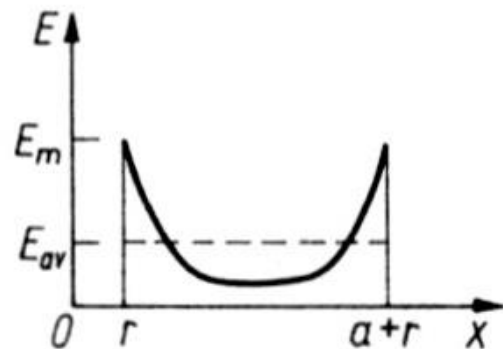
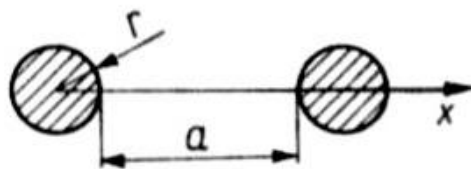
(7)



(8)



(9)

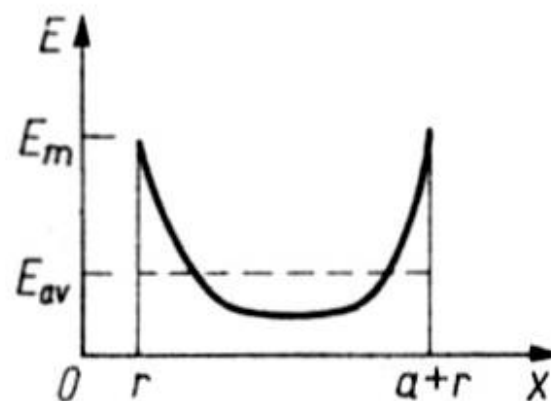
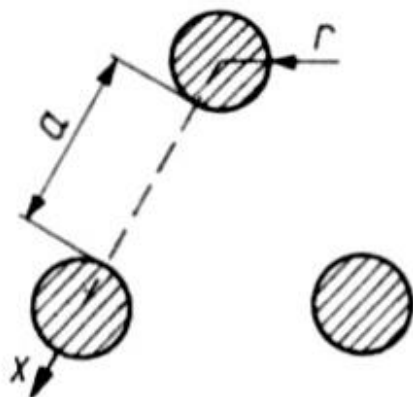


(7) - układ cylindryczny współosiowy

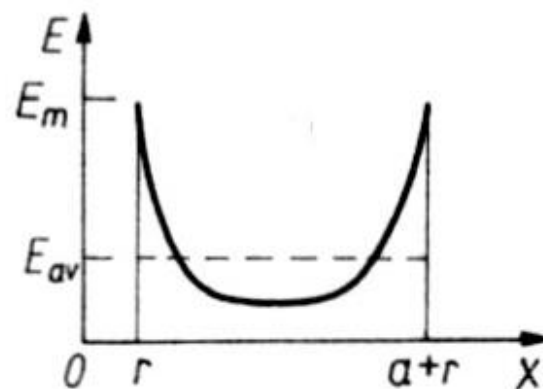
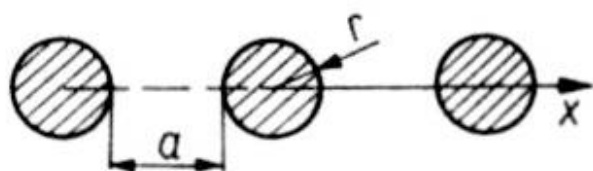
(8) - układ: walec równoległy do płaszczyzna

(9) - układ dwóch walców równoległych

(10)



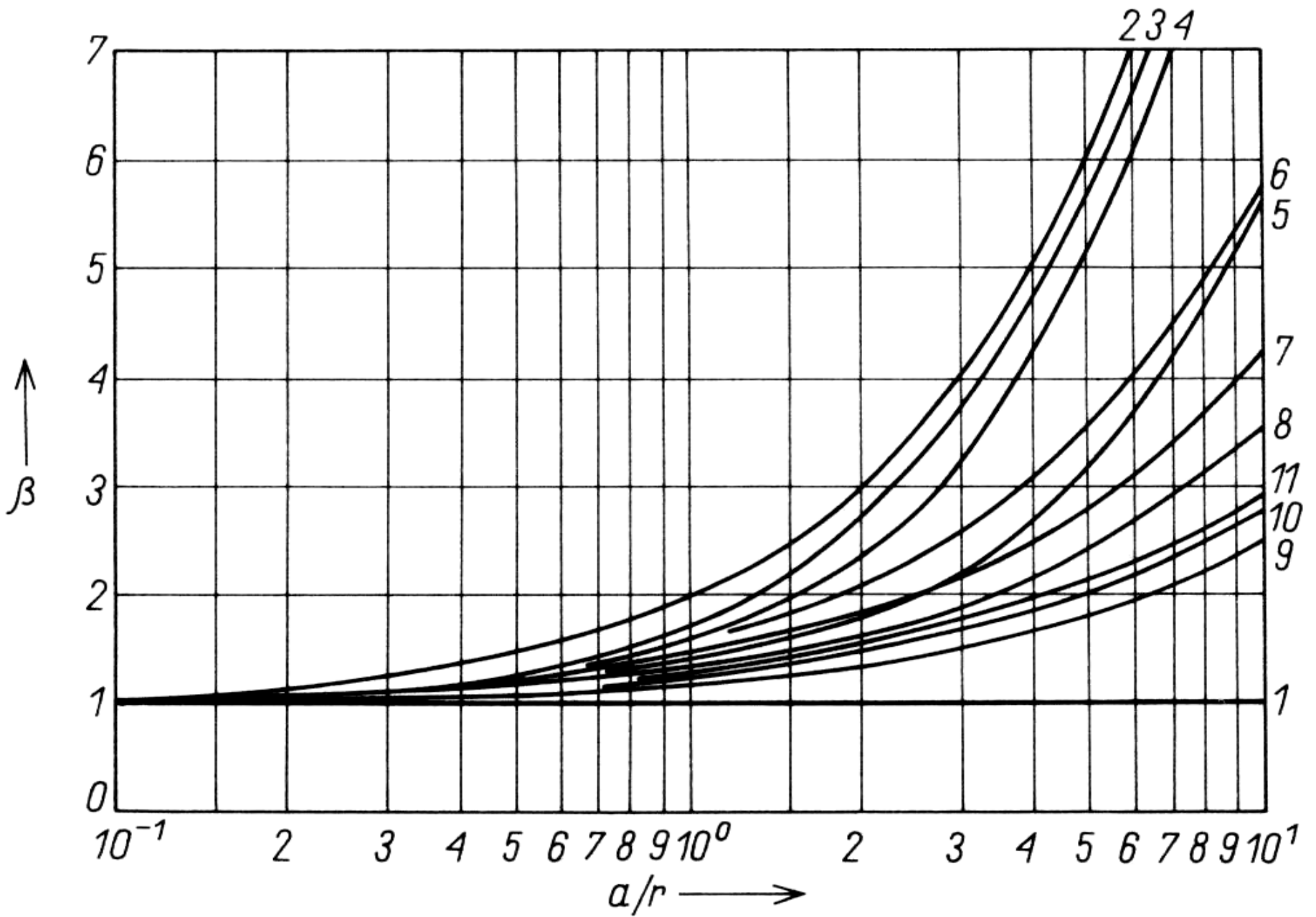
(11)



(10) - układ linii trójprzewodowej (układ trójkątny)

(11) - układ linii trójprzewodowej (układ płaski)





Zależność współczynnika  $\beta$  od  $a/r$  dla przedstawionych wyżej układów izolacyjnych